

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İPLİK BOBİNLERİNİN KURUMA DAVRANIŞININ KURUMA MODELLERİ
GELİŞTİRİLEREK MODELLENMESİ**

Mak. Müh. Çiğdem SUSANTEZ

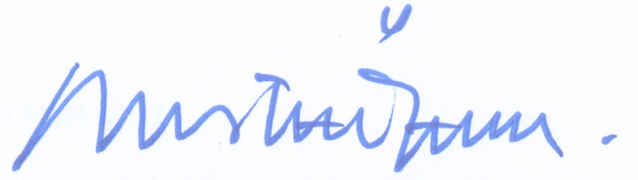
DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU

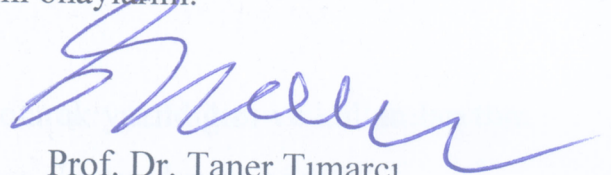
EDİRNE-2015

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı



Prof. Dr. Mustafa Özcan
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.



Prof. Dr. Taner Tımarcı
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımda okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



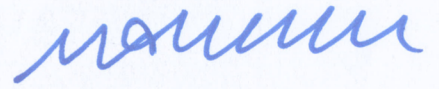
Doç. Dr. Oktay Hacıhafızoğlu
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

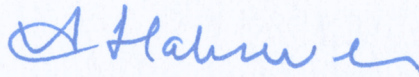
Jüri Üyeleri

İmza

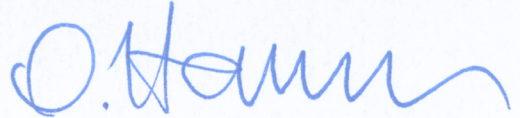
Prof. Dr. Metin AYDOĞDU



Prof. Dr. Ayşen HAKSEVER



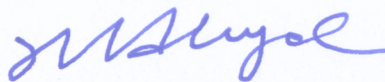
Doç. Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU (Danışman)



Doç. Dr. Cengiz DANE



Yrd. Doç. Dr. Uğur AKYOL



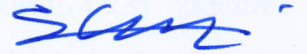
Tarih: 17/04/2015

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

23/03/2015

Çiğdem SUSANTEZ



Yıl

2015

Sayı Sayısı

143

Anahtar Kelimeler

Genetik algoritma, kurama model, difüzyon, arı ve kulla

manları

Doktora Tezi

İplik Bobinlerinin Kuruma Davranışının Kuruma Modelleri Geliştirilerek Modellenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu doktora tezinde öncelikle, yün bazlı orlon iplik bobininin kuruma davranışı difüzyon ve ısı denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Genetik algoritma yöntemi kullanılarak söz konusu kurutma havası şartları için en uygun difüzyon katsayısının sıcaklığa ve nem içeriğine bağlı Arrhenius tipi ifadesi elde edilmiştir. Difüzyon katsayısının Arrhenius tipi ifadesinde tespit edilmeye çalışılan en uygun üç katsayı bir kromozom üzerinde gösterilmiş olup popülasyon sayısı otuzdur. İstenen değerlere yirminci nesil sonunda ulaşılmıştır. Çeşitli kurutma havası şartlarında en uygun difüzyon katsayısı için bobinin nem içeriğinin zamanla değişimi grafikler halinde sunulmuştur. Diğer yandan, gözenekli bir ortam olan bobinin kurutulması sırasında bobin içi sıcaklıkları tahmin etmeye yönelik yeni bir model geliştirilmiştir. Söz konusu bu modelin diğer gözenekli ortamlara da uyarlanabileceği ön görülmektedir.

Yıl : 2015

Sayfa Sayısı : 143

Anahtar Kelimeler : Genetik algoritma, kuruma modeli, difüzyon, ısı ve kütle transferi

Doctoral Thesis

Modelling of Drying Behaviour of Yarn Bobbins by Developing Drying Models

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

In this Phd thesis initially, drying behaviour of wool based orlon yarn bobbin is modelled by using diffusion and heat equations. Most convenient Arrhenius type expression of diffusion coefficient depending on temperature and moisture for concerned drying air conditions is obtained by using the method of genetic algorithm. The most convenient three coefficients, which are tried to be find, on the Arrhenius type expression of the diffusion coefficient, are shown in a single chromosome and the population number is thirty. The desired values are obtained at the end of the twentieth generation. Moisture contents of the bobbin with time is shown as graphs for the most convenient diffusion coefficient at various drying air conditions. On the other hand, during drying of the bobbin which is a porous medium, a new model which aims predicting the temperatures inside of the bobbin is developed. It is forecasting that this model can be adapted to the other porous mediums.

Year : 2015

Number of Pages : 143

Keywords : Genetic algorithm, drying model, diffusion, heat and mass transfer

ÖNSÖZ

Kurutmanın kontrol altında tutulması, özellikle de tekstil sanayinde enerji tüketimi ve ürün kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla kuruma süresince sıcaklık ve/veya nem dağılımını bulmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmanın ilk kısmında genetik algoritma yöntemi kullanılarak iplik bobininin kurumasını en uygun modelleyen difüzyon katsayıları tespit edilmiş, bulunan en uygun difüzyon katsayıları kullanılarak kuru baza göre nem içeriğinin zamanla değişimi için model sonuçları elde edilmiştir. Diğer yandan iplik bobininin kurutulması sırasında bobin içi sıcaklık değişimlerini veren ve fiziksel özelliklerin değiştirilmesiyle diğer gözenekli ortamlara da uygulanabilecek yeni bir model ileri sürülmüştür.

Akademik olarak gelişmemde katkısı bulunan, doktora eğitimimin uzun bir diliminde Trakya Üniversitesi öğretim üyesi olarak danışmanlığımı yürütmüş olan ‘Beykent Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’ öğretim üyesi Prof. Dr. Ahmet CİHAN’a, tez çalışması sırasında en zorlu zamanlarda her zaman yanımda olan, her türlü desteği esirgemeyen, kendisinden akademik anlamda çok şey öğrendiğim danışmanım ‘Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’ öğretim üyesi Doç. Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU’na, analitik düşünme yeteneğimi kendilerinden öğrendiğim ve destekleriyle yanımda olduklarını bildiğim ‘Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’ öğretim üyeleri Prof. Dr. Metin AYDOĞDU’ya, Prof. Dr. Ayşegül ÖZTÜRK’e, Doç. Dr. Kamil KAHVECİ’ye, ‘Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü’ öğretim üyesi Doç. Dr. Cengiz DANE’ye, bana verdikleri analitik düşünme becerisi ve bilgi birikimleri sayesinde bana bu hayatı yaşattıkları için teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1 GİRİŞ ve AMAÇ	1
BÖLÜM 2 KURUTMAYLA İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR VE KURUTMA MEKANİZMASI	3
2.1. Kuruma Modellerinde Karşılaşılan Temel Kavramlar	3
2.1.1. Kapiler Basınç	3
2.1.2. Nem İçeriği	4
2.1.3. Nem Oranı	5
2.1.4. Denge Nem İçeriği	5
2.1.5. Bağlı Nem, Bağımsız Nem ve Serbest Nem	6
2.1.6. Buharlaştırma Entalpisi	7
2.1.7. Difüzyon Gücü	7
2.1.8. Gözeneklilik	7
2.1.9. Geçirgenlik	8
2.1.10. Higroskopik ve Higroskopik Olmayan Malzemeler	10
2.1.11. Sorpsiyon İzotermi	11
2.2. Kuruma Mekanizması	13
2.2.1. Kurumanın Evreleri	13
2.2.2. Gözenekli Ortamda Aktarım Mekanizmaları	15
BÖLÜM 3 İPLİK BOBİNLERİNİN KURUTULMASI	17
3.1. Nemin İplikte Bulunma Şekilleri	17
3.2. Bobinin Kurutulmasında Kullanılan Yöntemler	18
3.2.1. Santrifüj Etkisiyle Kurutma	18
3.2.2. Basınçlı Sıcak Hava Etkisiyle Kurutma	19
3.2.3. Radyo Frekanslı Kurutma	22
BÖLÜM 4 LİTERATÜRDEKİ BAZI KURUMA MODELLERİ	24
4.1. Akışkan Yatakta Polen Kuruma Modeli	24
4.2. Katıların Daimi Olmayan Rejimde Dehidrasyonu için Modifiye Edilmiş Lumped (Sıçrayış) Modeli	26
4.3. Kahve Çekirdeğinin Kuruma Modeli	28

4.4. Kurutmada İç Direnç Modeli.....	31
4.5. Tekstil Bobinlerinin Kuruma Modeli	33
4.6. Kapiler Gözenekli, Higroskopik Malzemelerin Kuruma Sırasındaki Isı ve Kütle Transfer Modeli	35
4.7. Püsküllü Tekstil Malzemelerinin Havayla Kurutulma Modeli	36
4.8. Pamuklu Bobinlerin Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transfer Modeli.....	39
4.9.Yüksek Viskoziteli Gıda Maddelerinin Vakum Altında Kurutulmasının Matematiksel Modeli.....	43
4.10. Yün İpliğin Kuruma Modeli.....	45
4.11. Transformatör Kağıdı için Önerilen Yeni Bir Nem Difüzyon Katsayısı	47
BÖLÜM 5 BOBİNİN KURUMA DAVRANIŞINI MODELLEYEN GENETİK ALGORİTMA MODELİ	
	50
5.1. Genetik Algoritma Hakkında Temel Bilgi	50
5.2. Seçim Yöntemi, Mutasyon, Elitizm ve Çaprazlama	54
5.3. Genetik Algoritmanın Kullanıldığı Basit Bir Örnek	57
5.4. Tezde Geliştirilen Genetik Algoritma Modeli.....	61
5.4.1. Programda Kullanılan Temel Eşitliklerin İfadeleri.....	64
5.4.1.1. Bobinin Efektif Isıl İletkenliğinin İfadesi.....	64
5.4.1.2. Bobinin Efektif Isı Kapasitesinin İfadesi.....	65
5.4.1.3. Sınır ve Başlangıç Şartları	66
BÖLÜM 6 BOBİNİN KURUMA DAVRANIŞINI MODELLEYEN İKİNCİ MATEMATİKSEL MODEL	
	70
6.1. Bobin İçerisinden Geçen Nemli Hava için Enerji Eşitliği.....	71
6.2. Fiziksel ve Termofiziksel Özelliklerin Tespiti	87
6.2.1. Su Buharı Yoğunluğunun Sıcaklığa Bağlı İfadesinde Gerekli Parametrelerin Tespiti... ..	87
6.2.2. İpliğe Ait Fiziksel Özelliklerin Tespiti	90
6.2.3. Bobinin ve İpliğin Gözenekliliklerinin Hesaplanması	91
6.2.4. İpliğin İçerisindeki Suyu Buharlaştırmak için Gerekli Buharlaşma Enerjisinin Tespiti	92
6.3. Sınır ve Başlangıç Şartlarının Belirlenmesi	95
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	99

7.1. Bobinin Kuruma Davranışını Modelleyen Genetik Algoritma Modelinin	
Sonuçları.....	99
7.2. Bobinin Kuruma Davranışını Modelleyen İkinci Matematiksel Model	
Sonuçları.....	128
7.2.1. Çözülecek Denklem, Başlangıç ve Sınır Şartları.....	128
7.2.2. Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemlerin Sınıflandırılması ve Modelin	
Çözümü.....	129
KAYNAKLAR	
ÖZGEÇMİŞ	
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER	
EK-A BU ÇALIŞMADA GELİŞTİRİLEN GENETİK ALGORİTMA PROGRAMI.....	

SİMGELER DİZİNİ

A	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
A_1, A_2	Denge nemindeki katsayılar, boyutsuz sıcaklığı ifade eden polinomdaki sabitler
A_3, A_4	Boyutsuz sıcaklığı ifade eden polinomdaki sabitler
A_i	Tüpün iç yüzey alanı
A_o	Tüpün dış yüzey alanı
A_r	Yüzey alanı
A_s	Yüzey alanı
a	Matlab’de pdepe (başlangıç-sınır değer problem çözücü)’de konumun alt değeri
a	Sıcaklığın zamana bağlı ifadesindeki sabit, alansal gözeneklilik
a_1	Özgül nemin sıcaklığa bağlı ifadesindeki parametre
$a_0(\tau)$	Boyutsuz zamana bağlı terim
$a_1(\tau)$	Boyutsuz zamana bağlı terim
$a_2(\tau)$	Boyutsuz zamana bağlı terim
B	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
B	Boyutsuzlaştırma sonucu (4.20) eşitliğinde görülen bir parametre
Bi	Biot sayısı
b	Matlab’de pdepe’de konumun üst değeri
b	Sıcaklığın zamana bağlı ifadesindeki sabit
b_1	Özgül nemin sıcaklığa bağlı ifadesindeki parametre
C	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
C	Nem konsantrasyonu
C_1, C_2	Sabitler
C_a	Havadaki buhar konsantrasyonu
C_e	Yüzeydeki nem konsantrasyonu
C_f	Fiberlerin içerisindeki su buharı konsantrasyonu
$C_{f,max}$	Fiberlerin içerisindeki su buharı konsantrasyonunun maksimum değeri

C_{m-est}	Model sonucu bulunan nem konsantrasyonu
C_{m-exp}	Deney sonucu bulunan nem konsantrasyonu
C_s	Çekirdek yüzeyindeki buhar konsantrasyonu
C_∞	Ortamin nem konsantrasyonu
c	Matlab’de pdepe’de tanımlı parametreler
c	Özgöl ısı, boyutsuz nem konsantrasyonu, sıcaklığın zamana bağlı ifadesindeki sabit
c_b	Bobinin özgöl ısısı
c_{dm}	Kahve çekirdeği için kuru maddenin ısı kapasitesi
c_k	Katı matrisin özgöl ısınma ısısı
c_{kuru}	Kuru kısmın özgöl ısısı
c_{orlon}	Orlonun özgöl ısısı
c_p	Sabit basınçta özgöl ısı
c_{pA}	Havanın sabit basınçta özgöl ısısı
c_{pB}	Su buharının sabit basınçta özgöl ısısı
c_s	Katı fazın özgöl ısısı
c_{su}	Suyun özgöl ısısı
c_t	Tüpün özgöl ısınma ısısı
$c_{yün}$	Yünün özgöl ısısı
D	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
D	Gözeneksiz ortamın difüzyon katsayısı
D_o, D_1, D_2	Difüzyon katsayısındaki parametreler
D_{eff}	Gözenekli ortamdaki difüzyon katsayısı
d	İplik çapı
dr	Diferansiyel kalınlık
dV	Diferansiyel hacim
dz	Diferansiyel kalınlık
E	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
$\dot{E}_{depolanan}$	Birim zamanda depolanan enerji
$(\dot{E}_g - \dot{E}_c)_{isilya,r}$	Birim zamanda radyal yönde ısıyla giren net enerji
$(\dot{E}_g - \dot{E}_c)_{isle,r}$	Birim zamanda radyal yönde işle geçen net enerji

$(\dot{E}_g - \dot{E}_c)_{kütleye,r}$	Birim zamanda radyal yönde kütleyle giren net enerji
$\dot{E}_{\ddot{u}}$	Birim zamanda üretilen enerji
e	Birim kütle için enerji
F	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
F	Kuvvet
Fo	Fourier sayısı
f	Matlab’de pdepe’de tanımlı parametre
f	Suyun aktivitesi
f_{sum}	Popülasyonu oluşturan bireylerin uygunluk değerleri toplamı
G	Kısmi diferansiyel denklemdeki sabit
$\dot{G}$	Kuru hava akısı
H	Bobin yüksekliği
$\dot{H}_{bağ}$	Bağ entalpisi
$\dot{H}_{buhar}$	Buharın entalpisi
$\dot{H}_{sıvı}$	Sıvının entalpisi
h	Bobinin yüksekliği
h_A	Birim kütle için havanın entalpisi
h_B	Birim kütle için su buharının entalpisi
h_{ba}	Çekirdek hava arasındaki ısı taşınım katsayısı
$h_{bağ}$	Bağlanma özgül entalpisi
h_o	Çevre hava ile kavurma hücresi yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı
h_{ta}	Tüp ve hava arasındaki ısı taşınım katsayısı
$j_{a\infty}$	Havanın kütle akısı
K_1, K_2, K_3	Enerji denklemindeki model parametreleri
k	Isı iletim katsayısı
k_A, k_g	Havanın ısı iletim katsayısı
k_B	Su buharının ısı iletim katsayısı
k_b	Kahve çekirdeğinin ısı iletim katsayısı
k_c	Difüzyon katsayısındaki parametre
k_{eA}	Kuru bölgenin ısı iletim katsayısı
k_{eff}	Bobinin efektif ısıl iletkenliği

k_k	Fiberlerin ısı iletim katsayısı
k_l	Sıvı suyun ısı iletim katsayısı
k_m	Suyun kütle transfer katsayısı
k_{orlon}	Orlonun ısı iletim katsayısı
k_s	Katı kısmın ısı iletim katsayısı
k_{su}	Fiberler içerisindeki sıvı suyun ısı iletim katsayısı
$k_{yün}$	Yünün ısı iletim katsayısı
ke	Birim kütle için kinetik enerji
L	Ürün boyu, ipliğin uzunluğu
L_{ba}	Tüpün metre uzunluğu için temas alanı
l	İzolasyon kağıdı kalınlığı
M	Kurumanın belirli bir anındaki bobinin nem içeriği, akışkan yatakta katı nem içeriği
$\bar{M}$	Akışkan yatakta ortalama nem içeriği
M_o	Akışkan yatakta başlangıç nem içeriği
M_d	Malzemenin kuru kütlesi
M_e	Bobinin denge nem içeriği
M_{eq}	Akışkan yatakta denge nem içeriği
M_t	Malzemenin toplam kütlesi
M_w	Malzemenin içerdiği su kütlesi
m	Anlık nem içeriği
m	Matlab’de kısmi türevli diferansiyel denklem parametresi
$\dot{m}$	Birim zamanda birim yüzeyden transfer edilen kütle, buharlaşma hızı
$\dot{m}_a$	Havanın kütledebisi
$\dot{m}_{buhar}$	Birim zamanda geçen buharın kütlesi
m_e	İpliğin denge halindeki nem içeriği
m_{iplik}	İpliğin kütlesi
m_k	İplikte katı matrisin kütlesi
$m_{kuru\ bobin}$	Kuru bobinin kütlesi (makara ağırlığı ihmal)
$m_{kuru\ hava}$	Kuru havanın kütlesi
m_{nem}	Nem miktarı

m_o	İplik için başlangıçtaki nem içeriği
m_s	Katı kısmın kütlesi
$\dot{m}_{sivi}$	Birim zamanda geçen sıvı kütlesi
m_{su}	Suyun kütlesi
$\dot{m}_v$	Birim zamanda buharlaşan su buharı kütlesi
m_w	Yaş baza göre nem içeriği
$m_{yaş}$	İplik bobininin yaş ağırlığı
$(\dot{m}e)_{A,r}$	Hava tarafından birim zamanda radyal yönde kütleyle taşınan enerji
$(\dot{m}e)_{B,r}$	Su buharı tarafından birim zamanda radyal yönde kütleyle taşınan enerji
mr	Malzemenin nem oranı
N	dx diferansiyel kalınlığındaki iplik sayısı
Nm	Numara metrik
Ne	Numara İngiliz
N_u	Turnuvaya katılacak birey sayısı
P	Basınç
P_{atm}	Atmosferik basınç
P^*_{buhar}	Doymuş buhar basıncı
P_c	Kapiler basınç, çaprazlama olasılığı
P_{eff}	Efektif basınç
P_g	Gaz basıncı
P_l	Sıvı basıncı
P_{sb}	Kuruma cephesindeki su buharı kısmi basıncı
P_{ss}	Yüzeydeki su buharı kısmi basıncı
P_v	Su buharı basıncı
p	Matlab'de pdepe'de tanımlı parametre
pe	Birim kütle için potansiyel enerji
$\dot{Q}_{buharlaşma}$	Buharlaşmaya harcanan enerji
Q_{dif}	Difüzyon gücü
$\dot{Q}_r$	Radyal yönde ısıyla geçen enerji
q	Matlab'de pdepe'de tanımlı parametre
$\dot{q}_{buharlaşma}$	Birim hacim için birim zamanda buharlaşma ısısı

q_{nem}	Toplam ısı akısının nemli bölgeye geçen kısmı
q_{sorp}	Toplam ısı akısının emilen kısmı
q_{top}	Toplam ısı akısı
R	Yarıçap, yakınsaklık yarıçapı
$R(t)$	Hareketli sınırın konumu
R_m	Kütle direnci
R_b	Kahve çekirdeğinin yarıçapı
R_{buhar}	Buharın gaz sabiti
R_c	Genetik algortmada rastgele üretilen sayılar
R_i	İç direnç
R_s	Genetik algortmada rastgele üretilen sayılar
R_s	Yüzeyde kütle transfer direnci
R_t	Tüpün (kavurma hücresinin) iç yarıçapı, ısı direnç
R_u	Üniversal gaz sabiti
RH	Bağıl nem
r	Radyal doğrultu
r_1, r_2	Sıvı yüzey eğrilinin asal yarıçapları
r_d	Bobin dış yarıçapı
r_f	Buharlaştırma cephesinin konumu
r_i	Bobin iç yarıçapı
r_M	Kuru bölge orta yarıçapı
r_o	Tüp yarıçapı, ürün dış yarıçapı
r_s	Polenin yarıçapı
s	Matlab’de pdepe’de tanımlı parametre
T_1	Havanın girişteki sıcaklığı, bobin iç sıcaklığı
$T_{2,.....,7}$	Bobin iç sıcaklıkları
T_A	Kuru kısmın sıcaklığı
T_a	Havanın sıcaklığı
$T_{a\infty}$	Ortam sıcaklığı
T_b	Kahve çekirdeğinin sıcaklığı
$T_{buharlaştırma}$	Buharlaştırma sıcaklığı

T_d	Bobin dış yüzey sıcaklığı
T_{ext}	Kurutma havası sıcaklığı
T_i	Başlangıç sıcaklığı
T_k	İzolasyon tabakası sıcaklığı
T_M	Kuru bölge orta nokta sıcaklığı
T_{nem}	Nemli bölge yüzey sıcaklığı
T_o	Çevre havasının sıcaklığı, başlangıç sıcaklığı
T_{ort}	Ortalama sıcaklık
$T_{seperatör çıkış}$	Seperatör çıkış sıcaklığı
T_t	Tüpün sıcaklığı
T_x	Kurutma havasının yoğuşma sıcaklığı
T_y	Yüzey sıcaklığı
t_f	Matlab’de zamanın üst değeri
t_{max}	Sıcaklık için uydurulan eğride zamanın üst değeri
t_{min}	Sıcaklık için uydurulan eğride zamanın alt değeri
t_o	Matlab’de zamanın alt değeri
U	İç enerji
u	Bağımlı değişken
$u_0(x)$	Matlab’de pdepe’de bağımlı değişkenin başlangıç değeri
u_B	Buhar hızı
u_x	Bağımlı değişkenin x’e göre türevi
u_{xx}	Bağımlı değişkenin x’e göre ikinci türevi
u_{xy}	Bağımlı değişkenin karma türevi
u_y	Bağımlı değişkenin y’ye göre türevi
u_{yy}	Bağımlı değişkenin y’ye göre ikinci türevi
V_A	İpliğin içerisindeki havanın kapladığı hacim
V_{bobin}	Bobinin hacmi
$V_{boş gözenek}$	Boş gözenek hacmi
$V_{boşluk}$	Boşluk hacmi, bobin içi ipliklerin dışındaki boşluk hacmi
$V_{dolu gözenek}$	Sıvı dolu gözenek hacmi
$V_{fiberlerdeki boşluk}$	İpliğin içerisindeki boşluk hacmi

$V_{gözenek}$	Gözenek hacmi
V_{iplik}	İpliğin kapladığı hacim
$V_{ipliklerdeki\ boşluk}$	İplikteki boşluk hacmi
$V_{katı}$	İplikte katı matrisin kapladığı hacim
V_s	Parçacık hacmi
V_{su}	İpliğin içerisindeki sıvı suyun kapladığı hacim
V_{Toplam}	Bobinin toplam hacmi
$V_{Toplam,f}$	İpliğin toplam hacmi
V_t	Tüpün hacmi
V_{toplam}	Toplam hacim
W_c	Fiberlerin içerisindeki su buharı konsantrasyonunun fiberlerin yoğunluğuna oranı
W_{kuru}	Bobinin kuru haldeki ağırlığı
$W_{yaş}$	Bobinin yaş haldeki ağırlığı
X	Kuru baza göre nem içeriği
X_b	Kahve çekirdeğinin nem içeriği
X_c	Kritik nem (Sabit hızda kuruma evresi sonundaki nem)
$\bar{X}_{deney}$	Ortalama nem içeriği için deneysel sonuçlar
X_e	Denge nem içeriği
X_i	Başlangıçtaki nem içeriği
X_{max}	Nem içeriğinin maksimum değeri
$\bar{X}_{tahmin}$	Ortalama nem içeriği için model sonuçları
X_w	Yaş baza göre nem içeriği
x	Boyutsuz konum, dx kalınlığındaki tabakaya olan radyal uzaklık
x_i	Bobin iç yarı çapı
x_o	Bobin dış yarı çapı
Y	Akışkan yatakta havanın mutlak nemi
Y_1	Havanın girişteki mutlak nemi
y_1, y_2, y_3, y_4	Sıcaklık için uydurulan eğride parametreler
Z	Bobinin efektif ısı kapasitesi genel ifadesinde bir parametre
α	Isıl yayılım katsayısı

α_{eA}	Kuru bölgenin ısı yayılım katsayısı
$\alpha_n (n = 1, 2, \dots)$	$J_0(x)$ 'in kökleri
γ	Difüzyon katsayısında bir parametre
ΔH	Buharlaştırma gizli ısı
ΔH_{orlon}	Suyun orlon fiberlerinden buharlaştırma gizli ısı
$\Delta H_{yün}$	Suyun yün fiberlerinden buharlaştırma gizli ısı
$\Delta H_{yün,min}$	Suyun yün fiberlerinden buharlaştırma gizli ısının nem içeriği minimum olduğunda değeri
$\Delta H_{yün,max}$	Suyun yün fiberlerinden buharlaştırma gizli ısının nem içeriği maksimum olduğunda değeri
δ	Su tarağı kalınlığı, buharın difüzivitesi
δ_d	Düzgün kuruma cephesinin yüzeye uzaklığı
ε	Faz dönüşüm faktörü, gözeneklilik
ε_f	Fiberlerden oluşan ipliğin gözenekliliği
ξ	Boyutsuz uzunluk
θ	Silindirik koordinatlarda açı, temas açısı, boyutsuz sıcaklık
λ	Sabit
μ	Dinamik viskozite, buhar difüzyon direnci
μ_B	Buharın dinamik viskozitesi
ρ	Yoğunluk, fiberlerin yoğunluğu
ρ_A	Havanın yoğunluğu
ρ_B	Su buharı yoğunluğu
ρ_b	Bobinin yoğunluğu
$\rho_{v\infty}$	Hava akışı içindeki su buharının yoğunluğu
ρ_{vs}	Nemli bölge yüzeyindeki doymuş su buharının yoğunluğu
$\rho_{b,kuru}$	İplik bobininin kuru haldeki yoğunluğu
ρ_{dm}	Kahve çekirdeği için kuru maddenin yoğunluğu
ρ_{iplik}	İpliğin yoğunluğu
ρ_k	Kuru kısmın yoğunluğu, katı matrisin yoğunluğu
ρ_{orlon}	Orlonun yoğunluğu
ρ_{su}	Sıvı fazındaki suyun yoğunluğu

ρ_t	Tüpün yoğunluğu
$\rho_{yün}$	Yünün yoğunluğu
$(\rho c_p)_{eff}$	Birim hacim için bobinin efektif ısı kapasitesi
$(\rho c_p)_{hava}$	Birim hacim için havanın ısı kapasitesi
$(\rho c_p)_{katı}$	Birim hacim için katı matrisin ısı kapasitesi
$(\rho c_p)_{sıvı}$	Birim hacim için sıvının ısı kapasitesi
σ_{lg}	Sıvı-gaz ara yüzeyindeki yüzey geliri
σ_{sg}	Katı-gaz ara yüzeyindeki yüzey geliri
σ_{sl}	Katı-sıvı ara yüzeyindeki yüzey geliri
τ	Boyutsuz zaman
$\emptyset_A$	İpliğin içerisindeki havanın kapladığı hacmin ipliğin içindeki toplam boşluk hacmine oranı
$\emptyset_g$	Gözenekli malzemede gaz fazının kapladığı hacmin toplam hacme oranı
$\emptyset_l$	Gözenekli malzemede sıvının kapladığı hacmin toplam hacme oranı
$\emptyset_s$	Gözenekli malzemede katının kapladığı hacmin toplam hacme oranı
$\emptyset_{su}$	İpliğin içerisindeki sıvı suyun kapladığı hacmin ipliğin içindeki toplam boşluk hacmine oranı
φ	Havanın bağıl nemi, boyutsuz nem içeriği
$\varphi_{seperatör çıkış}$	Seperatör çıkışındaki bağıl nem
$\bar{\varphi}$	Ortalama boyutsuz nem konsantrasyonu
ω	Havanın özgül nemini
ω_{sb}	Kuruma cephesindeki özgül nem
ω_{ss}	Yüzeydeki özgül nem
ω_{∞}	Dış ortamdaki özgül nem
ω_x	Kurutma havası %100 bağıl neme eriştiğinde özgül nemi
ω_{ext}	Portmantiyere giren kurutma havasının özgül nemi

Bazı alt indisler

A	Hava
B	Buhar

l	Sol
r	Sağ

Kısaltmalar

G. A.	Genetik algoritma
FEM	Sonlu elemanlar modeli
kb	Kuru baz

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Doğal yün fiberleri için model sonuçları	6
Tablo 2.2 Maddelerin gözeneklilikleri	8
Tablo 2.3 Malzemelerin katı matrislerinin geçirgenlik değerleri.....	9
Tablo 2.4 Gözenekli ortamdaki ısı ve kütle transfer mekanizmaları	15
Tablo 5.1 Popülasyonu oluşturan bireyler ve uygunluk değerleri	58
Tablo 5.2 Sonraki popülasyon için seçilen başarılı bireyler	58
Tablo 5.3 Geçici popülasyon.....	59
Tablo 5.4 Sonraki popülasyon için seçilen başarılı bireyler	60
Tablo 5.5 Her bir deney şartı için bobinin denge nemi ve başlangıç nemi	66
Tablo 5.6 Makine çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi	68
Tablo 6.1 Özgül nemin sıcaklığa bağlı ifadesindeki sabitler	90
Tablo 6.2 Yün ve orlona ait fiziksel özellikler.....	90
Tablo 6.3 Fiziksel ve termofiziksel özellikler.....	94
Tablo 6.4 Çeşitli kurutma şartlarında bobin dış yüzey sıcaklığı için uydurulan eğriler..	98
Tablo 7.1 1 bar 80 °C için uygunluk değerleri	101
Tablo 7.2 1 bar 90 °C için uygunluk değerleri	103
Tablo 7.3 1 bar 100 °C için uygunluk değerleri	105
Tablo 7.4 2 bar 80 °C için uygunluk değerleri	107
Tablo 7.5 2 bar 90 °C için uygunluk değerleri	109
Tablo 7.6 2 bar 100 °C için uygunluk değerleri	111
Tablo 7.7 3 bar 80 °C için uygunluk değerleri	113
Tablo 7.8 3 bar 90 °C için uygunluk değerleri	115
Tablo 7.9 3 bar 100 °C için uygunluk değerleri	117
Tablo 7.10 Kısmi diferansiyel denklemlerin sınıflandırılması	129

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Temas açısı θ ve yüzeye etkiyen kuvvetler	3
Şekil 2.2 Kurumadaki nem türleri	6
Şekil 2.3 Gözeneklilik ve geçirgenlik	10
Şekil 2.4 Higroskopik ve higroskopik olmayan malzemeler	11
Şekil 2.5 Higroskopik bir malzeme için nemlendirme ve kuruma izotermi.....	12
Şekil 2.6 Sorpsiyon izotermiinin sıcaklıkla değişimi.....	12
Şekil 2.7 Sabit kuruma şartlarında tipik kuruma eğrisi.....	13
Şekil 2.8 Hidroskopik malzeme için karakteristik kuruma, kuruma hızı ve sıcaklık eğrileri	14
Şekil 2.9 Gözenekli ortamda çeşitli kütle transfer mekanizmaları	16
Şekil 3.1 Santrifüj bobin sıkma makinesi	18
Şekil 3.2 Basınçlı kurutucunun şematik görünüşü	20
Şekil 3.3 Basınçlı bobin kurutma makinesi.....	21
Şekil 3.4 Radyo frekanslı kurutma makinesi	22
Şekil 3.5 Taşıma bantlı radyo frekanslı kurutucu	23
Şekil 4.1 Modelde incelenen geometriler.....	27
Şekil 4.2 Kahvenin kavrulduğu makine	29
Şekil 4.3 Su tırağı	31
Şekil 4.4 Gözenekli ortam modeli.....	31
Şekil 4.5 Rüzgar tüneline yerleştirilen bobin	33
Şekil 4.6 Basınçlı havayla bobinlerin kurutulması	34
Şekil 4.7 Kurutma havasına maruz iplik.....	37
Şekil 4.8 İpliğin kesitinde ısı ve kütle transfer dirençlerinin gösterimi	37
Şekil 4.9 Bobin kurutma deney tesisatının şematik görünüşü	40
Şekil 4.10 İpliğin geometrisi ve koordinat sistemi	40
Şekil 4.11 Bobin geometrisi	41
Şekil 4.12 Kesintisiz vakum kurutucu deney aparatı	43
Şekil 4.13 a Kurutmanın fiziksel modeli.....	44
Şekil 4.13 b Basitleştirilmiş fiziksel model A-kuru bölge, B- nemli bölge	44

Şekil 4.14 Kurumaya bırakılan yün iplik	46
Şekil 4.15 Termogravimetrik deneylerde kullanılan kağıt izolasyon örneği	47
Şekil 4.16 Difüzyon katsayısını tespiti için geliştirilen yöntem	48
Şekil 5.1 Gen, kromozom ve genom arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.....	51
Şekil 5.2 Genetik algoritmada popülasyon yapısı.....	52
Şekil 5.3 Onluk tabanda bir tam sayının reel sayı karşılığı	52
Şekil 5.4 İkilik tabanda bir reel sayının onluk tabanda karşılığı.....	53
Şekil 5.5 Genetik algoritmanın akış diyagramı.....	53
Şekil 5.6 Seçim	54
Şekil 5.7 Uygunluk değerleri farklı olan bireylerinin rulet tekerleği üzerinde sembolize edilmeleri.....	55
Şekil 5.8 Kurutulan iplik bobini.....	62
Şekil 5.9 Genetik algoritma modelinin akış şeması	63
Şekil 5.10 D_0 , D_1 ve D_2 değerlerinin örnek bir birey üzerinde gösterimi	69
Şekil 6.1 Bobin içerisinde silindirik koordinatlarda tanımlanmış diferansiyel kontrol hacmi	70
Şekil 6.2 Silindirik koordinatlarda diferansiyel kontrol hacmi.....	71
Şekil 6.3 295 g/km ipliğin elektron mikroskopundaki görüntüsü.....	76
Şekil 6.4 Bobin içerisinde kurutma havasına maruz iplikler	78
Şekil 6.5 Kurutma havasının sabit entalpide nemlenmesi	85
Şekil 6.6 Bobin kurutma cihazının şematik görünüşü	87
Şekil 6.7 İçten dışa kurutmada seperatör çıkış sıcaklığı-zaman grafiği.....	88
Şekil 6.8 İçten dışa kurutmada seperatör çıkışındaki bağıl nem-zaman grafiği	88
Şekil 6.9 Psikrometrik diyagramda havanın ısıtılması.....	89
Şekil 6.10 İplik bobininin şematik görünüşü	95
Şekil 6.11 İçten dışa kurutmada kurutma havasının 1 bar basınç değeri için bobin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	96
Şekil 6.12 İçten dışa kurutmada kurutma havasının 2 bar basınç değeri için bobin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	96
Şekil 6.13 İçten dışa kurutmada kurutma havasının 3 bar basınç değeri için bobin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	97

Şekil 7.1 1 bar 80°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	119
Şekil 7.2 1 bar 90°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	119
Şekil 7.3 1 bar 100°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	120
Şekil 7.4 2 bar 80°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	120
Şekil 7.5 2 bar 90°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	121
Şekil 7.6 2 bar 100°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	121
Şekil 7.7 3 bar 80°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	122
Şekil 7.8 3 bar 90°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	122
Şekil 7.9 3 bar 100°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	123
Şekil 7.10 Ortalama uygunluk değerleri	124
Şekil 7.11 1 bar basınç için Psikrometrik Diyagram	125
Şekil 7.12 2 bar basınç için Psikrometrik Diyagram	126
Şekil 7.13 3 bar basınç için Psikrometrik Diyagram	126
Şekil 7.14 İplik bobininin şematik görünüşü	128
Şekil 7.15 Literatürdeki kuruma modelinde bobin içi sıcaklık dağılımı ve bobinin nem içeriğinin deney ve model sonuçları	133
Şekil 7.16 1 bar 80°C için ikinci matematiksel model sonuçları	134
Şekil 7.17 1 bar 80°C için sıcaklığın zamanla değişimi	134
Şekil 7.18 1 bar 90°C için ikinci matematiksel model sonuçları	135
Şekil 7.19 1 bar 90°C için sıcaklığın zamanla değişimi	135
Şekil 7.20 1 bar 100°C için ikinci matematiksel model sonuçları	136
Şekil 7.21 1 bar 100°C için sıcaklığın zamanla değişimi	136
Şekil 7.22 2 bar 80°C için ikinci matematiksel model sonuçları	137

Şekil 7.23 2 bar 80°C için sıcaklığın zamanla değişimi.....	137
Şekil 7.24 2 bar 90°C için ikinci matematiksel model sonuçları	138
Şekil 7.25 2 bar 90°C için sıcaklığın zamanla değişimi.....	138
Şekil 7.26 2 bar 100°C için ikinci matematiksel model sonuçları	139
Şekil 7.27 2 bar 100°C için sıcaklığın zamanla değişimi.....	139
Şekil 7.28 3 bar 80°C için ikinci matematiksel model sonuçları	140
Şekil 7.29 3 bar 80°C için sıcaklığın zamanla değişimi.....	140
Şekil 7.30 3 bar 90°C için ikinci matematiksel model sonuçları	141
Şekil 7.31 3 bar 90°C için sıcaklığın zamanla değişimi.....	141
Şekil 7.32 3 bar 100°C için ikinci matematiksel model sonuçları	142
Şekil 7.33 3 bar 100°C için sıcaklığın zamanla değişimi.....	142

BÖLÜM 1

GİRİŞ ve AMAÇ

Özellikle tekstil ve gıda sanayinde kurutmada tasarruf edilen enerjinin kontrol altında tutulabilmesi büyük önem arz etmektedir. Tekstil sektöründe kumaşı oluşturacak olan iplik bobinlerinin kurutulması üzerine yeterli çalışma bulunmamaktadır. Tekstil sanayinde suyun uzaklaştırılması işlemi ön kurutma ve son kurutma olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir. Ön kurutma mekanik bir kurutma yöntemi olup santrifüj kurutma olarak da adlandırılır. Son kurutma ise ısı etkisiyle kurutmadır. Üründen uzaklaştırılan su kütlesi baz alındığında mekanik kurutma ısı kurutmaya göre daha az enerji gerektirir. Fakat mekanik kurutmaya arzu edilen nem içeriğine ulaşamaz ve ürün ısı kurutma işlemine tabi tutulur.

İplik bobinlerinin ısı etkisiyle kurutulması genellikle içlerinden sıcak hava geçirilerek yapılmaktadır. Bu işlemde iplik bobini içerisine gönderilen basınçlı sıcak hava, ısı etkisiyle buhar fazına geçen nemi bobinden uzaklaştırır. Ürün denge nemine ulaştığında kuruma sonlanır. Söz konusu kurutmada kuruma süreleri kurutma havasının sıcaklığına ve bağıl nemine bağlı olarak değişmektedir. Kuruma hızını etkileyen diğer faktörler arasında bobinin termofiziksel özellikleri, büyüklüğü, kurutma havasıyla temas eden yüzey alanı, gözenekliliği, kurutma havasının hızı gelmektedir.

Yapılan bu çalışmada ilk olarak iplik bobininin kuruma modeli için temel denklemler olarak difüzyon denklemi ile ısı iletim denklemi ele alınmış, farklı kurutma havası sıcaklıkları için genetik algoritma yöntemiyle bobinin nem içeriğine ve sıcaklığına bağlı olarak değişen uygun difüzyon katsayıları tespit edilmiştir. Popülasyonda bir birey bir kromozomla temsil edilmektedir. Difüzyon katsayısını oluşturan üç temel parametre bir kromozom üzerinde gösterilmek üzere popülasyon sayısı otuz olarak alınmıştır. Bu parametrelerin en uygun değerlerine yirminci nesil

sonunda ulaşılmıştır. Genetik algoritma yöntemi iplik bobinlerinin kurutulması işlemine ilk defa bu çalışmada uygulanarak bilime yenilik getirilmiştir.

Ayrıca ikinci olarak iplik bobinin kuruması sırasında bobin içi sıcaklıkları tahmin etmeyi amaçlayan ve enerji denklemini baz alan yeni bir matematiksel model ileri sürülmüştür. Bu çalışmayla iplik bobinlerinin kurutulması için bilime ışıık tutacak yeni bir matematiksel model geliştirilerek kurutmanın dolayısıyla da enerji tasarrufunun kontrol altında tutulması amaçlanmaktadır.

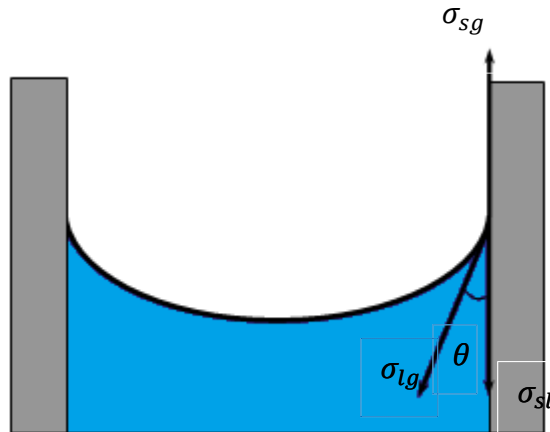
BÖLÜM 2

KURUMAYLA İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR VE KURUMA MEKANİZMASI

2.1. Kuruma Modellerinde Karşılaşılan Temel Kavramlar

2.1.1. Kapiler Basınç

Kapilarite, adezyon (iki farklı maddenin molekülleri arasındaki çekim) ve kohezyon (aynı maddenin molekülleri arasındaki çekim) kuvvetleriyle açıklanabilen bir olgudur. Gaz molekülleri arasındaki çekim sıvı molekülleri arasındaki çekime oranla daha küçüktür. Bunun sonucu olarak sıvı-gaz ara yüzünde iç taraftaki sıvıya doğru sıvı molekülleri birbirlerini çeker ve ara yüzeyde yüzey gerilimi oluşur. Benzer şekilde katı-sıvı ve katı-gaz ara yüzeylerinde de yüzey gerilimi oluşur. Sıvı yüzey eğriliği ile katı malzeme arasındaki açı temas açısı (θ) olarak adlandırılır [1].



Şekil 2.1 Temas açısı θ ve yüzeye etkiyen kuvvetler [1]

Eğer yüzeydeki kuvvetler dengedeysse aşağıdaki eşitlik geçerlidir. Söz konusu eşitlikte $\sigma(N/m)$ yüzey gerilimini, sg, sl ve lg alt indisleri ise sırasıyla katı-gaz, katı-sıvı ve sıvı-gaz ara yüzeylerini ifade etmektedir [1].

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} \cos\theta \quad (2.1)$$

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \quad (2.2)$$

Yüzey eğriliği üzerindeki basınç farkı $(P_g - P_l)$ su üzerine etki eden kuvvetten hesaplanır ve r_o tüp yarıçapı olmak üzere dairesel kesitli bir tüp için bu kuvvet aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F = 2\pi r_o \sigma \cos\theta \quad (2.3)$$

Kapiler basınç ise aşağıdaki gibi ifade edilir ve (2.4) eşitliğinden görüldüğü gibi kapiler borunun yarıçapı azaldıkça artar.

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_o} \quad (2.4)$$

r_1 ve r_2 sıvı yüzey eğrilinin iki dikey doğrultuda asal yarıçapları olmak üzere, dairesel kesitli olmayan gözeneklerde kapiler basınç için daha genel bir ifade aşağıda verilmiştir.

$$P_c = \sigma \cos\theta \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.5)$$

2.1.2. Nem İçeriği

Cismin nem içeriği kuru baza ve yaş baza göre olmak üzere iki farklı şekilde ifade edilir. Kuru baza göre nem içeriği cisim içerisindeki toplam su kütlesinin cismin kuru kütlesine oranıdır. Yaş baza göre nem içeriği ise cisim içerisindeki toplam su kütlesinin yaş cismin kütlesine oranıdır. Kuru ve yaş baza göre nem içerikleri sırasıyla denklem (2.6) ve (2.7)'de verilmiştir.

$$X = \frac{M_w}{M_d} \quad (2.6)$$

$$X_w = \frac{M_w}{M_t} \quad (2.7)$$

Her iki nem içeriği arasındaki ilişki ise (2.8) eşitliğinde verilmiştir.

$$X = \frac{X_w}{1 - X_w} \quad (2.8)$$

2.1.3. Nem Oranı

Nem oranı bir diğer ifadeyle boyutsuz nem içeriği (2.9) eşitliğinde verildiği gibidir. Bu eşitlikte X cismin söz konusu andaki nem içeriğini, X_i başlangıçtaki nem içeriğini, X_e ise denge nem içeriğini ifade etmektedir [1].

$$mr = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (2.9)$$

2.1.4. Denge Nem İçeriği

Sıcaklığı ve bağıl nemi değişmeyen hava akımına maruz ıslak bir malzeme bu ortamda belirli bir süre bekletilirse denge nemi olarak adlandırılan belirli bir nem değerine ulaşır. Belirli bir malzemenin denge nemini etkileyen parametreler ortam havasının sıcaklığı ve bağıl nemidir. Belirli şartlar atındaki ortama bırakılan malzeme, söz konusu ortam koşullarına karşılık gelen denge neminden daha az nem içeriyorsa denge nemine ulaşana kadar bünyesine nem alır [1].

Teorik, ampirik ve yarı-ampirik olmak üzere denge nemi için geliştirilen birçok model mevcuttur [1]. Tekstil fiberleri için literatürde kullanılan üç model aşağıda verilmiştir [2]. Söz konusu modellerde T , Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı, RH ise ortam havasının bağıl neminin ifade etmektedir. Literatürde denge nem içeriği m_e ya da X_e sembolüyle gösterilir.

Luikov modeli:

$$X_e = A_1 / \left(1 + A_2 T \ln \left(\frac{1}{RH} \right) \right) \quad (2.10)$$

Henderson modeli:

$$X_e = A_1 \left(\frac{1}{T} \ln \left(\frac{1}{1 - RH} \right) \right)^{A_2} \quad (2.11)$$

Halsey modeli:

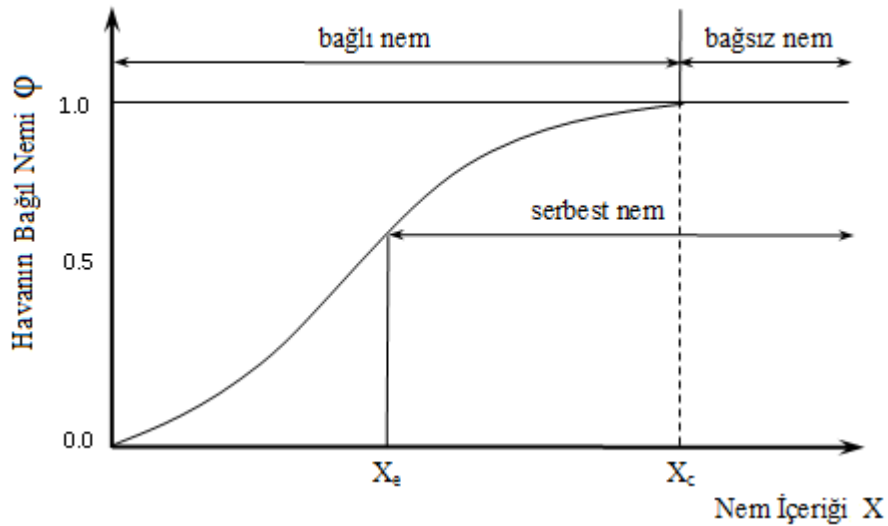
$$X_e = A_1 \left(T \ln \left(\frac{1}{RH} \right) \right)^{-A_2} \quad (2.12)$$

Söz konusu modellerdeki A_1 ve A_2 katsayıları tekstil fiberinin türüne göre belirlenmekte olup doğal yün fiberleri için en uygun katsayılar Tablo 2.1’de sunulmuştur [2].

Tablo 2.1 Doğal yün fiberleri için model sonuçları

Model	R^2	A_1	A_2
Luikov	0.99	0.26	0.261
Henderson	0.99	2.38	0.481
Halsey	0.94	0.90	0.378

2.1.5. Bağlı Nem, Bağısız Nem ve Serbest Nem



Şekil 2.2 Kurumadaki nem türleri [1]

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi denge halindeki nem içeriği eğrisinin havanın %100 bağıl nem eğrisiyle çakıştığı yere kadar olan nem bağlı nem olarak adlandırılır. Cisim içerisindeki bağlı nemin buhar basıncı, aynı sıcaklıktaki sıvı suyun buhar basıncından daha düşüktür. Malzeme söz konusu eğrinin %100 bağıl nem eğrisiyle kesiştiği noktadan daha fazla nem içeriyorsa, bu nem bağısız nem olarak adlandırılır ve söz konusu nemin uyguladığı buhar basıncı aynı sıcaklıktaki saf sıvının buhar basıncıyla aynıdır. Serbest nem ise denge nem içeriğinin üzerindeki nem olup kurutmayla uzaklaştırılabilecek nemdir [1].

2.1.6. Buharlaşma Entalpisi

Sabit sıcaklıkta maddeyi sıvı fazından buhar fazına geçirmek için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanan buharlaşma entalpisi, nemli bir cismin kurutulması söz konusu olduğunda serbest suyu buharlaştırmak için gerekenden biraz fazladır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü nemli cisim içerisinde su kısmen cisim tarafından tutulmaktadır. Cismin nem içeriği azaldıkça gözeneklerin dibindeki suyu buharlaştırmak için daha fazla enerji gerekmektedir. Buharlaşma entalpisi sıcaklık arttıkça azalır [1].

Tezde %65 yün, %35 orlondan oluşan ipliğin kurutulması incelendiğinden, geliştirilen modellerde buharlaşma entalpisi yerine aşağıda ve A. K. HAGHI'nin çalışmasında verilen bağıntılar kullanılmıştır. (2.13) eşitliğinde verilen W_c ifadesi kumaşın fiberleri içerisindeki nem içeriğini ifade etmektedir ve fiberlerin içerisindeki su buharı konsantrasyonunun fiberlerin yoğunluğuna oranı olup boyutsuz bir büyüklüktür [3].

$$\Delta H_{yün} = 1602.5 \exp(-11.72W_c) + 2522 \text{ (kJ/kg)} \quad (2.13)$$

$$\Delta H_{orlon} = 2522 \text{ (kJ/kg)} \quad (2.14)$$

$$W_c = C_f / \rho \quad (2.15)$$

2.1.7. Difüzyon Gücü

Gözenekli ortamdaki difüzyon katsayısının ortamın gözenekli olmadığı durumdaki difüzyon katsayısına oranı difüzyon gücü olarak tanımlanır. Difüzyon gücü birden küçük bir değer alır [1].

$$Q_{dif} = D_{eff} / D \quad (2.16)$$

2.1.8. Gözeneklilik

Gözenekli malzemenin gözenekliliği malzeme içerisindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranıdır. Malzemenin efektif özelliklerini etkileyen önemli bir parametre olan gözeneklilik, gaz genişleme yöntemi, optik yöntem gibi doğrudan yöntemlerle ölçülebilir [1]. Tablo 2.1'de çeşitli maddelerin gözeneklilikleri verilmiştir [4].

$$\varepsilon = \frac{V_{boşluk}}{V_{toplam}} \quad (2.17)$$

Tablo 2.2 Maddelerin gözeneklilikleri [4]

Madde	Gözeneklilik
Metal köpük	0.98
Cam yünü	0.88-0.93
Kıvrımlı tel	0.68-0.76
Silika taneleri	0.65
Siyah damtaşı tozu	0.57-0.66
Raschig burçları	0.56-0.65
Deri	0.56-0.59
Katalizör (Fischer-Tropsch, sadece granüller)	0.45
Tanecikli kırma taş	0.44-0.45
Toprak	0.43-0.54
Kum	0.37-0.50
Silika tozu	0.37-0.49
Sigara filtreleri	0.17-0.49
Tuğla	0.12-0.34
Kum taşı (yağlı kum)	0.08-0.38
Kireç taşı, dolomit	0.04-0.10
Kömür	0.02-0.12
Beton (normal karıştırılmış)	0.02-0.07

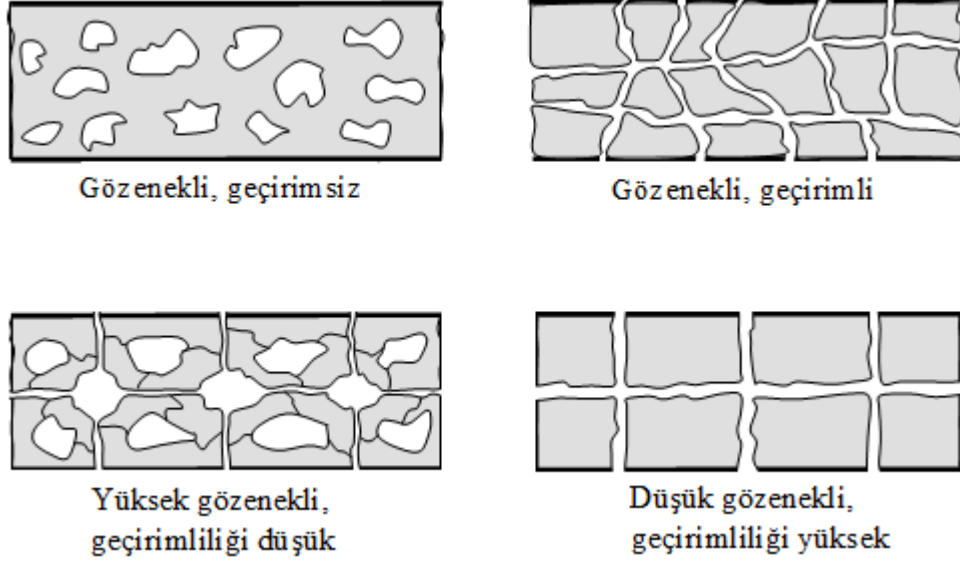
2.1.9. Geçirgenlik

Darcy kanununa $(-\Delta P = \frac{\mu}{K} u_D)$ göre geçirgenlik, gözenekli ortamın katı matrisinin akış iletkenliğinin bir ölçüsüdür [4]. Diğer yandan geçirgenlik gözenekli ortam içerisinden akan akışkana bağlı olmayıp gözenekli ortamın malzeme yapısına bağlı bir özelliğidir [1]. Tablo 2.2’de bazı katı matrislerin geçirgenlikleri verilmiştir.

Tablo 2.3 Malzemelerin katı matrislerinin geçirgenlik değerleri [4]

Matris	Geçirgenlik (m²)
Kum taşı (yağlı kum)	$5.0 \cdot 10^{-16} - 3.0 \cdot 10^{-12}$
Tuğla	$4.8 \cdot 10^{-15} - 2.2 \cdot 10^{-13}$
Kireç taşı, dolomit	$2.0 \cdot 10^{-15} - 4.5 \cdot 10^{-14}$
Deri	$9.5 \cdot 10^{-14} - 1.2 \cdot 10^{-13}$
Siyah damtaşı tozu	$4.9 \cdot 10^{-14} - 1.2 \cdot 10^{-13}$
Deniz yosunu	$2.0 \cdot 10^{-14} - 4.4 \cdot 10^{-13}$
Silika tozu	$1.3 \cdot 10^{-14} - 5.1 \cdot 10^{-14}$
Toprak	$2.9 \cdot 10^{-13} - 1.4 \cdot 10^{-11}$
Bitümlü beton	$1.0 \cdot 10^{-13} - 2.3 \cdot 10^{-11}$
Cam yünü	$2.4 \cdot 10^{-11} - 5.1 \cdot 10^{-11}$
Kum (gevşek)	$2.0 \cdot 10^{-11} - 1.8 \cdot 10^{-10}$
Keçe	$8.3 \cdot 10^{-10} - 1.2 \cdot 10^{-9}$
Mantar levha	$3.3 \cdot 10^{-10} - 1.5 \cdot 10^{-9}$
Kıvrımlı tel	$3.8 \cdot 10^{-9} - 1.0 \cdot 10^{-8}$
Sigara	$1.1 \cdot 10^{-9}$

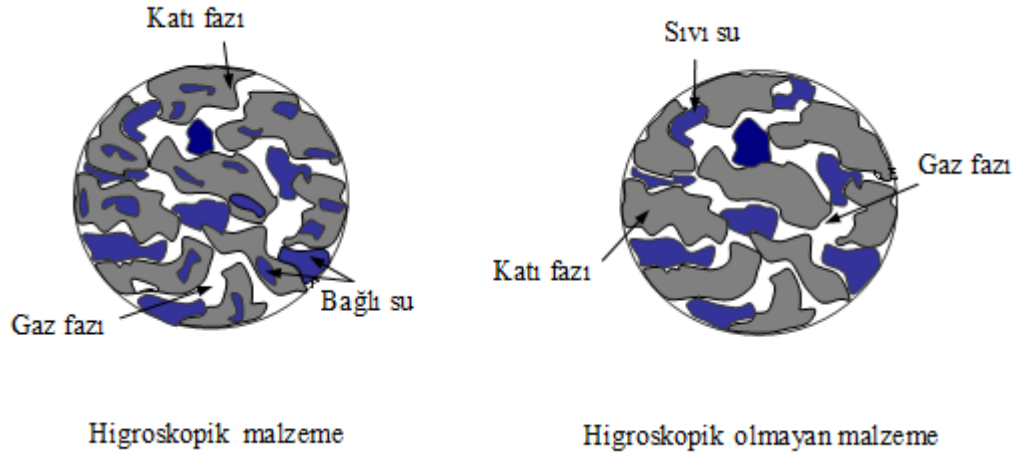
Gözenekli malzemelerin gözeneklilik ve geçirgenlik türleri Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Gözeneklilik ve geçirgenlik [4]

2.1.10. Higroskopik ve Higroskopik Olmayan Malzemeler

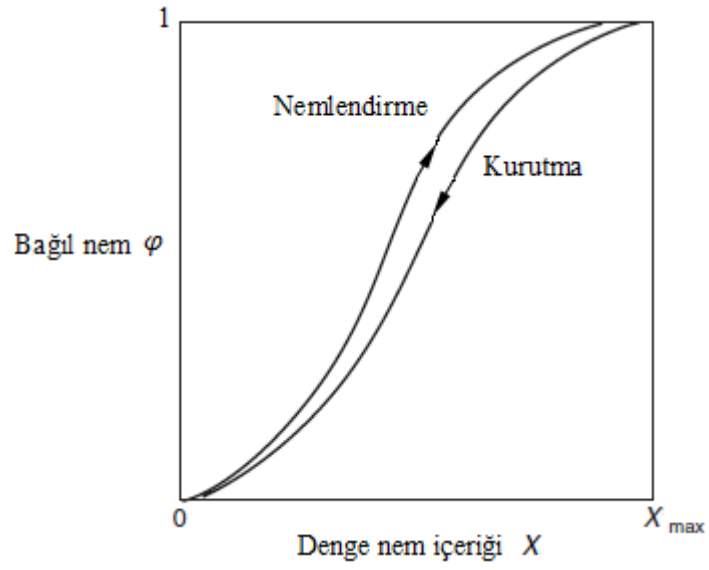
Higroskopiklik malzemenin kendiliğinden nem tutabilme kabiliyetidir. Bir diğer ifadeyle eğer malzeme ortam havasındaki nem durumuna göre kendi nem içeriğini ayarlayabiliyorsa higroskopik olarak adlandırılır [5]. Higroskopik olmayan malzemelerde, malzeme tamamen doymuş ise tüm gözenekler sıvı doludur, şayet malzeme tamamen kuru ise tüm gözenekler havayla doludur. Higroskopik malzemeler yüksek miktarda fiziksel bağlı su içerirken, higroskopik olmayan malzemelerdeki bağlı nem içeriği oldukça düşüktür [1].



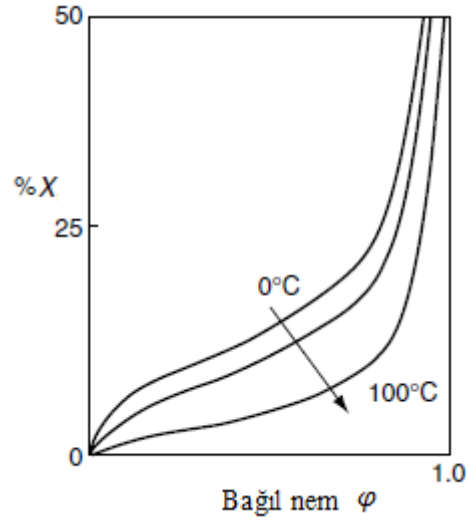
Şekil 2.4 Higroskopik ve higroskopik olmayan malzemeler [1]

2.1.11. Sorpsiyon İzotermeleri

Sorpsiyon izotermeleri malzemenin su tutma davranışının grafiksel gösterimi olup, belirli bir sıcaklıkta malzemenin denge nem içeriğiyle su aktivitesi arasındaki ilişkiyi verir. Su aktivitesi ise malzeme içerisindeki suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranı olup sıcaklık ve buhar basınç dengeleri elde edildiğinde malzemenin su aktivitesi çevre havanın bağıl nemine eşit olur [1].



Şekil 2.5. Higroskopik bir malzeme için nemlendirme ve kurutma izotermi [6]

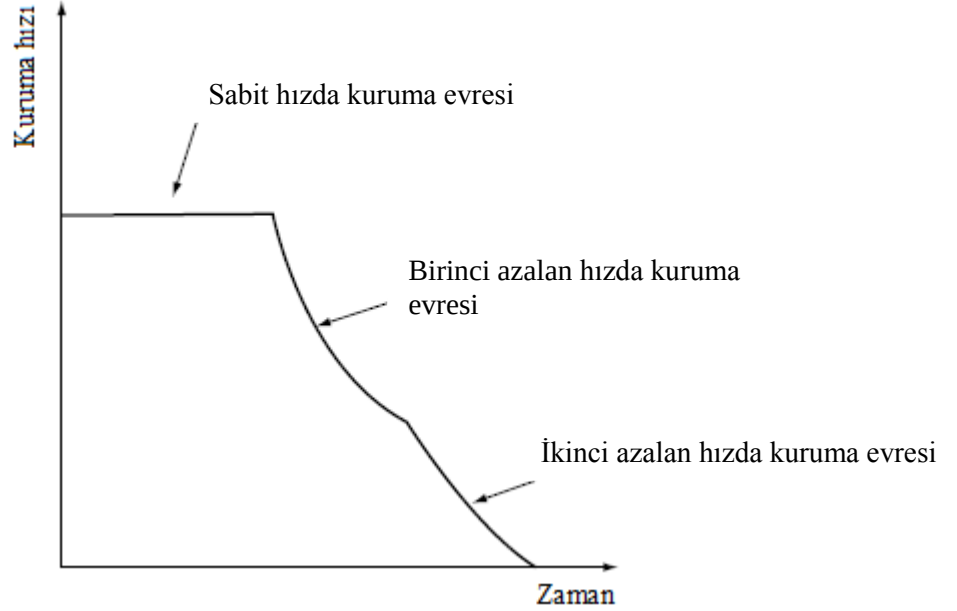


Şekil 2.6. Sorpsiyon izotermi sıcaklıkla değişimi [6]

Gözeneklerdeki sıvının nemlendirme sırasında artması veya kurutma sırasında azalması sonucunda kapiler sıvı hareketi farklı olduğundan, nemlendirme ve kurutma durumundaki sorpsiyon izotermi birbirinden farklıdır. Şekil 2.6'dan da görüldüğü üzere, sıcaklık arttıkça sorpsiyon izotermi aşağıya doğru kaymaktadır [5].

2.2. Kuruma Mekanizması

2.2.1. Kurumanın Evreleri



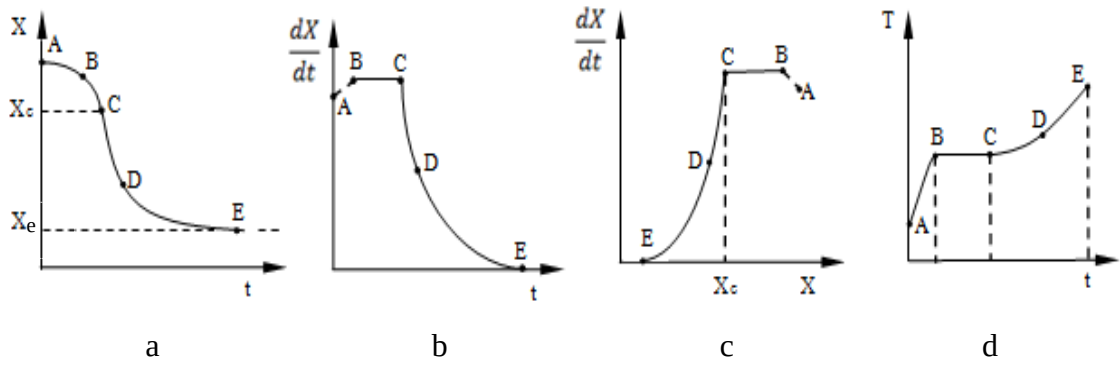
Şekil 2.7 Sabit kurutma şartlarında tipik kuruma eğrisi [6]

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi higroskopik bir malzemenin kuruma davranışı genellikle üç evreden oluşmaktadır. Kurumanın ilk evresinde malzeme yüzeyinde serbest nem vardır, buharlaşma yüzeyden olur ve bu evrede kuruma hızı sabittir. Kurumanın bu evresinde kurumayı modelleyen fiziksel olay hava-nem ara yüzeyinde su buharının difüzyonudur. Sabit hızda kuruma evresinin sonuna doğru kapiler kuvvetler etkin hale gelir ve malzeme içerisindeki nem kapiler kuvvetlerin yardımıyla yüzeye çekilir. Ortalama nem içeriği kritik değerine ulaştığında yüzeydeki nem filmi azalır ve yüzeyde kuru bölgeler oluşur. Bu aşamada azalan hızda kuruma evresi olarak adlandırılan ikinci kuruma evresine girilir. Bu evre yüzeydeki sıvı filmi tamamen buharlaşana kadar devam eder [6].

Kurumanın ileriki aşamalarında nem transferini gerçekleştiren fiziksel olay yüzey ve derin kısımlar arasındaki nem konsantrasyon gradyanıdır. Kuruma, malzeme içerisindeki nemin yüzeye difüzyonuyla, yüzeyden ise kütle transferiyle olur. Bu esnada malzeme içerisinde emilmiş olan bağlı nemin bir kısmı uzaklaştırılır. Malzeme

içerisinde nem konsantrasyonu azaldıkça malzeme içerisindeki nemin ilerleme hızı düşer. Daha sonra kuruma hızı öncekinden daha hızlı düşmeye başlar ve uygun denge nemine ulaşıldığında kuruma sonlanır [6].

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi A-B ısıtma evresini, B-C sabit hızda kuruma evresini, C kritik nem içeriğini, C-D birinci azalan hızda kuruma evresini, D-E ikinci azalan hızda kuruma evresini göstermektedir. Kurumanın başlangıcında daimi rejime girene kadar sıcaklık kendini ayarlar. Bu süreç çok kısa olduğundan genellikle ihmal edilir. Sabit hızda kuruma evresinde yaş katının yüzey sıcaklığı kurutma havasının yaş termometre sıcaklığındadır. Azalan hızda kuruma evresinde yüzey sıcaklığı artmaya başlar [1].



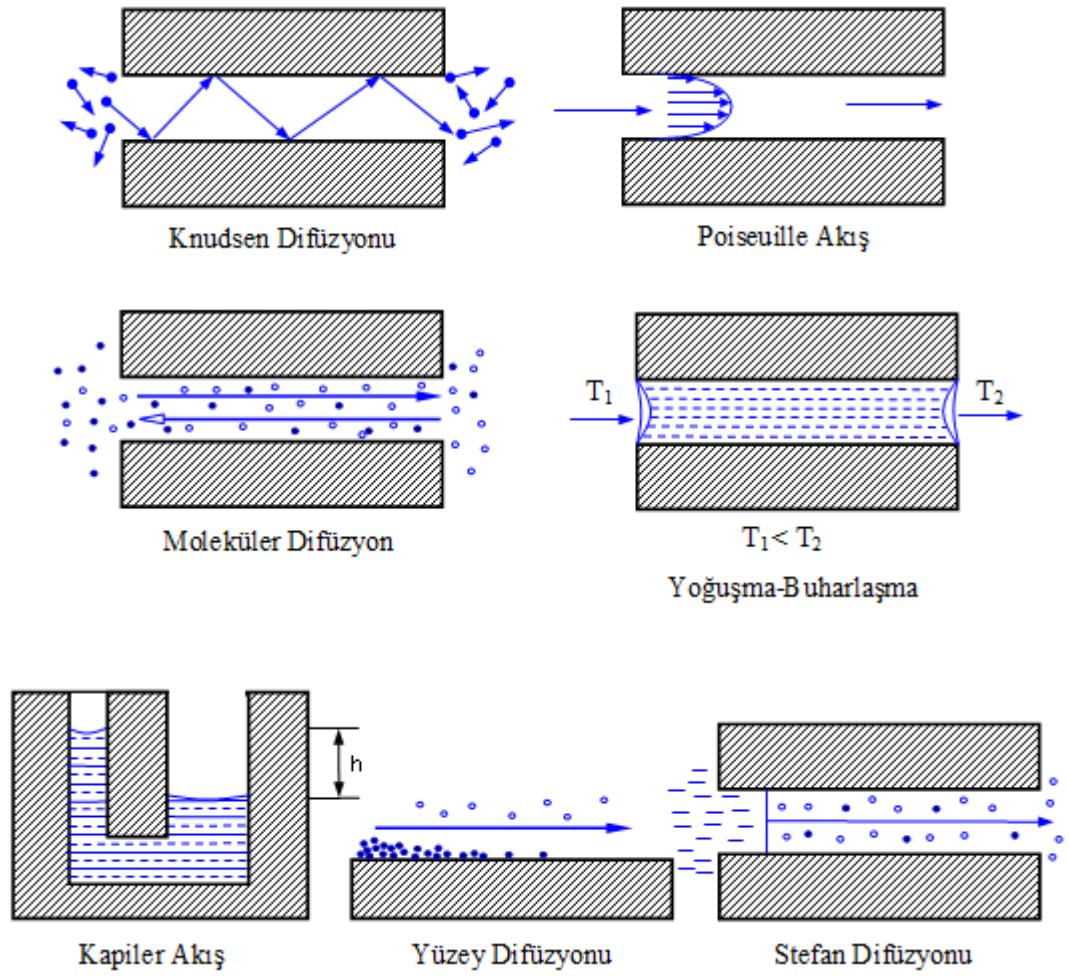
Şekil 2.8 Higroskopik malzeme için karakteristik kuruma, kuruma hızı ve sıcaklık eğrileri [1]

2.2.2. Gözenekli Ortamda Aktarım Mekanizmaları

Gözenekli ortamlarda ısı ve kütle geçişi farklı mekanizmaların etkisiyle olmaktadır. Kuruma bu mekanizmaların birkaçını aynı anda içerir. Etkin kuruma mekanizması, nem içeriği fazla olan malzemelerde kapiler akış iken, düşük nem içerikli malzemelerde buhar difüzyonudur. Bazı durumlarda ise önemli miktarda buharlaşma ve basınç artışı görülür ki bu gibi durumlarda etkin kütle transfer mekanizması hidrodinamik akış olabilir [1].

Tablo 2.4 Gözenekli ortamdaki ısı ve kütle transfer mekanizmaları [1]

	Transfer Mekanizması	Etken Parametre
Gaz Transferi	Knudsen Difüzyonu	konsantrasyon veya basınç
	Kayma Akışı	toplam basınç
	Poiseuille Akış	toplam basınç, yerçekimi
	Moleküler Difüzyon	konsantrasyon veya kısmi basınç
	Stefan Difüzyonu	kısmi basınç
	Yoğuşma-Buharlaşma	sıcaklık, ...
Sıvı Transferi	Moleküler Difüzyon	konsantrasyon
	Kapiler Akış	kapiler kuvvet
	Yüzey Difüzyonu	konsantrasyon
	Hidrodinamik Akış	toplam basınç, yerçekimi
Isı Transferi	Isı İletimi	sıcaklık
	Isı Radyasyonu	sıcaklığın 4. kuvveti
	Hava Akışı	toplam basınç, yoğunluk farkı
	Entalpi Akışı	nem hareketi



Şekil 2.9 Gözenekli ortamda çeşitli kütle transfer mekanizmaları [1]

Şekil 2.9'da gözenekli ortamda görülen çeşitli kütle transfer mekanizmalarının şematik gösterimi verilmiştir.

BÖLÜM 3

İPLİK BOBİNLERİNİN KURUTULMASI

3.1. Nemin İplikte Bulunma Şekilleri

Genel olarak su tekstil ürününde damlayan su, yüzey suyu, kapiler su, şişme su ve higroskopik su olmak üzere beş farklı şekilde bulunur. Bu sınıflandırma suyun iplikte bulunduğu yer ve ipliğe bağlılık durumu baz alınarak yapılmaktadır. Damlayan su, yüzey suyu ile kapiler suyun bir kısmı mekanik kurutmaya uzaklaştırılabilirken, şişme suyu iplikten uzaklaştırabilmek için ısı kurutmaya ihtiyaç vardır [5].

i) Damlayan su: Damlayan su, ipliğin liflerine bağlı olmayıp kendi ağırlığının etkisiyle aşağı doğru akarak üründen uzaklaşır.

ii) Yüzey suyu: İpliklerin yüzeyine çekim kuvvetleriyle bağlı olan nemdir.

iii) Kapiler su: İplik liflerinin yüzeyine çekim kuvvetleriyle bağlı olan nemdir.

iv) Şişme suyu: Liflerin içerisindeki boşluklarda (miseller arasında) yer alıp liflerin şişmesine neden olmaktadır. Lif moleküllerine kimyasal bağlarla bağlı olduğundan ancak ısı kurutmaya üründen uzaklaştırılabilir.

v) Higroskopik su: Nem suyu olarak da adlandırılan higroskopik su, şişme suyu gibi liflerin içerisindeki boşluklarda bulunur. Tekstil ürünü higroskopik suyunu kaybederse tutumu bozulur. Higroskopik suyunu kaybeden lifler bir daha aynı miktarda nemi higroskopik olarak alamayacağından kurutma sonunda bu suyun liflerde kalması sağlanmalıdır. Bu da kurutmada modellemenin önemini vurgulayan bir diğer unsurdur [7].

3.2. Bobinin Kurutulmasında Kullanılan Yöntemler

Tekstilde nemli ürünün kurutulması ön kurutma ve esas kurutma olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ön kurutma mekanik bir kurutma yöntemidir, esas kurutmaya göre daha ekonomik olmakla birlikte, ürünün istenen nem değerine ulaşması için esas kurutma şarttır. Yalnız dikkat edilmesi gerekli bir diğer husus ise esas kurutma sırasında üründen higroskopik nemin uzaklaştırılmaması gerektiğidir [8]. Bobinler için ön kurutma yöntemi santrifüj etkisiyle kurutma, yaygın kullanılan esas kurutma yöntemleri ise basınçlı sıcak hava etkisiyle kurutma ve radyo frekanslı kurutmadır.

3.2.1. Santrifüj Etkisiyle Kurutma

Dönme sonucu oluşan merkezkaç etkisiyle bobinin içindeki nemi uzaklaştırmayı amaçlayan mekanik kurutma yöntemidir. Şekil 3.1’de iki sıkma haznesinden oluşan bir santrifüj bobin sıkma makinesi görülmektedir.

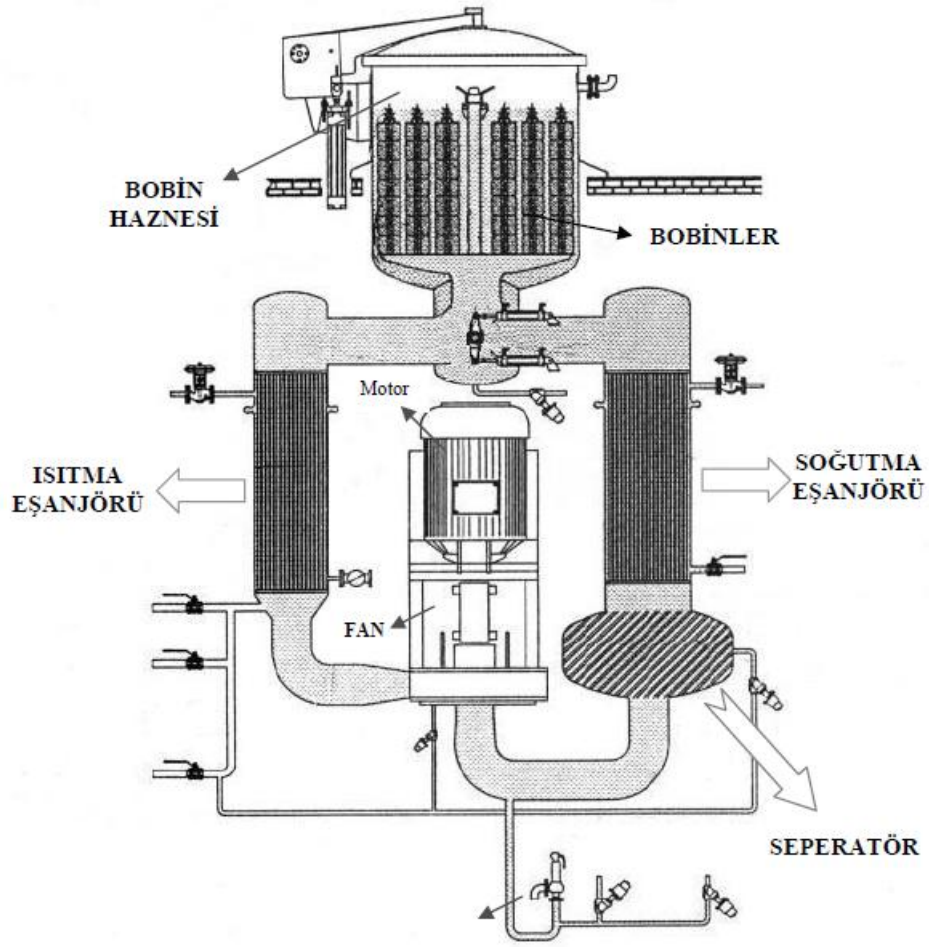


Şekil 3.1 Santrifüj bobin sıkma makinesi [9]

Mekanik kurutma yöntemi esas kurutma yöntemine göre daha ekonomiktir. Fakat uzaklaştırılması istenen nemin hepsini bu yöntemle uzaklaştırmak olanaksız olduğundan santrifüj kuruma işleminden sonra bobinlerin esas kurutmaya alınması gerekmektedir.

3.2.2. Basınçlı Sıcak Hava Etkisiyle Kurutma

Şekil 3.2’de gösterilen bobin kurutma makinesinin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: Fandan geçen ve basıncı artan hava ısıtma eşanjöründen geçtikten sonra bobin haznesine gönderilir. Basınçlı sıcak hava etkisiyle bobinlerin kurutulması sağlanır. Tekstil sanayinde genelde kurutma, basınçlı sıcak havanın bir süre bobinlerin dışından içine, bir süre de içinden dışına geçirilmesiyle sağlanır. Sıcak ve kuru hava nemli bobin içerisinden geçerken bobin içerisindeki nemin bir kısmını buharlaştırarak bünyesine alır, böylece bobini terk eden havanın bağıl nemi artar. Bobin haznesini terk eden hava sırasıyla soğutma eşanjörü ve seperatörden geçirilerek neminden arındırılır. Havanın tekrar fana gelmesiyle çevrim tamamlanmış olur. Kurutmanın ileri aşamalarında özgül nemi artan kurutma havası deşarj edilmek suretiyle, makineye ortamdan taze hava alınır.



Şekil 3.2 Basınçlı kurutucunun şematik görünüşü [5]

Tekstil sanayinde Şekil 3.3'te görüldüğü gibi ön sıkma işlemi de yapan basınçlı kurutma makineleri mevcut olup, bu tür makineler ek bir santrifüj makinesine olan gereksinimi ortadan kaldırmaktadır [10].



Şekil 3.3 Basınçlı bobin kurutma makinesi [10]

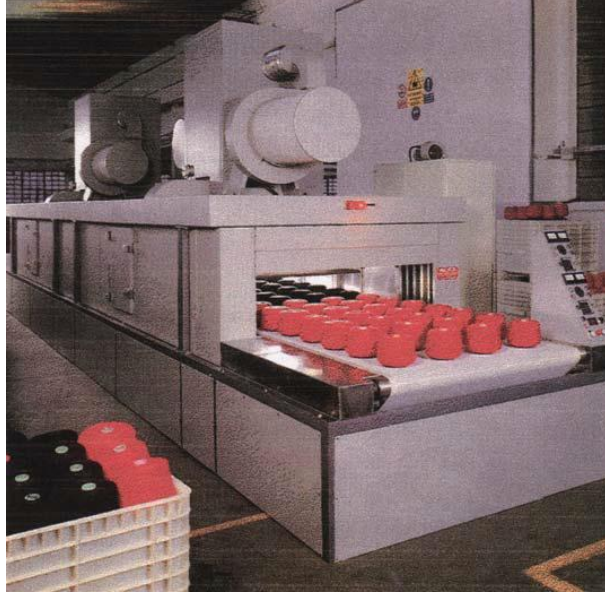
3.2.3. Radyo Frekanslı Kurutma

Temel olarak rejeneratör, kurutma odası, soğutma fanı ve kontrol panelinden oluşan radyo frekanslı kurutma makinesinin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: Nemi alınmak istenen ürün yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki kondansatör levhası arasına konur. Levhaların yükü değiştirilmekte, bu esnada yerleşme şekli değişen su molekülleri sürtünmekte ve ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan ısı ürün içerisindeki suyu buharlaştırmaktadır. Radyo frekanslı kurutmaya ürünün üniform kuruması sağlanmaktadır. Diğer yandan bu tip kurutmada kurutma süresi diğer esas kurutma yöntemlerine göre daha kısadır. Bu da kurutma veriminin ve ürün kalitesinin artmasına sebebiyet vermektedir [5, 8].

Şekil 3.4'te bobinlerin kurutma kabini içerisindeki elektrotlarla temas ederek ısıtıldığı, Şekil 3.5'te ise böyle bir temasın olmadığı, bobinlerin taşıma bandı üzerinde taşındığı bir radyo frekanslı kurutucu görülmektedir.



Şekil 3.4 Radyo frekanslı kurutma makinesi [8]



Şekil 3.5 Taşıma bantlı radyo frekanslı kurutucu [8]

BÖLÜM 4

LİTERATÜRDEKİ BAZI KURUMA MODELLERİ

4.1. Akışkan Yatakta Polenin Kuruma Moldeli

Akışkan yatakta polenin kurutulmasına ait bu model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [11].

- Parçacıklar küreseldir.
- Parçacığın yüzeyindeki nem içeriği daima dış havayla dengededir.
- Herhangi bir anda katı, kurutma havasıyla ısı dengededir.
- Dış kütle transfer direnci ihmal edilmiştir.
- İç ısı transfer direnci ihmal edilmiştir.
- Hava ideal gaz gibi düşünülebilir.

Kurutucu için daimi olmayan nem kütle dengesi (4.1) eşitliğinde verilmiştir.

$$m_s \frac{d\bar{M}}{dt} = -\dot{G}(Y - Y_1) \quad (4.1)$$

Başlangıç şartı:

$$t = 0; \quad 0 \leq r \leq r_s; \quad M = \bar{M} \quad (4.2)$$

$\bar{M}$: Ortalama nem içeriği (kg nem/kg kuru katı)

m_s : Katı kısmın kütlesi (kg)

$\dot{G}$: Kuru hava akısı (kg/s)

Y : Havanın özgül nemi (kg nem/ kg kuru hava)

Y_1 : Havanın girişteki özgül nemi (kg nem/ kg kuru hava)

r_s : Polenin yarıçapı (m)

Difüzyon denklemi (4.3) eşitliğinde verilmiştir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{eff} \left(r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) \right] \quad (4.3)$$

Başlangıç şartı:

$$t = 0; \quad 0 \leq r \leq r_s; \quad M = M_o \quad (4.4)$$

Sınır şartları:

$$t > 0; \quad r = r_s; \quad M = M_{eq} \quad (4.5)$$

$$t \geq 0; \quad r = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (4.6)$$

M : Katı nem içeriği (kg nem/kg kuru katı)

D_{eff} : Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s)

M_o : Başlangıç nem içeriği (kg nem/kg kuru katı)

M_{eq} : Denge nem içeriği (kg nem/kg kuru katı)

Kurutucu için enerji dengesi (4.7) eşitliğinde verilmiştir.

$$\dot{G}(Y - Y_1)\Delta H + m_s(c_s + \bar{M}c_{su}) \frac{dT}{dt} = \dot{G}(c_{pA} + Y_1c_{pB})(T_1 - T) \quad (4.7)$$

Başlangıç şartı:

$$t = 0; \quad T = T_i \quad (4.8)$$

Sınır şartı:

$$t > 0; \quad r = r_s; \quad \left[-\frac{\partial M}{\partial r} \right] = \frac{\overbrace{\dot{G}(Y - Y_1) V_s}^{\dot{m}_v}}{m_s D_{eff} A_s} \quad (4.9)$$

Yüzeydeki sınır şartının temeli (4.10) eşitliğine dayanmaktadır.

$$\underbrace{-D_{eff} A_s \frac{\partial m_{su}}{\partial r}}_{\substack{A_s \text{ yüzeyine} \\ \text{difüzyonla gelen} \\ \text{su miktarı}}} = \underbrace{\dot{m}_v V_s}_{\substack{V_s \text{ hacimli parçacıktan} \\ \text{birim zamanda} \\ \text{buharlaşan su miktarı}}} \quad (4.10)$$

T_i : İlk haldeki sıcaklık (K)

T_1 : Havanın girişteki sıcaklığı (K)

$\dot{G}(Y - Y_1)\Delta H$: Sıvı fazdan buhar fazına geçen suyun taşıdığı enerji (kurutma havasının kazandığı gizli ısı)

$m_s(c_s + \bar{M}c_{su}) \frac{dT}{dt}$: Sıcaklık farkı nedeniyle katının ve katı içerisindeki suyun kazandığı enerji (duyulur ısı)

$\dot{G}(c_{pA} + Y_1 c_{pB})(T_1 - T)$: Kurutma havasının kaybettiği duyulur ısı

T_1 sıcaklığında ve Y_1 mutlak nemindeki kurutma havasının kurutma işlemi süresince sıcaklığı azalmakta, buna karşılık mutlak nemi artmaktadır.

Parçacığın ortalama nem içeriği:

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V_s} \int_0^{r_s} r^2 M(r, t) dr \quad (4.11)$$

İdeal gaz davranışı varsayımıyla havanın mutlak nemi:

$$Y = \frac{0.622 P_v f}{(P - P_v f)} \quad (4.12)$$

f : Suyun aktivitesi

Desorpsiyon-buharlaştırma ısısı:

$$\Delta H = \frac{R_u T^2}{P_v} \left(\frac{\partial P_v}{\partial T} \right) + \frac{R_u T^2}{f} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \quad (4.13)$$

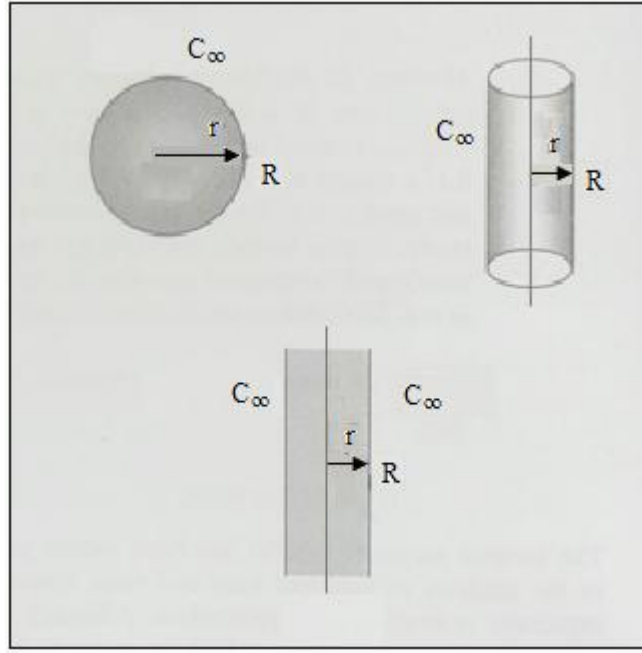
Çalışmada polenin ısı kapasitesi için uygun ifade literatürden alınmış, suyun aktivitesi ve difüzyon katsayısı için uygun bağıntılar saptanmıştır. Uygun sınır ve başlangıç şartları için temel diferansiyel denklemler çözülmüştür. Çözümde sonlu farklar tekniğinden yararlanılmıştır. Deneylerden elde edilen ortalama nem içeriğinin, modelden elde edilen sıcaklık ve ortalama nem içeriğinin, zamana bağlı değişimi elde edilmiştir. Model sonuçlarının deney sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

4.2. Katıların Daimi Olmayan Rejimde Dehidrasyonu için Modifiye Edilmiş Lumped (Sıçrayış) Modeli

Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [12].

- Cisim için izotermal şartlar geçerlidir.
- Kütle geçişi bir boyutludur.
- Efektif difüzyon katsayısı D_{eff} sıcaklığa bağlı değildir.

Basit bir sıçrayış modeli sadece, sıvı direncine kıyasla katı direncinin ihmal edilebildiği çok küçük kütle Biot sayıları için geçerlidir. Bu durumda katının nem konsantrasyonu konumdan bağımsız olup yalnızca zamanın fonksiyonu olur. Bu şart Biot sayısının 0.1'den küçük olduğu durumlar için geçerlidir.



Şekil 4.1 Modelde incelenen geometriler

Levha, sonsuz silindir ve kürenin izotermal şartlar altında, daimi olmayan, bir boyutlu dehidrasyonu aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilir. Levha için $m = 0$, silindir için $m = 1$, küre için $m = 2$ alınır.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^m \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (4.14)$$

Uygun boyutsuz büyüklükler kullanılarak difüzyon denklemi boyutsuzlaştırılmış ve aşağıdaki formu almıştır.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{1}{x^m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (4.15)$$

Metod, zamana bağlı katsayılarla uygun polinomun seçilmesi ve kısmi diferansiyel denklemin integral denkleme dönüştürülmesi olmak üzere iki adımdan oluşur.

Birinci adım: Parabolik kısmi diferansiyel denklemin doğası gereği, bağımlı değişken için düzgün seri yaklaşımı en iyisidir.

$$\varphi = a_0(\tau) + a_1(\tau)x + a_2(\tau)x^2 \quad (4.16)$$

İkinci adım: Levha, sonsuz silindir ve küre için ortalama boyutsuz konsantrasyon aşağıdaki gibidir.

$$\bar{\varphi} = \frac{\int_V \varphi dV}{\int dV} = (m+1) \int_0^1 x^m \varphi dx \quad (4.17)$$

(4.16) eşitliğine uygun sınır şartı uygulanıp sadeleştikten ve (4.17) içerisine yerleştirip integralinin alınmasından sonra ortalama boyutsuz konsantrasyon aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\bar{\varphi} = a_0 + \frac{m+1}{m+3} a_2 \quad (4.18)$$

$$\int_0^1 x^m \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} dx = \int_0^1 \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dx \quad (4.19)$$

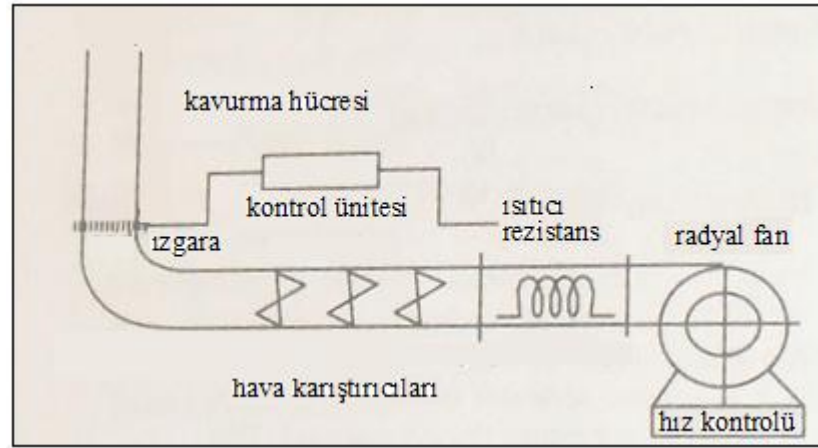
Boyutsuz difüzyon denklemi (4.19) eşitliğindeki gibi integre edilmiştir. Buradan uygun sınır şartları ve yerine koymalarla elde edilen, bağımlı değişkenin boyutsuz ortalama nem içeriği bağımsız değişkenin ise boyutsuz zaman olduğu (4.20) adi diferansiyel denkleminin çözülmesiyle boyutsuz olarak ortalama nem içeriğinin zamana bağlı ifadesi (4.21)'deki gibi elde edilmiştir. Burada Bi kütle Biot sayısını, Fo ise Fourier sayısını göstermektedir.

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \tau} = - \frac{B(m+1)(m+3)}{m+B+3} \bar{\varphi} \quad (4.20)$$

$$\bar{\varphi} = \exp \left\{ - \frac{1}{\frac{(m+1)}{(m+3)} Bi + 1} Bi Fo \right\} \quad (4.21)$$

4.3. Kahve Çekirdeğinin Kuruma Modeli

Izgara kısmında hava hızının ve sıcaklığının homojen olduğu makinenin şematik resmi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Kahvenin kavrulduğu makine

Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [13].

- Kavurma sırasında su üretimi ihmal edilmiştir.
- Suyun difüzyon katsayısı üniformdur ve zamana bağlı değişmez.
- Isı ve kütle geçişi bir boyutludur.
- Kahve çekirdeği küreseldir.
- Hava debisinin buharlaştırılacak su miktarına nazaran çok büyük olması nedeniyle kurutmanın, havanın nemliliği üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.

Kahve çekirdeğinin nem içeriği aşağıdaki denklemle modellenmiştir.

$$\frac{\partial X_b(r, t)}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 X_b}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X_b}{\partial r} \right] \quad 0 \leq r \leq R_b \quad (4.22)$$

Kahve çekirdeği için ısı dengesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial T_b(r, t)}{\partial t} = \frac{k_b \left[\frac{\partial^2 T_b}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_b}{\partial r} \right]}{\rho_{dm}(c_{dm} + X_b c_{su})} \quad 0 \leq r \leq R_b \quad (4.23)$$

c_{dm} : Kuru maddenin özgül ısısı (J/ kg K)

c_{su} : Suyun özgül ısısı (J/ kg K)

ρ_{dm} : Kuru maddenin yoğunluğu (kg/m³)

Bu modelde kahve çekirdeği yüzeyindeki sınır şartları aşağıdaki gibi tanımlanmış olup kahve çekirdeği yüzeyinden olan ısı taşınımı da hesaba katılmıştır.

$$r = R_b \quad , \quad - D_{eff} \rho_b \frac{\partial X_b}{\partial r} = k_m (C_s - C_a) \quad (4.24)$$

$$r = R_b \quad , \quad -k_b \frac{\partial T_b}{\partial r} = h_{ba}(T_b - T_a) + k_m(C_s - C_a)\Delta H \quad (4.25)$$

k_m : Suyun kütle transfer katsayısı (m/s)

C_s : Çekirdek yüzeyindeki buhar konsantrasyonu (kg/m³)

C_a : Havadaki buhar konsantrasyonu (kg/m³)

h_{ba} : Çekirdek hava arasındaki ısı taşınım katsayısı (Wm⁻²K⁻¹)

Hava için ısı dengesi (4.26) eşitliğinde verildiği gibidir. Bu eşitlikte Z yüksekliğinde ve Δz kalınlığındaki hava tabakası için ısı dengesi verilmektedir. Bu eşitlik, kurutma havasının çekirdek ve kurutma kanalı arasındaki enerji transferini temel almakta olup, taşınım ve yoğuşmayla çekirdeğe transfer edilen enerjiyi, havanın Pyrex tüpe verdiği enerjiyi ve havanın taşıdığı enerjiyi içermektedir.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T_a}{\partial t} \rho_A c_{pA} \varepsilon \pi R_t^2 \\ & = h_{ba} L_{ba} (T_b - T_a) + k_m L_{ba} (C_s - C_a) \Delta H + 2\pi R_t h_{ta} (T_t - T_a) \\ & - \dot{m}_a c_{pA} \frac{\partial T_a}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.26)$$

R_t : Tüpün (kavurma hücresinin) iç yarıçapı (m)

ε : Çekirdeğin gözenekliliği

L_{ba} : Tüpün metre uzunluğu için temas alanı (m²/m)

h_{ta} : Tüp ve hava arasındaki ısı taşınım katsayısı (W/ m²K)

Temeli (4.27) eşitliğine dayanan, Z yüksekliğinde ve Δz uzunluğu için kavurma hücresinin kaybettiği ısıyı ifade eden bir diğer eşitlik daha verildikten sonra.

$$\frac{\partial T_t}{\partial t} \rho_t c_t V_t = h_{ta} A_i (T_a - T_t) + h_o A_o (T_o - T_t) \quad (4.27)$$

h_o : Çevre hava ile kavurma hücresi yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı (W/ m²K)

T_o : Çevre havasının sıcaklığı (°C)

T_t : Tüpün sıcaklığı (°C)

A_i : Tüpün iç yüzey alanı

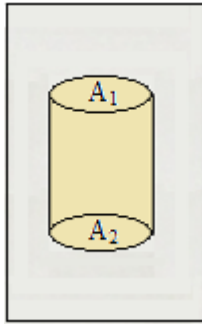
A_o : Tüpün dış yüzey alanı

ileri sürülen temel denklemler ayrıklaştırılıp uygun sınır ve başlangıç şartları için nümerik olarak çözülmüştür. Suyun difüzyon katsayısı D_{eff} deneysel verilere uyacak şekilde belirlenmiştir.

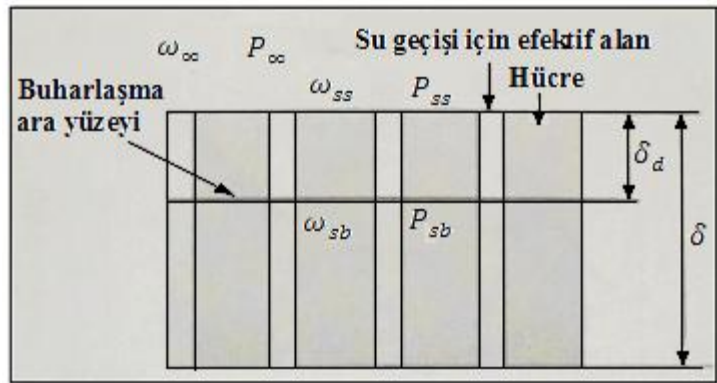
4.4. Kurutmada İç Direnç Modeli

Bu çalışmada kurutma sistemi içerisine hava sirkülasyonu sağlanarak, kurutmaya bir yenilik katılmıştır [14]. Az miktar dış havanın kurutma odasına gönderilmesiyle su buharı etkin bir şekilde kurutma sisteminden uzaklaştırılabilmektedir. Kurutma odasına 2 L/min. debisiyle azot gönderilerek, kurutma odası içerisindeki nemin azaltılması ve böylece kurutma hızının artırılması amaçlanmıştır. Burada, gözenekli ortam modeline dayanarak su transferi için iç direnç araştırılmıştır. Modelde su buharının ideal gaz olduğu varsayılmıştır.

Deniz tarağının doku hücreleri adaleli fiber hücreleri olduğundan Şekil 4.4’de verilen bir boyutlu gözenekli ortam modeli, azalan hızda kuruma periyodu süresince deniz tarağı içerisindeki su transferini ifade etmek için kullanılır.



Şekil 4.3 Su tarağı



Şekil 4.4 Gözenekli ortam modeli

Malzeme içerisinde yüzeyden δ_d uzaklığında düzgün kuruma cephesinin olduğu varsayılmıştır. Ara yüzeyde oluşan buhar dar kanallardan dışarıya doğru akar. Kanal kesit alanlarının toplamının toplam yüzey alanına oranı a olup, bu değer deniz tarağının morfolojik gözleminden elde edilmiştir.

Yüzeyde kütle transferi (birim yüzeyden):

$$\dot{m} = \frac{\rho_A(\omega_{ss} - \omega_{\infty})}{R_s} \quad (4.28)$$

ρ_a : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

ω : Özgül nem ($\text{kg nem/kg kuru hava}$)

R_s : Yüzeyde kütle transfer direnci (s/m)

Darcy modeline göre kütle transferi:

$$\dot{m} = \rho_B u_B = \rho_B \frac{K (P_{sb} - P_{ss})}{\mu_B \delta_d} \quad (4.29)$$

K : Geçirgenlik katsayısı (m^2)

μ_B : Buharın dinamik viskozitesi (Pa s)

Kuruma cephesinin hızı:

$$\frac{d\delta_d}{dt} = \frac{\dot{m}}{\rho_{su} a} \quad (4.30)$$

Su buharının ideal gaz olduğu varsayılarak ve kısmi basınç oranları kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılmıştır.

$$\dot{m} = \frac{\rho_A}{R_s + R_i} \left(\frac{P_{sb}}{P} - \frac{P_{\infty}}{P} \right) \quad (4.31)$$

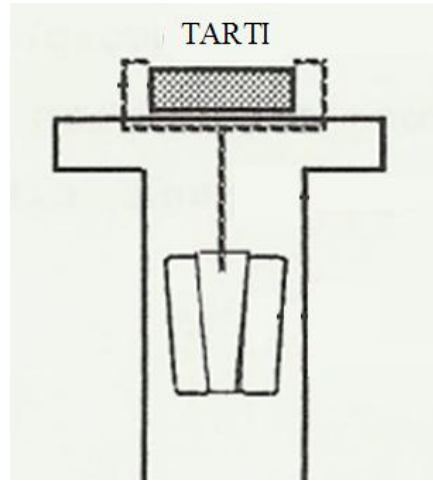
$$R_i = \frac{\rho_A \mu_B \delta_d}{\rho_B K P} \quad (4.32)$$

R_i : İç direnç (s/m)

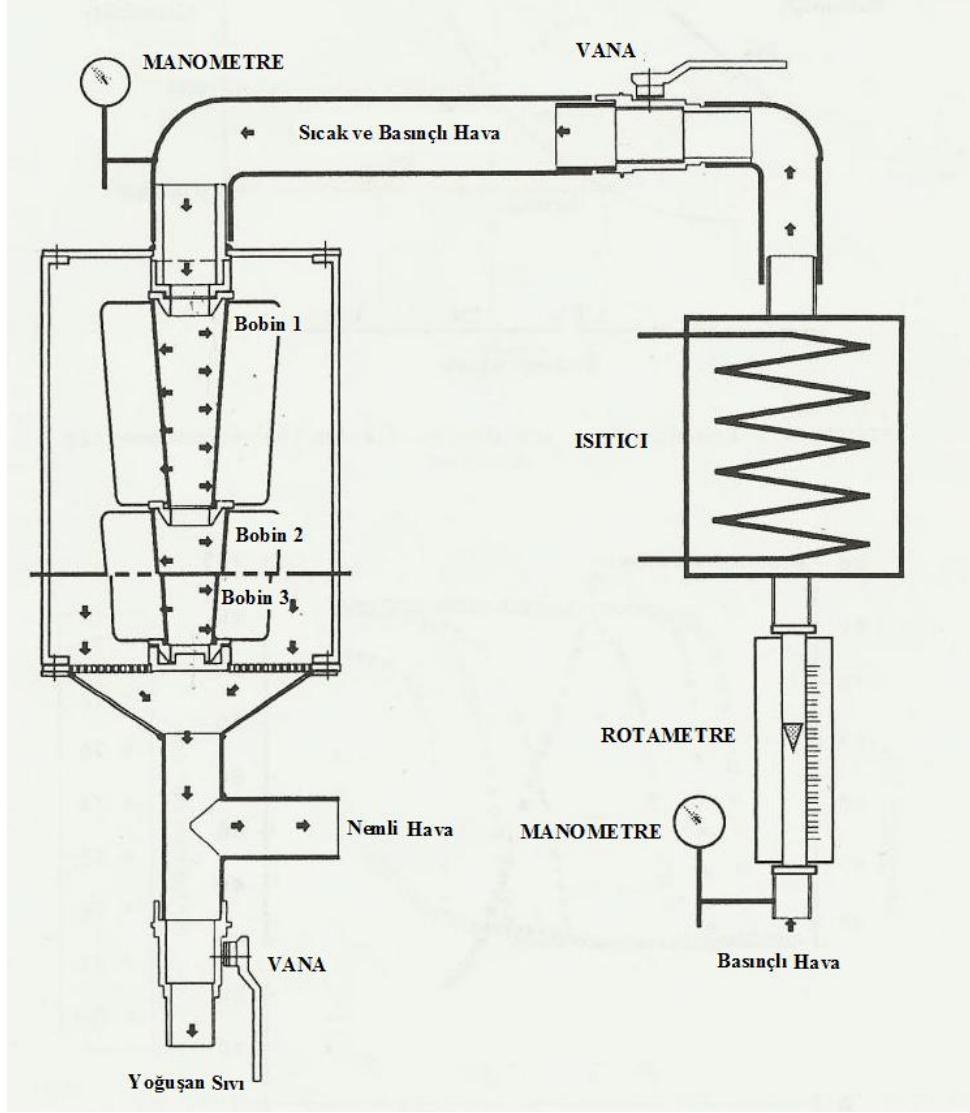
Eğer yüzey direnci R_s sabit ise, (4.30), (4.31) ve (4.32) eşitlikleri yardımıyla azalan hızda kuruma periodu için kuruma hızı belirlenebilir. Bu çalışmada, mikrodalga kurutma için yüzey direnci R_s , iç direncin ihmal edilebilir olduğu su sütunundan buharlaşma oranı ölçülerek bulunmuştur. Sıcak hava kurutması durumu için ise, ısı ve kütle transferi arasındaki benzeşim kullanılarak yüzey direnci tahmin edilmiştir.

4.5. Tekstil Bobinlerinin Kuruma Modeli

RIBERIO ve VENTURA çalışmalarının ilk kısmında rüzgar tüneline yerleştirdikleri bir bobinin sıcak hava ile kurutmasını, ikinci kısmında ise bobinlerin merkezinden radyal doğrultuda içten dışa doğru basınçlı hava geçirerek bobinlerin kurumasını incelemişlerdir [15]. RIBERIO ve VENTURA'nın modeli hareketli sınır modeline dayanmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında iki hareketli sınır varken, ikinci kısmında bir hareketli sınır görülmektedir. Buharlaşma hareketli sınırlarda olmaktadır.



şekil 4.5 Rüzgar tüneline yerleştirilen bobin [5]



Şekil 4.6 Basınçlı havayla bobinlerin kurutulması

Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir.

- Buharlaştırmanın, havanın yaş termometre sıcaklığında sabit tutulan iki hareketli buharlaşma cephesinde olduğu varsayılmıştır.
- Isı ve kütle geçişi bir boyutludur.

Model için temel denklem aşağıda verilmektedir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\Delta H}{c_p} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.33)$$

Birim hacim için bu modelin temel denklemi aşağıdaki gibi fiziksel olarak ifade edilebilir.

$$\underbrace{k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{İletimle giren net ısı}} = \underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Depolanan ısı}} - \underbrace{\rho \Delta H \frac{\partial X}{\partial t}}_{\text{Nemi buharlaştıran ısı}} \quad (4.34)$$

Temel denklem yaş ve kuru bölgeler için ayrı ayrı yazılmıştır. Modelleme sonucu elde edilen kuruma süreleri ve bobin içerisindeki sıcaklık dağılımının deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

4.6. Kapiler Gözenekli, Higroskopik Malzemelerin Kuruma Sırasındaki Isı ve Kütle Transfer Modeli

Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [16].

- Gözenekler içerisinde buhar hareketinin başlattığı hava akışı ve ısı difüzyon ihmal edilmiştir.
- Malzeme içerisinde ısı üretimi veya herhangi bir kimyasal reaksiyon yoktur.
- Sıvının taşıdığı enerji buharın taşıdığı enerji yanında ihmal edilebilir.
- Enerji denklemi yazılırken, nemin malzeme içerisinde sıvı halde bulunduğu varsayılmıştır.
- Buhar difüzyon direnci μ sabittir.

Modelde kontrol hacmine enerji eşitliği uygulanmış (4.35) eşitliği elde edilmiş, daha sonra sıvının taşıdığı enerji terimi ihmal edilmiş, buharın kütsel debisi buhar basıncının gradyanı olarak ifade edilmiş, buhar basıncı da nem içeriğine bağlı olarak ifade edilmiş ve uygun büyüklüklerin yerlerine konmasıyla enerji denklemi (4.36)'daki halini almıştır. Isı iletim katsayısı k hem sıcaklığın hem de nem içeriğinin fonksiyonudur. Buharın difüzivitesi δ ise yalnızca sıcaklığın fonksiyonudur.

$$\frac{\partial \Delta U}{\partial t} = - \frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} \Delta r - \frac{\partial \dot{H}_{sıvı}}{\partial r} \Delta r - \frac{\partial \dot{H}_{buhar}}{\partial r} \Delta r - \Delta \dot{H}_{bağ} \quad (4.35)$$

$$\rho_k A_r (c_{kuru} + X c_{su}) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k A_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left[A_r \frac{\delta}{\mu R_{buhar} T} \left(P^*_{buhar} \frac{\partial f}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial r} \right) (h_B + h_{bağ}) \right] \quad (4.36)$$

ρ_k : Kuru kısmın yoğunluğu (kg/m³)

A_r : Yüzey alanı (m²)

δ : Buharın difüzivitesi (m²/s)

μ : Buhar difüzyon direnci

R_{buhar} : Buharın gaz sabiti (J/ kg K)

P^*_{buhar} : Doymuş buhar basıncı (Pa)

f : Su aktivitesi

h_B : Buharın entalpisi (J/kg)

$h_{bağ}$: Bağlanma entalpisi (J/kg)

Kuruyan malzemenin birim zamanda nem miktarındaki değişim aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial m_{nem}}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{m}_{sıvı}}{\partial r} \Delta r - \frac{\partial \dot{m}_{buhar}}{\partial r} \Delta r \quad (4.37)$$

Birim zamanda nem miktarındaki değişimin malzemenin nem içeriğine bağlı ifadesinin, buharın kütleli debisinin basınç gradyanına bağlı ifadesinin ve sıvının kütleli debisinin nem gradyanına bağlı ifadesinin (4.37) eşitliğinde yerine yazılmasıyla malzemedeki nem değişiminin hesaplanmasına olanak tanıyan aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilmiştir. Nem iletkenliği K nem içeriğine, sıcaklığa ve malzemeye bağlıdır.

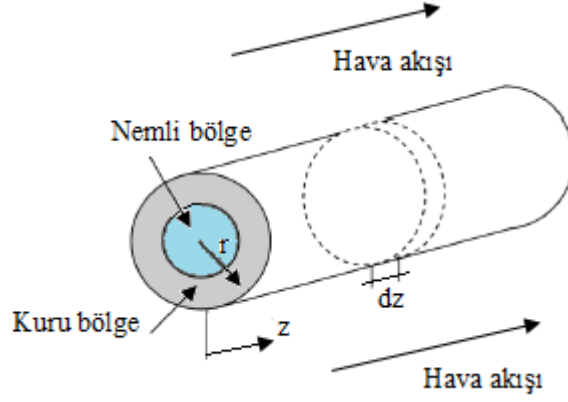
$$\rho_k A_r \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[A_r \left(K \rho_k + \frac{\delta P^*_{buhar}}{\mu R_{buhar} T} \left(\frac{\partial f}{\partial X} \right) \right) \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (4.38)$$

Nem iletkenliği K ve buhar difüzyon direnci μ katsayıları inversiyon yöntemiyle bulunmuş, uygun sınır ve başlangıç şartları için temel denklemler nümerik olarak çözülmüştür.

4.7. Püsküllü Tekstil Malzemelerinin Havayla Kurutulma Modeli

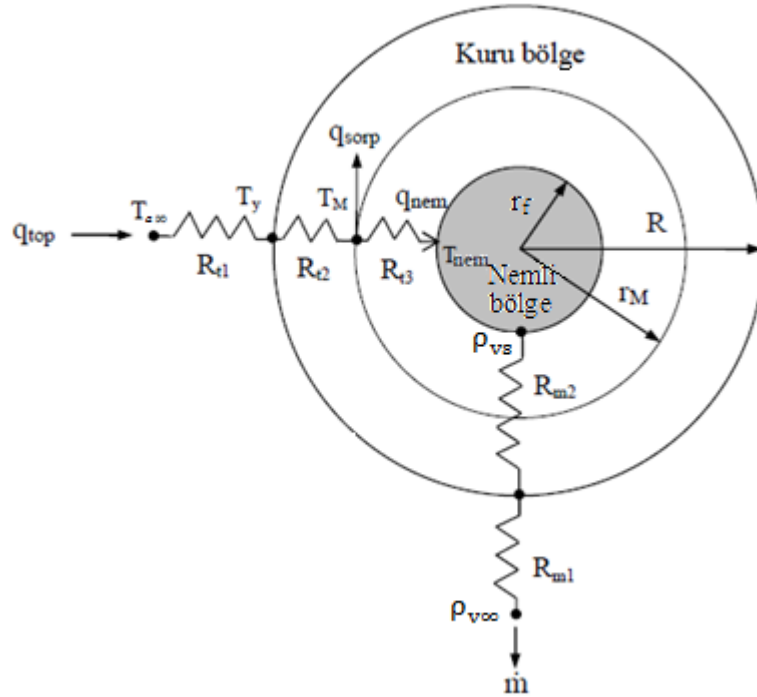
Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [17].

- İplik gözenekli, dairesel kesitli silindirdir.
- Hava akışı iplik yüzeyi doğrultusunda olup, hava ipliğin içine nüfus etmemektedir.
- Isı ve kütle geçişi yalnızca radyal doğrultudadır.
- Kuru kısımda depolanan enerjinin, kuru kısmı ikiye bölen ortalama yarıçap r_M 'de olduğu varsayılmıştır.
- Yaş bölgedeki nem üniformdur (konumdan bağımsız).
- Hava ve su buharı için ideal gaz varsayımı yapılmıştır.



Şekil 4.7 Kurutma havasına maruz iplik

Bu model iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım iplik içerisindeki ısı ve kütle geçişini, ikinci kısım ise hava akımı içerisindeki ısı ve kütle geçişini içermektedir. Model iplik içerisinde yaş ve kuru bölgeleri ayıran bir hareketli sınır yaklaşımına dayanmaktadır. İplik için ısı ve kütle dirençleri Şekil 4.8'deki gibi belirtilmiştir.



Şekil 4.8 İpliğin kesitinde ısı ve kütle transfer dirençlerinin gösterimi [5]

İpliğe verilen toplam enerji:

$$q_{tot} = \dot{m}\Delta H + \left[\left(\frac{r_f^2}{R^2} \right) m_s c_s + m_{su} c_{su} \right] \frac{\partial T_{nem}}{\partial t} + \left(1 - \frac{r_f^2}{R^2} \right) m_s c_s \frac{\partial T_M}{\partial t} \quad (4.39)$$

Uygun eşitliklerin yerlerine konmasıyla iplik için enerji eşitliğinin aşağıdaki formu elde edilmiştir.

$$\frac{T_{a\infty} - T_M}{R_{t1} + R_{t2}} = \left\{ \frac{\left(\left[\frac{P_{vs}}{R_u T_{nem}} - \frac{Y P_{atm}}{(0.622 + Y) R_u T_{a\infty}} \right] \Delta H \right)}{R_{mtot}} \right\} + \left[\left(\frac{r_f^2}{R^2} \right) m_s c_s + m_{su} c_{su} \right] \frac{\partial T_{nem}}{\partial t} + \left(1 - \frac{r_f^2}{R^2} \right) m_s c_s \frac{\partial T_M}{\partial t} \quad (4.40)$$

Hava için ısı ve kütle transfer denklemleri ise aşağıda verilmiştir.

$$\left(\rho_{v\infty} \frac{\partial Y}{\partial t} + \dot{G} \frac{\partial Y}{\partial z} \right) dz = \dot{m} \quad (4.41)$$

$$(c_{pA} + Y c_{pB}) \left(\rho_{v\infty} \frac{\partial T_{a\infty}}{\partial t} + \dot{G} \frac{\partial T_{a\infty}}{\partial z} \right) dz = q_{tot} \quad (4.42)$$

$\dot{m}$: Buharlaşma hızı (kg/s)

m_{su} : Sıvı su kütlesi (kg)

ΔH : Suyun buharlaşma gizli ısısı (J/kg)

r_f : Buharlaşma cephesinin konumu (mm)

R : İplik çapı (mm)

m_s : Katı fazın kütlesi (kg)

c_s : Katı fazın özgül ısısı (J/kg K)

c_{su} : Suyun özgül ısısı (J/kg K)

c_{pA} : Havanın özgül ısısı (J/kg K)

c_{pB} : Su buharının özgül ısısı (J/kg K)

T_{nem} : Yaş bölgenin sıcaklığı (K)

T_M : Orta sıcaklık (K)

$T_{a\infty}$: Havanın sıcaklığı (K)

R_t : Isıl direnç (m²K/W)

R_m : Kütle direnci (s/m³)

P_{vs} : Doymuş su buharının kısmi basıncı (Pa)

R_u : Üniversal gaz sabiti

Y : Havanın özgül nemi

P_{atm} : Atmosferik basınç (Pa)

$\rho_{v\infty}$: Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

$\dot{G}$: Havanın kütle akısı (kg/s)

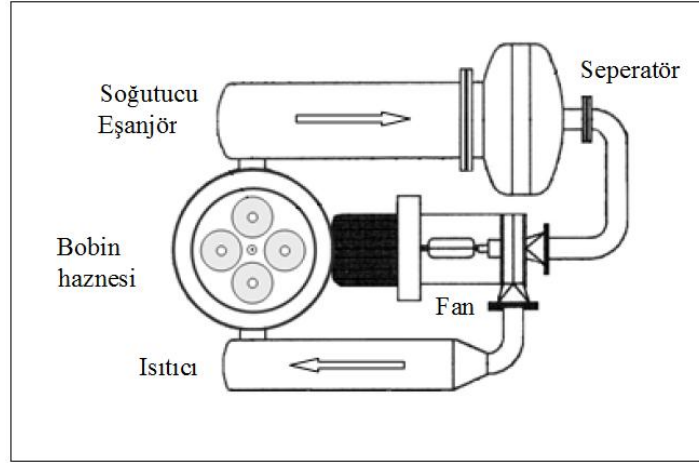
Modelin çözümü uygun sınır ve başlangıç şartları altında nümerik olarak yapılmıştır.

4.8. Pamuklu Bobinlerin Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transfer Modeli

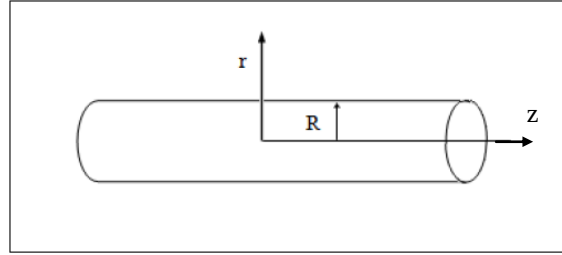
Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [18].

- Kütle transferinin difüzyon ile olduğu varsayılmıştır.
- Nem transferi için temel denklem Fick kanuna dayanan, zamana bağlı difüzyon denklemidir.
- Kurumanın başlangıç anında ipliğin nem konsantrasyonunun yüzeyde denge değerine ulaştığı varsayılmıştır.
- Başlangıçta iplik içerisindeki nem konsantrasyonunun üniform olduğu varsayılmıştır.
- İyi yalıtım nedeniyle, bobin boyunca sıcaklığı düşen hava-buhar karışımının adiabatik bir işleme tabi olduğu varsayılmıştır.

Kullanılan deney tesisatının şematik görünüşü Şekil 4.9'da verilmiştir. Bobin haznesinde sıcak hava bobinlerin içinden dışına radyal doğrultuda geçirilmektedir. Geliştirilen model deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak test edilmiş ve sonuçların deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.9 Bobin kurutma deney tesisatının şematik görünüşü



Şekil 4.10 İpliğin geometrisi ve koordinat sistemi

Geliştirilen bu modelde bobin ipliklerden oluşmaktadır ve iplik R yarıçapında sonsuz uzunlukta bir silindir olarak modellenmiştir. Boyutsuzlaştırma yapıldıktan sonra bir boyutlu difüzyon denklemi (4.43) eşitliğindeki formu almıştır. Uygun boyutsuz sınır ve başlangıç şartları için ise boyutsuz çözüm bulunmuş, hacim üzerinden integral alındıktan sonra ipliğin nem oranı (4.44) eşitliğindeki gibi ifade edilmiştir. Burada m ipliğin nem içeriğidir (kuru kütle eklendiğinde ipliğin toplam kütlesidir).

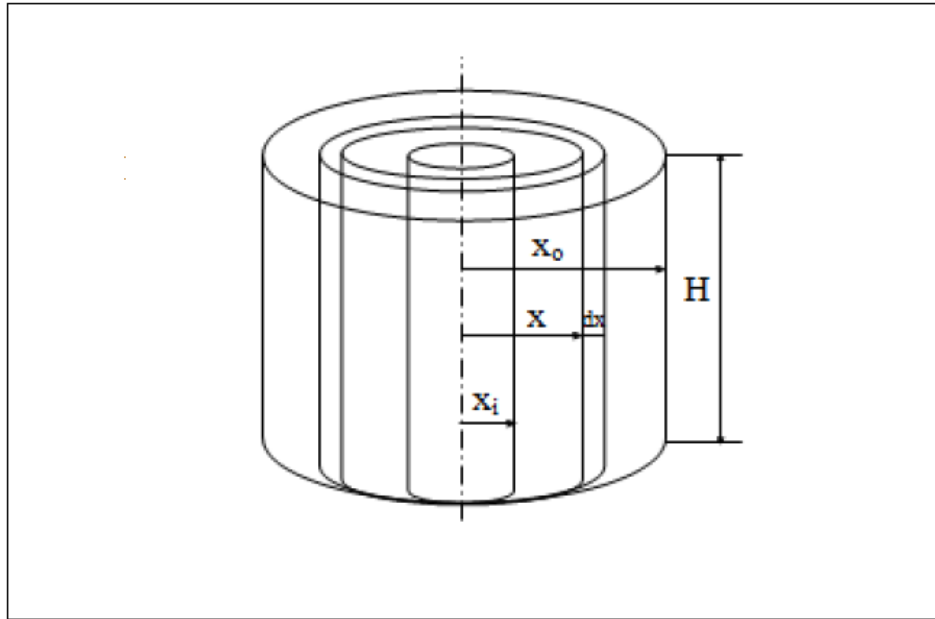
$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial c}{\partial \xi} \quad (4.43)$$

$$\frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\alpha_n^2} e^{-\alpha_n^2 \tau} \quad (4.44)$$

$\tau \left(\frac{D_{eff}}{R^2} t \right)$: Boyutsuz zaman

ξ : Boyutsuz konum

$\alpha_n (n = 1, 2, \dots)$: $J_0(x)$ 'in kökleri



Şekil 4.11 Bobin geometrisi

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi bobin içerisinde dx diferansiyel kalınlığında bir tabaka ele alınıp, bu tabaka içerisindeki iplik sayısı N aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$N = \frac{H}{\pi R^2} dx \quad (4.45)$$

H : Bobin yüksekliği

Bu modelde, kurumanın belirli bir anındaki bobinin nem içeriği M aşağıdaki gibi ifade edilmiştir. Söz konusu eşitlikte $K = \frac{H}{\pi R^2}$ ve $M_e = K \int_{x_i}^{x_0} m_e dx$ dir.

$$M = M_e + K \int_{x_i}^{x_0} (m_o - m_e) \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\alpha_n^2} e^{-\alpha_n^2 \tau} \right] dx \quad (4.46)$$

Diferansiyel tabakaya enerjinin korunumu uygulanmış ve (4.47) enerji eşitliği elde edilmiştir.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \varepsilon \rho \Delta H \frac{\partial}{\partial t} m(x, t) \quad (4.47)$$

ε : Faz dönüşüm faktörü

ΔH : Buharlaşma gizli ısısı

Enerji eşitliğindeki m eksponansiyel bir ifadedir. Sıcaklığın radyal değişimi için ikinci mertebe polimon varsayımı yapılmış ve boyutsuz sıcaklık aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\theta = (A_1(x/x_o)^2 + A_2(x/x_o) + A_3)e^{-A_4 t} \quad (4.48)$$

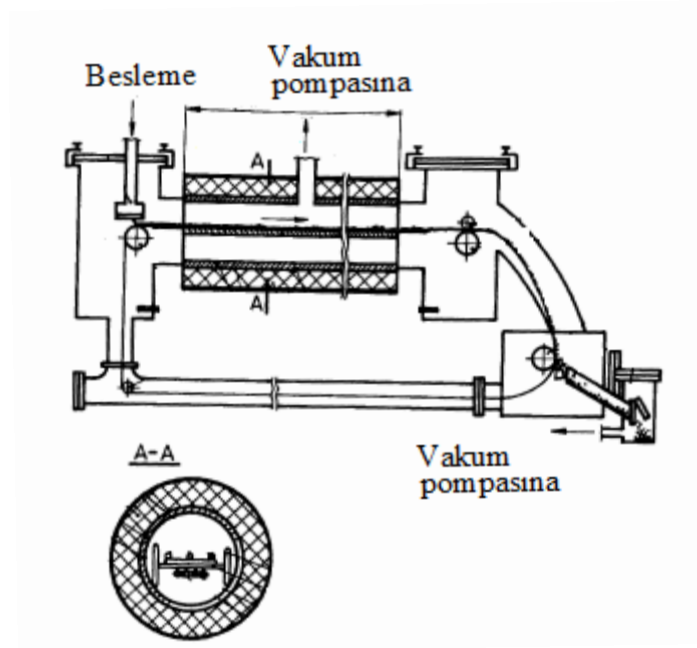
$\theta \left(\frac{T}{T_i} \right)$: Boyutsuz sıcaklık

T_i : İlk sıcaklık

A_1, A_2 ve A_3 katsayıları sunulan eşitlik ve deneysel veriler arasındaki hataların karelerinin toplamını minimize eden değerler olarak hesaplanmıştır. Difüzyon katsayısı için Arrhenius tipi $D_{eff} = e^{-\gamma/\theta}$ şeklinde bir bağıntı önerilmiştir. Bağıntıdaki γ değeri, (4.46)’deki teorik çözüm ile deneysel veriler arasındaki hataların kareleri toplamı minimum olacak şekilde deneysel verilere eğri uydurulmasıyla elde edilmiştir. Deneyler kurutma havasının 70°C, 80°C ve 90°C değerleri için yapıldığından her deney için belirlenen katsayıların değerleri farklıdır.

4.9. Yüksek Viskoziteli Gıda Maddelerinin Vakum Altında Kurutulmasının Matematiksel Modeli

Kesintisiz vakum kurutma tesisatı aşağıda verilmektedir. Tesisat besleme kısmı, kurutma kısmı ve vakum egzoz kısmından oluşmaktadır. Malzeme silindire beslenir, pistondan basınç altında geçer ve besleme ağzına gelir. Görünen silindirik tel benzeri malzeme hareketli bant üzerine ekstrude edilir, kurutma bölümünden geçer ve kurutularak arzu edilen nem içeriğine ulaştırılır [19].

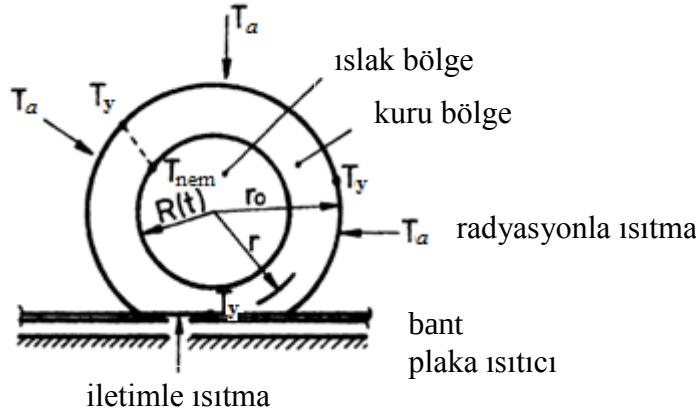


Şekil 4.12 Kesintisiz vakum kurutucu deney aparatı

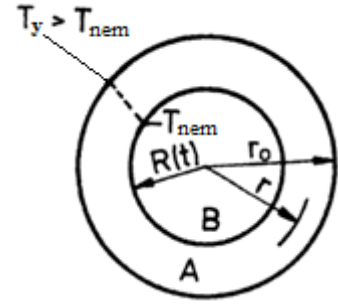
Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [19].

- Kurutulan cismin radyasyonla ısıtılan yüzeyi ile alüminyum bant ile temasta olup iletimle ısıtılan yüzeyinin sıcaklığı aynıdır. Söz konusu yüzey sıcaklığı T_o şeklinde gösterilmiş olup zamanın bir fonksiyonudur. Bu kabulün yapılmasıyla kurutulan cismin yüzeyinden merkezine doğru hareket eden buharlaşma yüzeyinin üniform olarak hareket ettiği farz edilmiştir. Bir boyutlu, sıcaklık dağılımının simetrik olduğu bir problem incelenmektedir.
- Kurutulan cisim eşdeğer fiziksel büyüklüklerle tanımlanan bir sürekli ortam olup, içerisinde enerji kaybı veya kütle üretimi olmamaktadır.

Nemin buharlaşması nedeniyle kurutulan ürün içerisinde ıslak ve kuru bölgeleri ayıran sınır hareket halindedir.



Şekil 4.13 a Kurutmanın fiziksel modeli



Şekil 4.13 b Basitleştirilmiş fiziksel model
A-kuru bölge, B- nemli bölge

Problemi modellemek için gerekli uygun diferansiyel denklem aşağıda verilmektedir.

$$\alpha_{eA} \left(\frac{\partial^2 T_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_A}{\partial r} \right) = \frac{\partial T_A}{\partial t} \quad R(t) \leq r \leq r_o, \quad t > 0 \quad (4.49)$$

Bu modelde $r = r_o$ için $T_A = T_y(t)$ ve $r = R(t)$ için $T_A = T_{nem}$ sınır şartlarından başka (4.50) eşitliğiyle verilen sınır şartı önerilmiştir.

$$k_{eA} \frac{\partial T_A}{\partial r} = -X_i \rho_k \Delta H \frac{dR}{dt} \quad r = R(t), \quad t > 0 \quad (4.50)$$

α_{eA} : Kuru bölgenin ısı yayılım katsayısı

k_{eA} : Kuru bölgenin ısı iletim katsayısı

ρ_k : Kuru kısmın yoğunluğu

X_i : Nemli B bölgesi içerisinde malzemenin kuru baza göre tanımlanmış nem oranının başlangıçtaki değeri

Başlangıçta tamamen nemli olan $\pi r_o^2 L$ hacmindeki malzeme içerisindeki nem içeriğinin zamanla değişimi ile nemli olan bölgenin hacminin zamanla değişimi orantılı olduğundan aşağıdaki eşitlik temel alınarak (4.52) eşitliği yazılabilir.

$$\frac{\text{Başlangıçtaki nem içeriği}}{\text{Başlangıçta nemli olan hacim}} = \frac{\text{Toplam hacimde nem içeriğindeki zamanla değişim}}{\text{Nemli hacmin zamanla değişimi}} \quad (4.51)$$

$$\frac{\frac{X_i}{\pi r_o^2 L}}{\frac{dX}{dt} \pi R^2 L} = \frac{\frac{dX}{dt}}{\frac{d}{dt} \pi R^2 L}$$

$$\frac{dX}{dt} = - \frac{2Rk_{eA}}{\rho_k r_o^2 \Delta H} \frac{\partial T_A}{\partial r} \quad r = R(t), \quad t > 0 \quad (4.52)$$

İleri sürülen temel denklemler uygun boyutsuz büyüklükler kullanılarak boyutsuzlaştırıldıktan sonra sonlu integral dönüşüm tekniği kullanılarak çözülmüş, malzeme içerisinde boyutsuz olarak hareketli sınırın zamana bağlı değişimi, sıcaklık dağılımı ve ortalama nem içeriğinin zamana bağlı değişimi tespit edilmiştir.

4.10. Yün İpliğin Kuruma Modeli

Modelde 70°C, 80°C ve 90°C sıcaklığındaki havayla kurutulan yün ipliğin içerisinde sıcaklık ve nem dağılımlarının tespiti amaçlanmıştır [20].

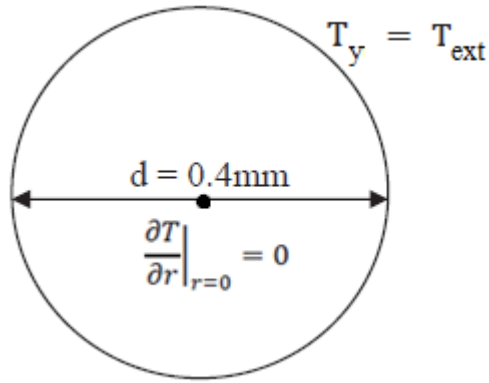
Model için yapılan kabuller aşağıda verildiği gibidir.

- Isı ve kütle geçişi bir boyutludur.
- Yün ipliğin termofiziksel özellikleri sabittir.
- Buharlaşma gizli ısısı sabit olup ortalama sıcaklıktaki değeri alınmaktadır.

- Difüzyon katsayısının sadece sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmıştır.
- İpliğin yüzeyindeki sıcaklık, kurutma havası sıcaklığına eşittir.

Modelde 10 Ne iplik numarasındaki iplik için (4.53) eşitliği kullanılarak ipliğin çapı tespit edilmiştir.

$$d(mm) = -0.10284 + \frac{1.592}{\sqrt{Ne}} \quad (4.53)$$



Şekil 4.14 Kurumaya bırakılan yün iplik

Çalışmada temel denklemler aşağıda verilen modifiye edilmiş enerji denklemi ve difüzyon denklemi olup uygun sınır ve başlangıç şartları için nümerik olarak çözülmüştür. 70°C, 80°C ve 90°C kurutma havası için iplik içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımlarının zamana bağlı değişimleri tespit edilmiştir. İplik çapı çok küçük olduğundan kuruma zamanı saniyeler mertebesinde.

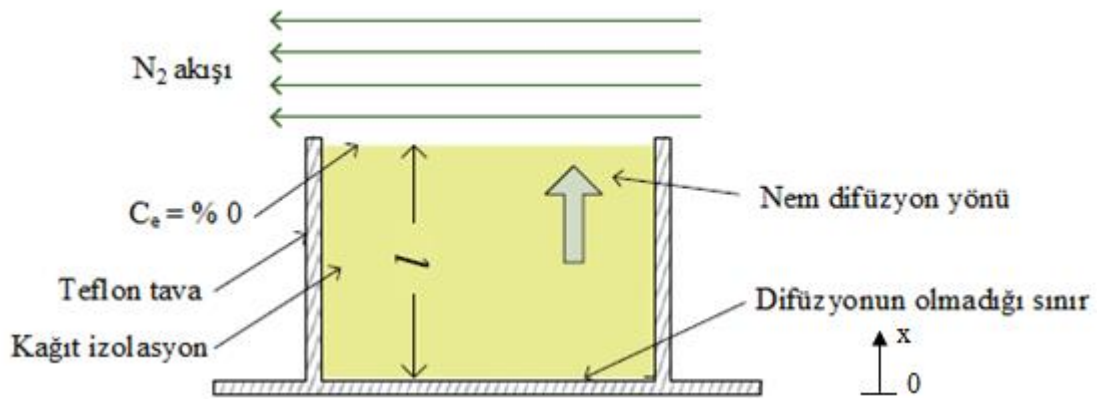
$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta H \rho \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{eff} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (4.55)$$

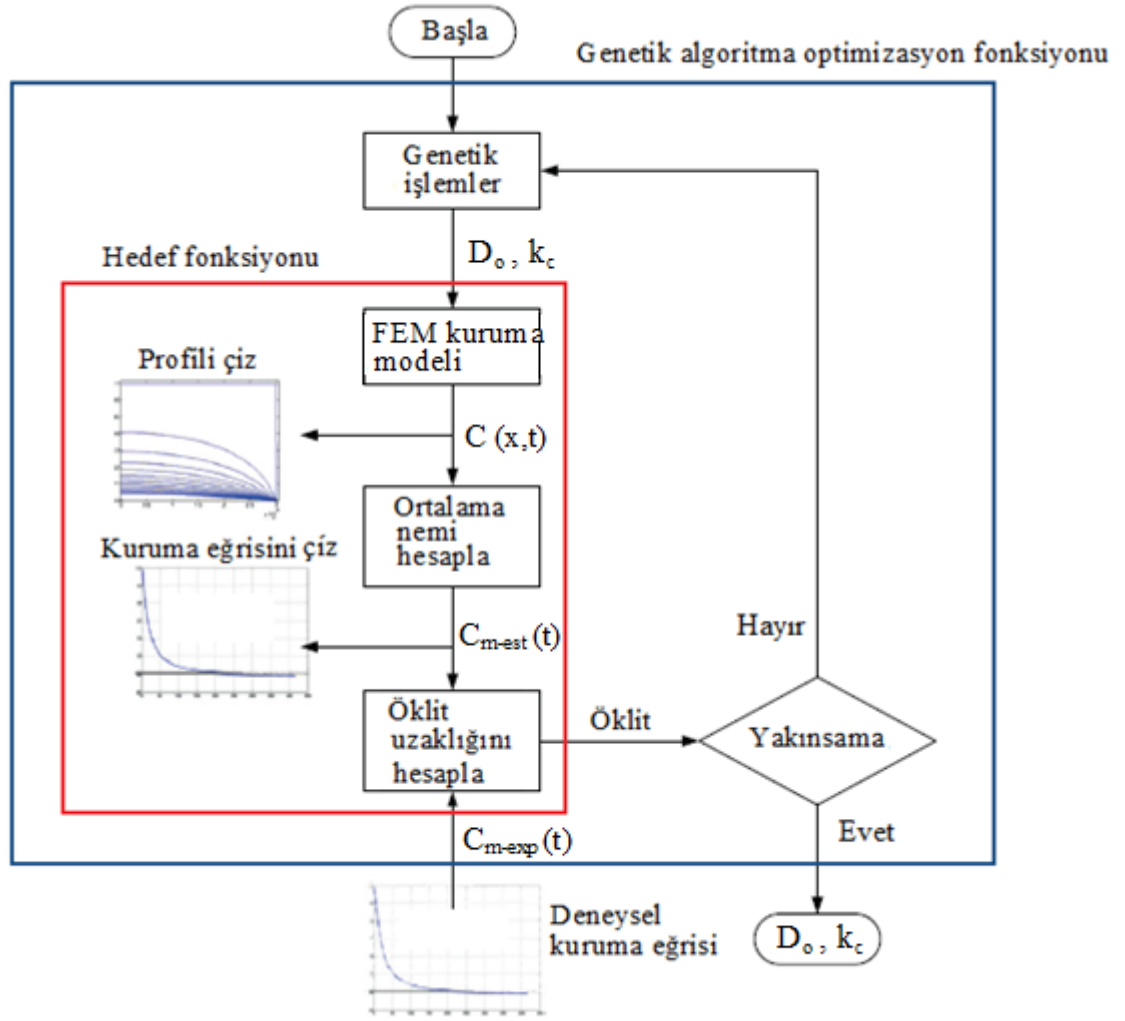
4.11. Transformatör Kağıdı için Önerilen Yeni Bir Nem Difüzyon Katsayısı

Model için yapılan kabuller aşağıda listelendiği gibidir [21].

- Sonlu elemanlar modeli, kurumayı izolasyon kalınlığının içinde bir boyutlu olarak ele almaktadır.
- Kuruma sırasında kağıt izolasyon içerisindeki sıcaklık üniform kabul edilmiştir.
- İzolasyonun içinde ilk haldeki nem konsantrasyonu üniformdur.
- Yüzeydeki denge nem konsantrasyonu sıfır alınmıştır. Çünkü izolasyon kağıdı üzerinden akan akışkan N₂ olup bunun nem içeriğine katkısı ihmal edilebilir ve N₂ debisi yüzeyde hızlı buharlaşmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.15 Termogravimetrik deneylerde kullanılan kağıt izolasyon örneği



Şekil 4.16 Difüzyon katsayısını tespiti için geliştirilen yöntem

Genetik operatörler yardımıyla D_o , k_c katsayıları üretilmekte ve bu değerler sonlu elemanlar kuruma modeline (FEM kuruma modeli) verilmektedir. Sonlu elemanlar kuruma modeli difüzyon denklemini uygun sınır şartları altında difüzyon katsayısını $D = D_o e^{[k_c C(x,t)]}$ şeklinde ele almaktadır. Konuma ve zamana bağlı nem içeriği $C(x,t)$ elde edildikten sonra, aşağıdaki denklem kullanılarak ortalama nem içeriği tespit edilmektedir.

$$C_{m-est}(t) = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} C(x,t) dx \quad (4.56)$$

Deneylerden elde edilen ortalama nem içerik değeri $C_{m-exp}(t)$ ve daha önce hesaplanan ortalama nem içeriği $C_{m-est}(t)$ kullanılarak (4.57) eşitliğine göre Öklit uzaklığı hesaplanır, şayet bu değer belirlenen bir değerden küçük ise yakınsama olmaktadır.

$$\text{Öklit} = \sqrt{\sum_{t=0}^{t=tmax} [C_{m-est}(t) - C_{m-exp}(t)]^2} \quad (4.57)$$

k_c katsayısının sıcaklığa bağlı olmadığı tespit edilmiş, D_o için ise, $T_k(K)$ izolasyon sıcaklığı olmak üzere aşağıdaki eşitlik ileri sürülmektedir.

$$D_o = D_1 e^{\left[\frac{-D_2}{T_k}\right]} \quad (4.58)$$

Regresyon analizi yapılarak D_1 ve D_2 'nin izolasyon kalınlığı l ' ye bağlı ifadeleri ise aşağıdaki gibi belirtilmektedir.

$$D_1 = 3.1786 l^{-3.665} \quad (4.59)$$

$$D_2 = 8241.76 l^{-0.254} \quad (4.60)$$

BÖLÜM 5

BOBİNİN KURUMA DAVRANIŞINI MODELLEYEN GENETİK ALGORİTMA MODELİ

5.1. Genetik Algoritma Hakkında Temel Bilgi

Genetik algoritma John HOLLAND tarafından 1960'lı yıllarda bulunmuş olup, 1960 ve 70'li yıllarda Michigan Üniversitesi'nde John HOLLAND, onun öğrencileri ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir [22]. Genetik algoritma evrim teorisinden oluşmuştur. Canlılardaki DNA'lara benzetilen şifrelenmiş sayı dizileri genetik algoritma literatüründe birer bireyi temsil etmektedir. Birkaç birey bir popülasyonu oluşturur. İlk popülasyon genellikle rastgele oluşturulur. Bireyler uygunluk değerlerine göre sınıflandırılır. Bireylerin uygunluk değerleri baz alınarak çeşitli seçim yöntemleri uygulanır ve bir sonraki nesile aktarılacak bireyler bu şekilde seçilir. İki bireyin bir araya gelmeleri sonucu, çaprazlama neticesinde her iki bireyin de özelliklerini taşıyan yeni iki birey oluşur [23]. Popülasyona, popülasyondaki çeşitliliği sağlamak, kaybolan genetik bilgiyi kurtarmak amacıyla mutasyon operatörü uygulanır [24]. Bir optimizasyon yöntemi olan genetik algoritmada her nesilde bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır, nesilden nesile popülasyonun uygunluk değeri artar, aranan uygunluk değeri elde edildiğinde ise program sonlandırılır [23].

Genetik algoritmada geçen temel tanımlar aşağıda verilmiştir [23, 25, 26].

Birey (Individual): Kontrol değişkeninin kodlanmış vektörü (matematiksel programlamada), herhangi olası çözüm

Popülasyon (Population): Tüm bireylerin oluşturduğu grup

Kromozom (Chromosome): Bireyin modeli

Karakter (Trait): Bir bireyin özelliği

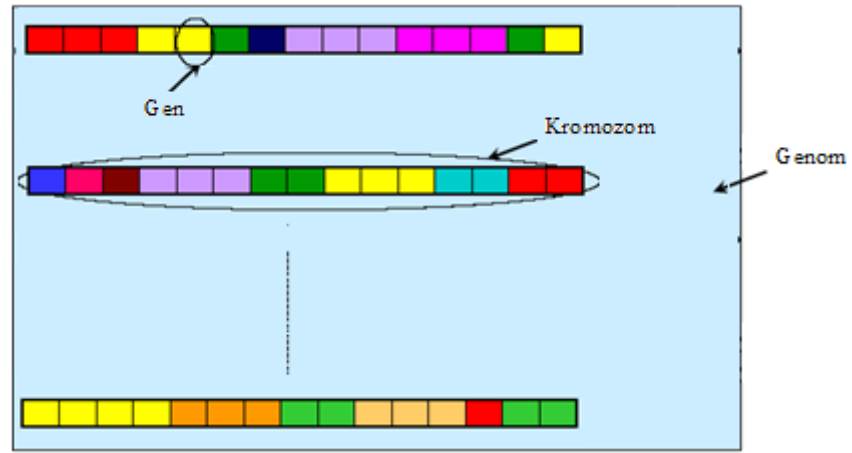
Allel (Allele): Karakterin olası ayarları (siyah, sarı...), ilgili özelliğin değeri

Konum (Locus): Genin kromozom üzerindeki konumu, özelliğin dizi üzerindeki yeri

Genom (Genome): Bir birey için kromozomların toplamıdır. Genetik algoritmada bir birey bir kromozomla temsil edildiğinden, bu aynı zamanda söz konusu kromozomu temsil eder.

Genotip (Genotype): Genomdaki özel gen dizisi

Fenotip (Phenotype): Genotipin fiziksel özelliği (akıllı, güzel, sağlıklı,...)



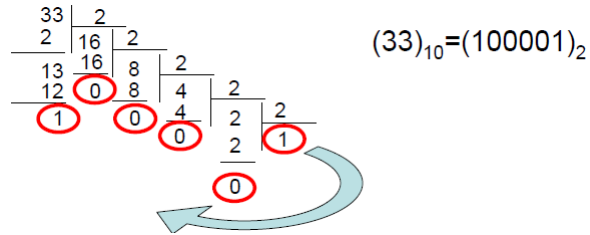
Şekil 5.1 Gen, kromozom ve genom arasındaki ilişkinin şematik gösterimi [26]



Şekil 5.2 Genetik algorithmada popülasyon yapısı [23]

Kromozomlar çeşitli şekillerde gösterilebilmekte olup bunlardan en yaygın kullanılanı ikili kodlamadır. Yapılan tezde de kromozomlar ikili kodlamayla temsil edilmektedir.

İkili sistemde reel sayıların gösterimine ait örnekler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.3 Onluk tabanda bir tam sayının ikili sayı karşılığı [27]

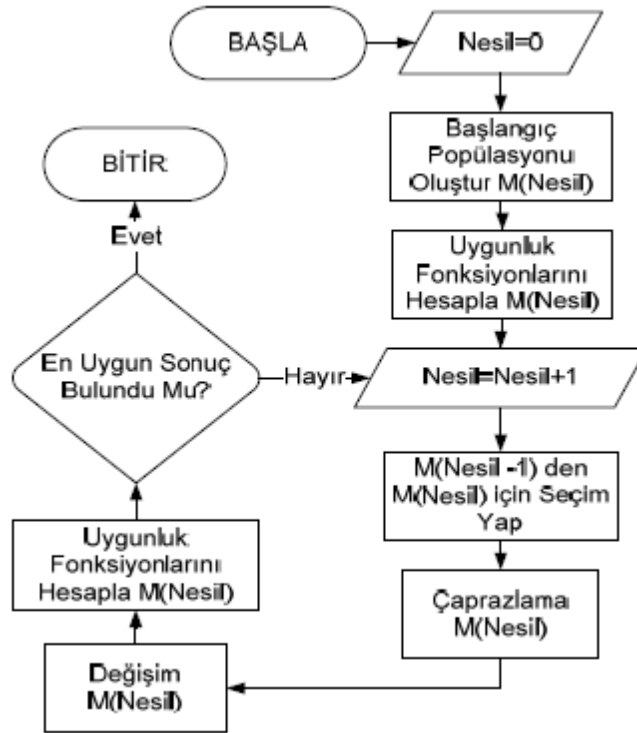
$$(100,10001)_2=(?)_{10}$$

$$=1.2^2+0.2^1+0.2^0+1.2^{-1}+0.2^{-2}+0.2^{-3}+0.2^{-4}+1.2^{-5}$$

$$=4+1/2+1/2^{32}=4,50000000023$$

Şekil 5.4 İkilik tabanda bir reel sayının onluk tabanda karşılığı [27]

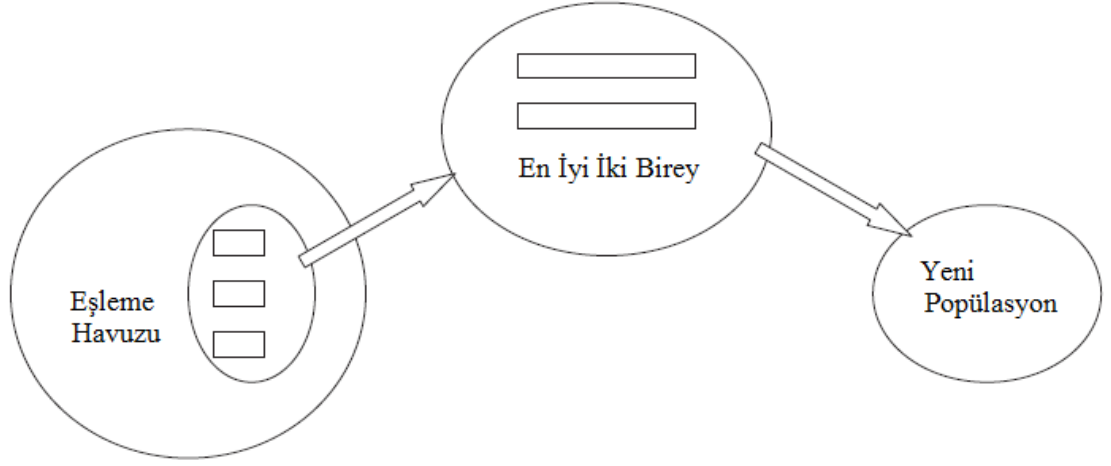
Genetik algoritmada çaprazlama bir noktadan yapıldığı gibi birkaç noktadan da yapılabilir. Genetik algoritmada genellikle ya uygun şartı sağlayan bireye ulaşıldığında yada önceden belirlenen nesil sayısına ulaşıldığında program durdurulur.



Şekil 5.5 Genetik algoritmanın akış diyagramı [23]

5.2. Seçim Yöntemi, Mutasyon, Elitizm ve Çaprazlama

Seçim, popülasyondan iki ebeveyni çaprazlama için seçme işlemine denir [24].

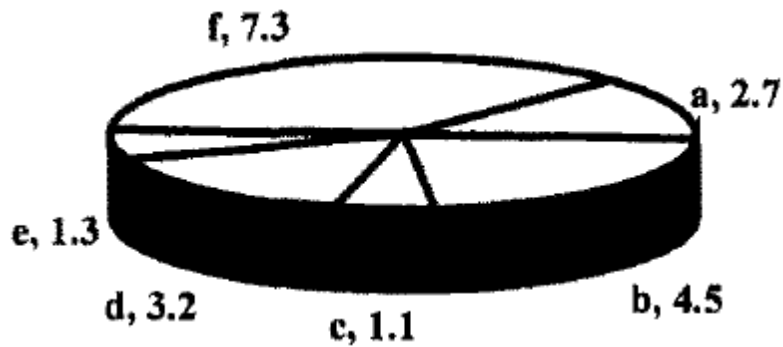


Şekil 5.6 Seçim [24]

Seçim, biyolojik sistemlerdeki doğal seleksiyona benzer şekilde olup poplasyona uygulanır. Seçimle zayıf bireyler ayıklanır, kuvvetli bireylerin ise sahip oldukları bilgiyi yeni nesillere aktarma şansları diğer bireylerden daha yüksektir. Çok yaygın kullanılan seçim yöntemleri turnuva seçim yöntemi ve rulet tekerleği seçim yöntemidir [28].

Turnuva seçim yönteminin stratejisi N_u adet birey arasında turnuva düzenlemeye dayanır. Tezde turnuva iki adet birey arasında yapılmıştır. Turnuvadaki en iyi birey en yüksek uygunluğa sahip olanı olup turnuvayı kazanandır. Turnuva yeni döllerin oluşturulması için eşleme havuzu dolana kadar devam eder. Turnuva kazananlarından oluşan eşleme havuzunun ortalama popülasyon uygunluğu yüksektir. Optimum çözüme ulaşmayı sağlayan bu yöntem, diğer seçim yöntemleri arasında etkili bir yöntem olarak bilinir [24].

Rulet tekerleği seçim yönteminde ise seçilme olasılığı bireyin uygunluğuyla doğru orantılıdır. Rulet tekerleği seçim yönteminde, popülasyon bir rulet tekerleğini oluşturur. Rulet tekerleğinde her bir bireyin kapladığı dilim uygunluk değeriyle orantılıdır. Rulet tekerleği döndürülür ve temsili bir top üzerine atılır. Topun hangi dilim üzerinde duracağı dilimin açısıyla, dolayısıyla da söz konusu bireyin uygunluğuyla orantılıdır. Uygunluk değeri yüksek birey rulet tekerleğinde daha büyük bir dilimle temsil edildiğinden bir sonraki nesle aktarılma olasılığı daha yüksektir [28].



şekil 5.7 Uygunluk değerleri farklı olan bireylerin rulet tekerleği üzerinde sembolize edilmeleri [28]

Rulet tekerleği seçim yönteminin algoritması şu şekilde özetlenebilir: Popölasyonu oluşturan bireylerin uygunluk değerleri toplanır. Bu toplam f_{sum} olsun. 0 ve f_{sum} arasında rastgele bir R_s sayısı seçilir. Popölasyon üyelerinin uygunluk değerleri toplanırken toplam, R_s değerini geçtiğinde durulur. Eklenen son birey seçilen birey olup, bunun bir kopyası bir sonraki nesile aktarılır. Popölasyon boyutu kadar birey seçilene kadar bu seçim işlemi tekrarlanır [28].

Seçimden sonra popölasyona çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır ve yeni nesil oluşturulur. Seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri belirli bir sayıdaki nesile veya yakınsaklık kriterine ulaşılana kadar devam ettirilir [28].

Doğal hayatta birçok işlem mutasyona neden olmaktadır. Basit ikili kodlamada mutasyonun uygulanması oldukça kolaydır. Her yeni nesilde tüm popölasyon taranır, her kromozomdaki her bir bit üzerinden geçilir ve çok nadir olarak 1'ler 0'a veya 0'lar 1'e çevrilir. Popölasyondaki mutasyon olasılığı genellikle 0.001 mertebesindedir. Çoğu problem için mutasyon olasılığının çok düşük değerı çok yüksek değerine göre daha iyi sonuç verir [28].

Uygunluk orantılı seçim, uygunluğu yüksek herhangi bir bireyin seçilmesini garanti etmez. Seçilemeyen birey ölecektir. Uygunluk orantılı seçimle probleme uyan en uygun çözüm atlanabilir. Bu ters bir etki olarak görölse de, bazı problemler için avantaj olabilir. Çünkü algoritmayı yavaşlatmasına rağmen, yakınsamadan önce arama uzayının büyük bir bölümünün keşfedilmesine olanak tanır. Çoğu uygulamada nesildeki en iyi birey (elit birey) çaprazlama ve mutasyona uğratılmadan seçilip bir sonraki nesile kopyalanır. Elitizm denen bu işlem arama hızını bir hayli arttırır [28].

Çaprazlama, doğada olduğu gibi bilgi değişimini sağlar. Bireylerin birçok noktadan çaprazlanması mümkün olduğu gibi çaprazlama tek noktadan da yapılabilir. Bir çaprazlama yöntemi (tek nokta çaprazlama) şu şekilde örneklendirilebilir: Her biri bir kromozomla temsil edilen bir çift birey seçilmiş olsun. Kromozomların üzerinde keyfi bir nokta seçilir ve bu noktanın sağ tarafında kalan bilgi kromozomlar arasında değiş tokuş yapılır [28].

Seçilen ebeveyn çiftleri P_c olasılığında çaprazlamaya tutulurlar. Bunun için 0 ile 1 arasında rastgele bir R_c sayısı üretilir. Eğer rastgele üretilen bu R_c sayısı çaprazlama olasılığı P_c 'ye eşit veya P_c 'den küçükse bireyler çaprazlanır, aksi taktirde

çaprazlanmadan bir sonraki nesle aktarılır. Tipik çaprazlama olasılık değeri P_c 0.4'ten 0.9'a kadar değişir [28].

Çaprazlama olmaksızın popülasyonun ortalama uygunluk değeri, uygunluğu en yüksek olan bireyin uygunluk değerine kadar ilerler. Bu noktadan sonra popülasyonun ortalama uygunluk değeri ancak mutasyonla artabilir. Çaprazlama sayesinde farklı çözümlerin bilgileri karıştırılarak arama uzayının yeni parçaları keşfedilmiş olunur [28].

5.3. Genetik Algoritmanın Kullanıldığı Basit Bir Örnek

$f(x) = x^2$ fonksiyonunun x tamsayısı için $0 < x \leq 4095$ aralığında maximum olduğu değeri bulalım [28].

-Popülasyon 8 bireyden oluşsun. Her bir birey de uzunluğu 12 olan ikili bit dizisinden oluşsun. Keyfi olarak 8 birey seçilsin (Örneğin 101001101010,110011001100,.....).

-Her bir bit dizisi bir tam sayıyı gösterebilir (Örneğin 000000000111 ($1*2^0+1*2^1+1*2^2=7$) 7 yi, 000000000000 0'ı, 111111111111 4095'ı ifade etsin.)

-Bu sayıları $f(x) = x^2$ probleminin çözümü olarak görüp test edelim ve her bir bireye $f(x)$ fonksiyonuna eşit uygunluk fonksiyonu atayalım. (Örneğin 7 çözümü için uygunluk $7^2 = 49$ dur.)

Tablo 5.1 Popülasyonu oluşturan bireyler ve uygunluk değerleri [28]

Popülasyon üyesi	Kromozom	x	Uygunluk
1	110101100100	3428	11751184
2	010100010111	1303	1697809
3	101111101110	3054	9326916
4	010100001100	1292	1669264
5	011101011101	1885	3553225
6	101101001001	2889	8346321
7	101011011010	2778	7717284
8	010011010101	1237	1530169

-Popülasyonun, uygunluğu en fazla olan bireylerinin yarısını, sonraki nesile aktarmak üzere seçelim.

Tablo 5.2 Sonraki popülasyon için seçilen başarılı bireyler [28]

Geçici popülasyon üyesi	Kromozom	x	Uygunluk
1	110101100100	3428	11751184
2	101111101110	3054	9326916
3	101101001001	2889	8346321
4	101011011010	2778	7717284

- Seçilen en başarılı bireyler arasından rastgele ebeveyn dizi çiftlerini seçelim. (Burada her bir dizi yalnızca bir kere seçilsin.) Ebeveyn olarak seçilen çiftlere tek nokta çaprazlama işlemini uygulayalım. Yani ebeveyn dizilerin kuyruklarını rastgele bir noktadan keselim ve kesilen bu kuyrukları diğer ebeveyne ekleyelim. Bu şekilde çocuk dizi çiftini oluşturmuş oluruz.
- Çocuklar üzerinde 0 yerine 1 veya 1 yerine 0 yazılarak mutasyon operatörü uygulanabilir. (Bu örnek için ilk nesilde mutasyon uygulanmamıştır.)
- Yeni oluşan çocuk diziler ve bunların ebeveynleri bir popülasyonu oluştursun (Toplam 8 birey).

Tablo 5.3 Geçici popülasyon [28]

Popülasyon üyesi	Kromozom	x	Uygunluk
1	11/0101100100	3428	11751184
2	10/1111101110	3054	9326916
3	101101/001001	2889	8346321
4	101011/011010	2778	7717284
5	111111101110	4078	16630084
6	100101100100	2404	5779216
7	101101011010	2906	8444836
8	101011001001	2761	7623121

İkinci popülasyonda ilk popülasyona göre uygunluğun ortalama değeri ve popülasyondaki en yüksek uygunluk değeri artmıştır.

Tablo 5.4 Sonraki popülasyon için seçilen başarılı bireyler [28]

Popülasyon üyesi	Kromozom	x	Uygunluk
1	110101100100	3428	11751184
2	101111101110	3054	9326916
3	101101011010	2906	8444836
4	111111101110	4078	16630084

Bu popülasyondan çaprazlamayla elde edilebilecek en büyük sayı 11111111110 dır. Çaprazlama operatörü yalnızca dizilerin bitlerini değiş tokuş etmekte, yeni bir bilgi üretmemektedir. Mutasyon ilk nesildeki çeşitliliği dahil ederek popülasyonun çeşitliliğini sürdüren bir operatördür. Mutasyon operatörü ille de yeni bir bilgi getirmemekte, zamanından önce kaybolan genetik bilgi için sigorta poliçesi olarak çalışmaktadır.

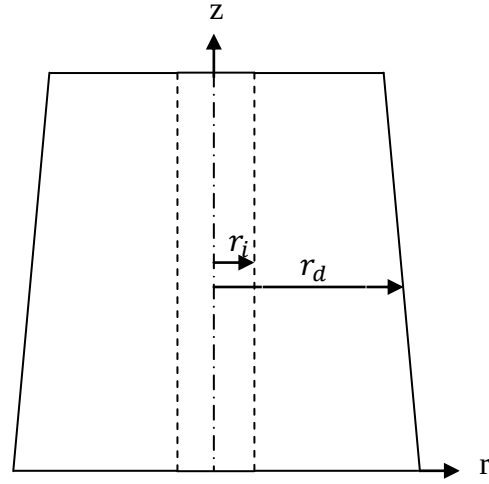
Problemimizde algoritmayı ilk popülasyondan itibaren mutasyon uygulayarak yeniden başlatırsak, 11111111111 dizisi elde edilebilir ve genel optimuma ulaşılmış olunur. Örneğin mutasyon operatörü şu şekilde uygulanabilir: Her yeni çocuk dizisi üzerinde her bir bit üzerinde gezilir. 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı atılır ve eğer bu sayı önceden tanımlanan mutasyon olasılığından küçükse, söz konusu bitdeki değer ters çevrilir. Örnek sadece iki nesil için verilmiştir. Uygulamada karşılaşılan problemlerde nesil sayısı çok daha fazladır.

5.4. Tezde Geliştirilen Genetik Algoritma Modeli

Çalışmanın bu kısmında amaçlanan, genetik algoritma yöntemiyle probleminize en uygun difüzyon katsayısı D_{eff} 'in tespitinin yapılmasıdır. Bobinin içersinde ısı ve kütle geçişini modelleyen temel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r \frac{\partial X}{\partial r} \right) = \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.2)$$

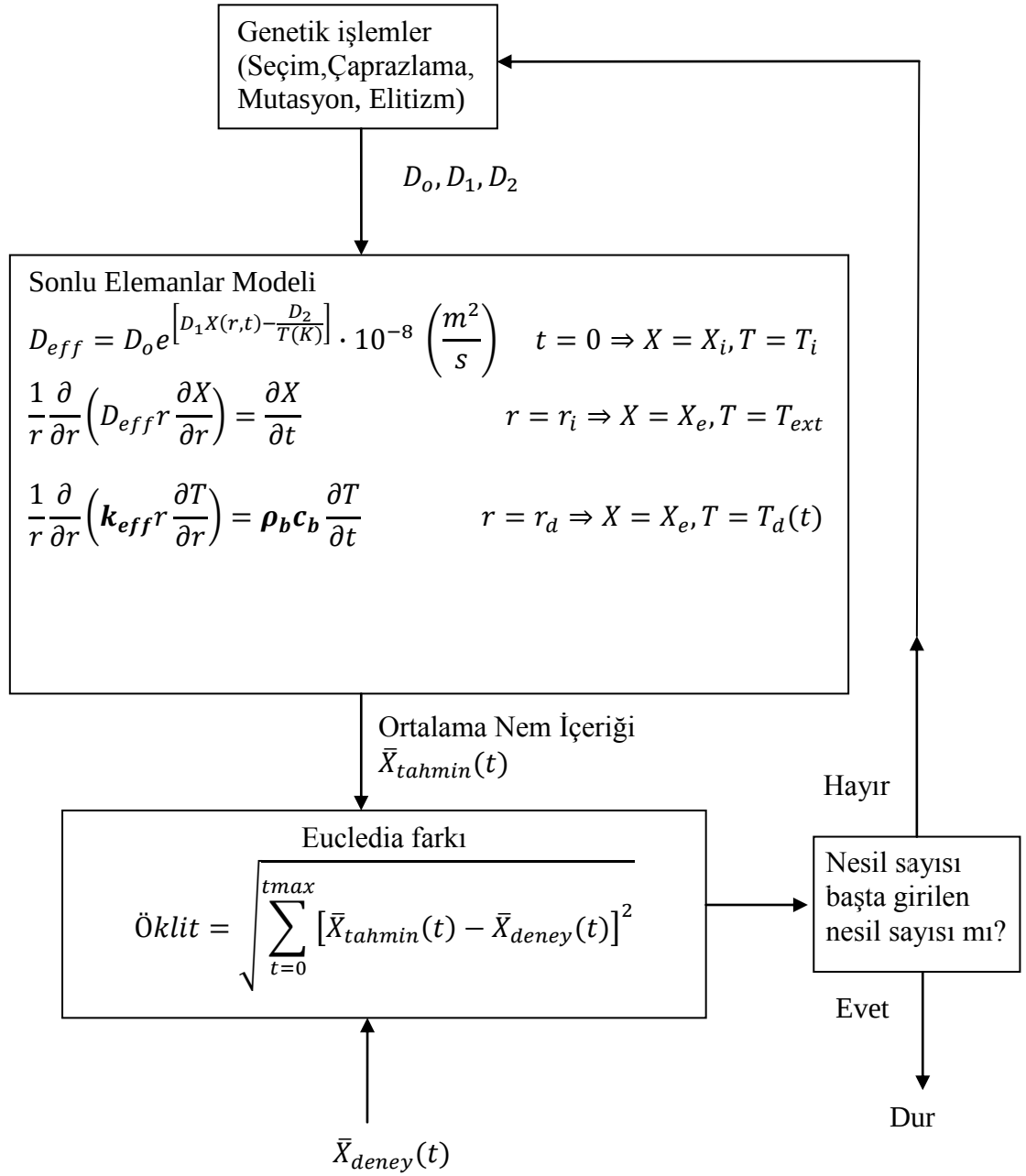


Şekil 5.8 Kurutulan iplik bobini

Söz konusu amaca yönelik difüzyon katsayısı için Arrhenius tipine benzer (5.3) eşitliği önerilmiştir.

$$D_{eff} = D_o e^{\left[D_1 X(r,t) - \frac{D_2}{T(K)} \right]} \cdot 10^{-8} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (5.3)$$

Probleme uyan genetik algoritma modelinin akış şeması Şekil 5.13'te verilmektedir. Bobinler on iki saat suda bekletildikten sonra çıkarılmakta, iki saat ortamda bekletilerek yüzey suyunu atması beklenmiştir. Ayrıca bu amaçla, bobinlerin portmantiyere yerleştirilmesinden sonra deneye başlanmadan birkaç dakika bobin dış yüzeyinden iç kısmına doğru ısıtılmamış hava geçirilmiştir. Sanayide de benzer işlem santrifüj kurutmayla yapılmaktadır.



Şekil 5.9 Genetik algoritma modelinin akış şeması

Bobinin kurumasını modelleyen bu genetik algoritma modeli, Comsol Multiphysics sonlu elemanlar ve Matlab programları kullanılarak oluşturulmuştur. Problemin temel denklemleri için sınır şartları bobinin içten dışa kurutulması için verilmiştir.

5.4.1. Programda Kullanılan Temel Eşitliklerin İfadeleri

5.4.1.1. Bobinin Efektif Isıl İletkenliğinin İfadesi

% 65 yün, % 35 orlondan oluşan katı matrisin ısı iletkenliği geometrik ortalama modeline göre bulunmuştur [4].

$$k_{yün} = 0.052 \frac{W}{mK} \quad [29] \quad (5.4)$$

$$k_{orlon} = 0.18 \frac{W}{mK} \quad [30] \quad (5.5)$$

$$k_s = k_{yün}^{(1-0.35)} k_{orlon}^{0.35} = 0.08030 \frac{W}{mK} \quad (5.6)$$

Bobinin efektif ısı iletkenliği için kullanılan temel formül (5.7) eşitliği olup, söz konusu eşitlikte gerekli ifadeler aşağıdaki gibi tespit edilmiştir.

$$k_{eff} = (k_g^m \phi_g + k_l^m \phi_l + k_s^m \phi_s)^{1/m} \quad m = 0.25 \quad [31] \quad (5.7)$$

ϕ_g : Gözenekli malzemede gaz fazının kapladığı hacmin toplam hacme oranı

ϕ_l : Gözenekli malzemede sıvının kapladığı hacmin toplam hacme oranı

ϕ_s : Gözenekli malzemede katının kapladığı hacmin toplam hacme oranı

k_s : Katı kısmın ısı iletim katsayısı

k_g : Havanın ısı iletim katsayısı

k_l : Sıvı suyun ısı iletim katsayısı

Sıvı suyun ve havanın ısı iletim katsayıları 325K ($\cong 52^\circ C$) sıcaklıkta sırasıyla

$k_l = 0.645 \frac{W}{mK}$ ve $k_g = 0.02815 \frac{W}{mK}$ olarak alınmıştır [32].

$$\phi_g = \varepsilon - \phi_l \quad (5.8)$$

$$\phi_l = (X \cdot m_{kuru\ bobin}) / (\rho_{su} V_{bobin}) \quad (5.9)$$

$$\phi_s = 1 - \varepsilon \quad (5.10)$$

Bu eşitliklerde suyun yoğunluğu $\rho_{su} = 997 \frac{kg}{m^3}$ (300K için), $V_{bobin} = 2.7614 \cdot 10^{-3} m^3$, $m_{kuru\ bobin} = 0.97094 kg$ olarak alınmıştır.

Bu modelde bobin bir bütün olarak ele alınıp deneysel veriler kullanılarak bobinin gözenekliliği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Yapılan deneysel verilerden bobinlerin yaş haldeki ağırlıklarının ortalaması alınarak bir bobinin yaş kütlesi $m_{yaş} = 2.0365$ kg olarak bulunmuştur.

$$\rho_{b,kuru} = \frac{m_{kuru\ bobin}}{V_{bobin}} = 351.61 \frac{kg}{m^3} \quad (5.11)$$

$$\frac{m_{yaş} - m_{kuru\ bobin}}{m_{kuru\ bobin}} = \frac{\rho_{su} V_{su}}{\rho_{b,kuru} V_{bobin}} = \frac{\rho_{su}}{\rho_{b,kuru}} \varepsilon \quad (5.12)$$

(5.12) eşitliğinden bobinin gözenekliliği $\varepsilon = 0.387$ olarak bulunur.

5.4.1.2. Bobinin Efektif Isı Kapasitesinin İfadesi

Diğer modeldeki (6.66) ve (6.67) eşitlikleri kullanılarak bobini oluşturan katı matrisin yoğunluğu ve özgül ısınma ısısı sırasıyla $\rho_k = 1.2745 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$ ve $c_k = 1.4 \frac{kJ}{kgK}$ olarak bulunmuştur. Bobinin efektif ısı kapasitesi geliştirilen (5.13) eşitliği kullanılarak bulunmaktadır.

$$\rho_b c_b = (\rho c_p)_{eff} = (1 - \varepsilon)(\rho c_p)_{katı} + \varepsilon [Z(\rho c_p)_{sıvı} + (1 - Z)(\rho c_p)_{hava}] \quad (5.13)$$

$Z = 1 \Rightarrow$ Gözenekler tamamen sıvıyla dolu

$Z = 0 \Rightarrow$ Gözenekler tamamen havayla dolu

Yalnız burada havanın ısı kapasitesi $(\rho c_p)_{hava}$ terimi diğer terimlerin yanında ihmal edilebilir mertebede olduğundan, (5.14) eşitliği de dikkate alınarak $\rho_b c_b$ terimi (5.15) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$\varepsilon Z = \frac{V_{boşluk}}{V_{Toplam}} \frac{V_{sıvı}}{V_{boşluk}} = \frac{V_{sıvı}}{V_{Toplam}} = \phi_l \quad (5.14)$$

$$\rho_b c_b = (\rho c_p)_{eff} = (1 - \varepsilon)(\rho c_p)_{katı} + \phi_l (\rho c_p)_{sıvı} \quad (5.15)$$

Suyun yoğunluk ve özgül ısı değerleri incelenen sıcaklık aralığında sıcaklıkla pek fazla değişim göstermediklerinden, söz konusu değerler 300K sıcaklığında $\rho_{su} = 997 \frac{kg}{m^3}$, $c_{su} = 4.179 \frac{kJ}{kg K}$ olarak alınmıştır [32]. Belirlenen terimlerin değerleri yerlerine yazıldığında bobinin efektif ısı kapasitesinin (5.9) ve (5.15) eşitliklerinden ötürü bobinin nem içeriği X 'e bağlı olduğu görülmektedir. Bobinin efektif ısı kapasitesi nem içeriğinin fonksiyonu olarak denklemlerde yerini almaktadır.

5.4.1.3. Sınır ve Başlangıç Şartları

Tekstil sanayinde kurutma işlemine tabi tutulan bobinler ısı kurutmadan önce santrifüj kurutma işlemine tabi tutulduğundan bobinin iç ve dış yüzeyleri denge nemindedir. Denge nemi yün için Henderson denkleminde aşağıdaki gibi bulunur. İplik %65 yünden oluştuğundan aşağıdaki yün için olan eşitlik kullanılmıştır [2].

$$X_e = A_1 \left(\frac{1}{T(K)} \ln \left(\frac{1}{1 - RH} \right) \right)^{A_2} \quad A_1 = 2.38, \quad A_2 = 0.481, \quad R^2 = 0.99 \quad (5.16)$$

RH: Bağlı nem

Tablo 5.5’de verilen her bir kurutma şartı için, kurutma sonunda portmantiyer çıkışındaki bağlı nem ve kurutma havasının sıcaklık değerleri ile Henderson denklemi kullanılarak denge nem değerleri X_e ’ler tespit edilmiştir.

Tablo 5.5 Her bir deney şartı için bobinin denge nemi ve başlangıç nemi

Deney şartları		Pormantiyer çıkış nemi (RH)	Denge nemi (X_e)	Başlangıç nemi (X_i)
1bar	80°C	0.1194	0.0525	1.0858
	90°C	0.1152	0.0508	1.0716
	100°C	0.1114	0.0493	1.0144
2bar	80°C	0.1406	0.0571	1.0428
	90°C	0.1255	0.0531	1.0427
	100°C	0.1091	0.0488	1.0770
3bar	80°C	0.1195	0.0525	1.0910
	90°C	0.1072	0.0490	0.9536
	100°C	0.0963	0.0458	1.0830

Deneysel veriler kullanılarak elde edilen nem içeriğinin değerleri, dolayısıyla da başlangıç nem içeriği X_i (5.17) eşitliğinden tespit edilmiştir.

$$X - X_e = \frac{W_{yaş} - W_{kuru}}{W_{kuru}} = \frac{m_{yaş} - m_{kuru\ bobin}}{m_{kuru\ bobin}} \quad (5.17)$$

Bobinler içten dışa doğru kurutulduğundan, iç yüzeydeki sıcaklık sınır şartı olarak T_{ext} kurutma havası sıcaklığı alınmıştır. Bobinin ilk sıcaklığı oda sıcaklığı olan 20°C dir. Bobin çıkış sıcaklığı olarak makine çıkış sıcaklığı, bir diğer ifadeyle portmantiyer çıkış sıcaklığı alınmış, her bir deney için söz konusu sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimleri fonksiyonel olarak elde edilmiştir. Belirtilmesi gerekli bir diğer husus ise, deneyler makine oda sıcaklığına gelmeden yapıldığından başlangıçta makine çıkış havasının değeri ortam sıcaklığından birkaç derece yüksektir. Bu durumun yaratacağı yanıltıcı etki ihmal edilebilir mertebededir. Çünkü hem söz konusu sıcaklık farkı küçüktür, hem de makine çıkış sıcaklığı için gerçek değerler değil, uydurulan eğri vasıtasıyla yakın değerler kullanılmaktadır. Çalışmada önemli olan geliştirilen modelin sunulmasıdır. Bobinler ıslatıldıktan sonra, laboratuvar ortamında süzülme ve makineye konulmaktadır. Bunun dışında bobinlerin kurutulması için gönderilen sıcak havanın bobinler ile rejime girmesi haliyle çok kısa da olsa zaman almaktadır. O yüzden başlangıç sıcaklık şartı olarak laboratuvar ortam sıcaklığının alınması bir sorun teşkil etmemektedir.

Makine çıkış sıcaklığı için (5.18) formunda eğriler uydurulmuş olup, her bir deney için tespit edilen katsayıların nümerik değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir. Burada zaman saniye cinsindendir.

$$T(^{\circ}C) = (1 + at)/(b + ct) \quad (5.18)$$

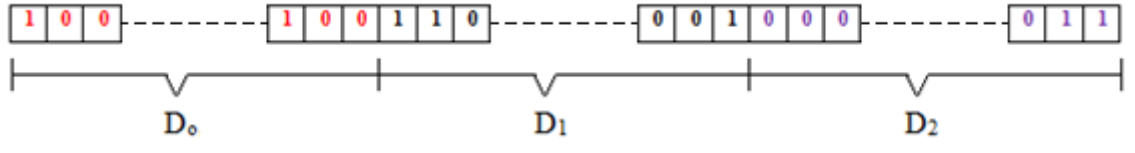
Tablo 5.6 Makine çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Deney şartları	$a \cdot 10^5$	b	$c \cdot 10^6$	R^2
1bar, 80°C	-1.5897	0.0292	-1.3870	0.8652
1bar, 90°C	-7.9363	0.0264	-2.3979	0.7970
1bar, 100°C	-8.5405	0.0261	-2.7624	0.8304
2bar, 80°C	-5.3231	0.0271	-1.8625	0.8303
2bar, 90°C	-7.5371	0.0250	-2.2448	0.8005
2bar, 100°C	5.0568	0.0276	-0.91880	0.9049
3bar, 80°C	7.4290	0.0274	0.13716	0.8805
3bar, 90°C	20	0.0289	1.3260	0.9346
3bar, 100°C	9.5804	0.0272	0.15612	0.9332

Çıkış sıcaklığının zamana bağlı değişimi bulunurken deney süresince alınan veriler baz alınmıştır. Denge nemi X_e lerin hesabında da deney süresi sonunda portmantiyer çıkışında okunan bağıl nem (RH) değerleri kullanılmıştır. Zaten kuruma sonunda portmantiyer çıkış nemindeki zamana bağlı değişim ihmal edilebilir mertebelere düşmektedir.

Ayrıca genetik işlemlerde seçim yöntemi olarak turnuva seçim yöntemi, çaprazlama türü olarak üç nokta çaprazlama kullanılmıştır. Popülasyon sayısı 30, gen sayısı 60, çaprazlama olasılığı 0.8, mutasyon olasılığı 0.025, turnuva seçim parametresi 1'dir. Literatürde mutasyon olasılık değeri olarak 0.025 değerine rastlanmış olup [33], tezde bu değerin büyük seçilmesinin nedeni kaybolan genetik bilginin geri çağırılmasını garanti altına almaktır.

Genetik algoritma programında optimumu aranan D_0 , D_1 ve D_2 değerleri, Şekil 5.14'deki gibi bir birey üzerinde gösterilmiştir. Bireyler 0 ve 1'lerden oluşan ikili kodlamayla oluşturulmuştur. Her biri 20 gen ile temsil edilen bu değerler 60 genlik bir bireyi oluşturmaktadır. D_0 'lar kendi aralarında, D_1 'ler kendi aralarında D_2 'ler kendi aralarında çaprazlanmıştır.

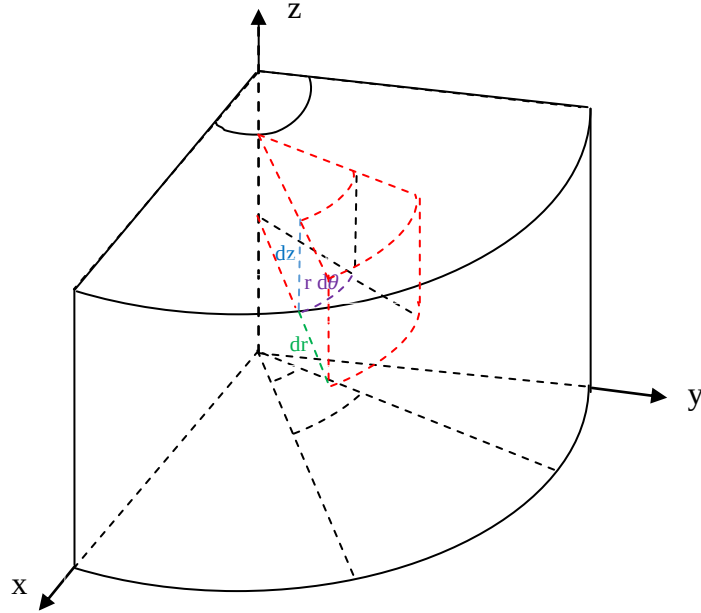


Şekil 5.10 D_0 , D_1 ve D_2 değerlerinin örnek bir birey üzerinde gösterimi

BÖLÜM 6

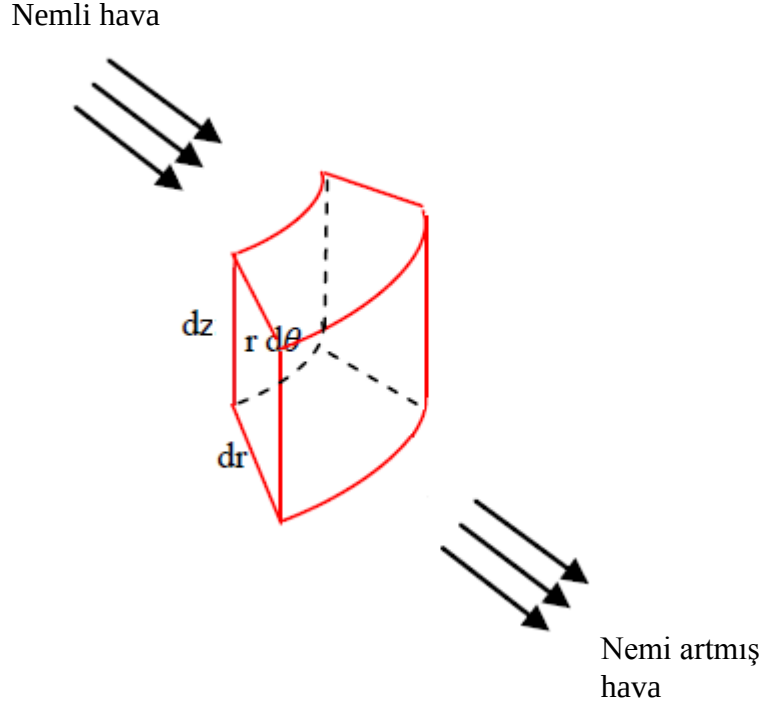
BOBINİN KURUMA DAVRANIŞINI MODELLEYEN İKİNCİ MATEMATİKSEL MODEL

Bobinin kuruma davranışı modeli çıkarılırken bobin içerisinde silindirik koordinatlarda bir diferansiyel eleman tanımlanmış, bu diferansiyel eleman üzerinde enerji eşitliği yazılarak ve bağımlı değişkenler arasında uygun bağıntılar kullanılarak, bobinin kuruması esnasında bobin içerisindeki sıcaklık dağılımını matematiksel olarak modelleyen bir model elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 6.1 Bobin içerisinde silindirik koordinatlarda tanımlanmış diferansiyel kontrol hacmi

6.1. Bobin İçerisinden Geçen Nemli Hava için Enerji Eşitliği



Şekil 6.2 Silindirik koordinatlarda diferansiyel kontrol hacmi

Kabuller:

- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir. Bu yüzden kontrol hacmine giren akışkanın birim kütlesinin taşıdığı enerji $e = h + ke + pe$ olup, hesaplamalarda $e = h = c_p T$ alınması doğru bir yaklaşım olacaktır. Bobin içerisinden akan hava hızı sabittir. Akışkanın kinetik enerji değişimi ihmal edilmiştir.
- Diferansiyel kontrol hacmi içinde akan hava ile su buharı ısı dengededir.
- Nemli hava içerisindeki su buharı ve kuru hava mükemmel gaz gibi düşünölmüştür.
- Havanın yoğunluğu ρ_A , sabit basınçta özgül ısısı c_{pA} ve su buharının sabit basınçta özgül ısısı c_{pB} ortalama sıcaklıkta sabit olarak alınacaktır.
- Enerji geçişi bir boyutlu olup, radyal yöndedir.

ρ_B su buharı yoğunluğu sabit kabul edilemez. Çünkü bobin içerisinde sürekli buharlaşma olmakta ve diferansiyel kontrol hacimdeki su buharı kütlesi buharlaşma hızına, bir diğer ifadeyle kuruma hızına bağlı olarak değişmektedir.

Diferansiyel kontrol hacmi için enerji eşitliği:

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ısıyla,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ışle,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{kütleye,r} + \dot{E}_{\ddot{u}} = \dot{E}_{depolanan} \quad (6.1)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ışle,r} = 0 \quad (6.2)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{kütleye,r} = (me)_{A,r} - \left[(me)_{A,r} + \frac{\partial}{\partial r} (me)_{A,r} dr \right] + (me)_{B,r} - \left[(me)_{B,r} + \frac{\partial}{\partial r} (me)_{B,r} dr \right] \quad (6.3)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{kütleye,r} = -\frac{\partial}{\partial r} [\rho_A u(r d\theta dz) c_{pA} T] dr - \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B u(r d\theta dz) c_{pB} T] dr \quad (6.4)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{kütleye,r} = -\rho_A u c_{pA} d\theta dz \frac{\partial}{\partial r} [rT] dr - u c_{pB} d\theta dz \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B rT] dr \quad (6.5)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ısıyla,r} = \left\{ \dot{Q}_r - \left(\dot{Q}_r + \frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} dr \right) \right\}_A + \left\{ \dot{Q}_r - \left(\dot{Q}_r + \frac{\partial \dot{Q}_r}{\partial r} dr \right) \right\}_B \quad (6.6)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ısıyla,r} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(-k_A r d\theta dz \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr - \frac{\partial}{\partial r} \left(-k_B r d\theta dz \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \quad (6.7)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ısıyla,r} = \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_A r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(k_B r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] d\theta dz dr \quad (6.8)$$

Denklemlerde A alt indisi havayı gösterirken, B alt indisi su buharını ifade etmektedir.

300K ile 400K sıcaklık değerleri arasında, havanın ısı iletim katsayısı k_A $26.3 \cdot 10^{-3} \frac{W}{mK}$ ile $33.8 \cdot 10^{-3} \frac{W}{mK}$ değerleri arasında, su buharının ısı iletim katsayısı k_B ise $19.6 \cdot 10^{-3} \frac{W}{mK}$ ile $27.2 \cdot 10^{-3} \frac{W}{mK}$ değerleri arasında değişmektedir [32].

Kabul:

- Havanın ve su buharının ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir.

k_A ve k_B sabit kabul edilirse, enerji denkleminde bağımlı değişkenler sıcaklık ve bobin içerisinde su buharı yoğunluğu olacaktır. Bir diğer alternatif ise k_A ve k_B nin sıcaklığa bağımlı değerlerinin bulunup söz konusu denklemde yerlerine yazılmasıdır. Bu problemi karmaşık hale getirecektir. k_A ve k_B nin ortalama sıcaklıkta değerlerinin alınması daha optimum bir çözüm olacaktır.

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{isilyla,r} = (k_A + k_B)d\theta dz dr \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (6.9)$$

$$\dot{E}_{\ddot{u}} = 0 \quad (6.10)$$

Diferansiyel eleman içinde depolanan enerji:

$$\dot{E}_{depolanan} = \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_A h_A + \rho_B h_B) \right) dV \quad (6.11)$$

$$= \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_A c_{pA} T + \rho_B c_{pB} T) \right) r dr d\theta dz$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{isilyla,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{i\ddot{s}le,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{k\ddot{u}tleyle,r} + \dot{E}_{\ddot{u}} = \dot{E}_{depolanan} \quad (6.12)$$

$$(k_A + k_B)d\theta dz dr \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] - \rho_A u c_{pA} d\theta dz \frac{\partial}{\partial r} [rT] dr$$

$$- u c_{pB} d\theta dz \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B rT] dr = \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_A c_{pA} T + \rho_B c_{pB} T) \right) r dr d\theta dz \quad (6.13)$$

$$(k_A + k_B) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] - \rho_A u c_{pA} \frac{\partial}{\partial r} [rT] - u c_{pB} \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B rT]$$

$$= r \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_A c_{pA} T + \rho_B c_{pB} T) \right) \quad (6.14)$$

$$\frac{1}{r} (k_A + k_B) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] - \rho_A u c_{pA} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rT] - u c_{pB} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B rT]$$

$$= \rho_A c_{pA} \frac{\partial T}{\partial t} + c_{pB} \frac{\partial (\rho_B T)}{\partial t} \quad (6.15)$$

$$\frac{1}{r} (k_A + k_B) \left[\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] - \rho_A u c_{pA} \frac{1}{r} \left[T + r \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$

$$- u c_{pB} \frac{1}{r} \left[rT \frac{\partial \rho_B}{\partial r} + \rho_B T + \rho_B r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (6.16)$$

$$= \rho_A c_{pA} \frac{\partial T}{\partial t} + c_{pB} \left[T \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \rho_B \frac{\partial T}{\partial t} \right]$$

(6.16) numaralı enerji denklemi bobin içerisinde katıyı içermeyen bir diferansiyel hacim üzerinden çıkarıldığı için kurumayı tam olarak modellememektedir. Bobine giren sıcak hava iplik fiberlerinin de iç enerjisinin artmasını sağlayacağından, katı matrisi içeren ve modifiye edilmiş bir enerji denkleminin yazılması daha doğru olacaktır. Bunun yanında kontrol hacmine giren net enerji depolanmanın yanında, söz konusu kontrol hacminde suyun sıvı fazından buhar fazına geçmesini de sağlayacaktır.

Katı fiberlerini de içeren modifiye edilmiş enerji denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{ısıyla,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{işle,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{kütleyle,r} + \cancel{\dot{E}_{\ddot{u}}} \quad (6.17)$$

$$= \dot{E}_{depolanan} + \dot{Q}_{buharlaşıma}$$

Gözeneklilik $\varepsilon = \frac{V_{boşluk}}{V_{toplam}}$ şeklinde ifade edilmekte olup $V_{boşluk}$ ipliklerin dışındaki hacim olarak alınacaktır.

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{kütleyle,r} = \left[-\rho_A u c_{pA} d\theta dz dr \frac{\partial}{\partial r} [rT] - u c_{pB} d\theta dz dr \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B rT] \right] \varepsilon \quad (6.18)$$

$$1 - \varepsilon = \frac{V_{iplik}}{V_{toplam}} \quad (6.19)$$

V_{iplik} : Bobinin içinde ipliğin kapladığı hacimdir.

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\zeta)_{ısıyla,r}$$

$$= \varepsilon \left[(k_A + k_B) d\theta dz dr \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \right] + (1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] d\theta dz dr \quad (6.20)$$

$$\dot{E}_{depolanan} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon (\rho_A h_A + \rho_B h_B) + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_{eff} T \right) \right) r dr d\theta dz \quad (6.21)$$

$$\dot{E}_{depolanan} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon (\rho_A c_{pA} T + \rho_B c_{pB} T) + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_{eff} T \right) \right) r dr d\theta dz \quad (6.22)$$

Nemli hava içerisindeki su buharı ve kuru hava mükemmel gaz gibi düşünülmüş, $h = c_p T$ ifadesi yazılmıştır. İçerisinde sıvı su ve havayı barındıran iplikler tarafından depolanan enerjiyi göstermek üzere yukarıdaki denklemde $(\rho c_p)_{eff} T$ ifadesi kullanılmıştır.

En genel halde malzemenin gözeneklerinin bir kısmı suyla, bir kısmı havayla dolu olması durumunda efektif ısınma ısısını aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$(\rho c_p)_{eff} = (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_{katı} + \varepsilon \left[Z (\rho c_p)_{sıvı} + (1 - Z) (\rho c_p)_{hava} \right] \quad (6.23)$$

$Z = 1 \Rightarrow$ Gözenekler tamamen sıvıyla dolu

$Z = 0 \Rightarrow$ Gözenekler tamamen havayla dolu

$$(6.23) \quad \text{eşitliğinin temeli} \quad (m c_p)_{toplam} = m_1 c_{p,1} + m_2 c_{p,2} + m_3 c_{p,3} + \dots$$

ifadesine dayanmaktadır. Z parametresi ise (6.24) eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$Z = \frac{\text{Nem miktarı (anlık)}}{\text{Gözeneklerin tamamı sıvıyla dolu iken toplam nem miktarı}} = \frac{\rho_{sıvı} V_{dolu\ gözenek}}{\rho_{sıvı} V_{gözenek}} \quad (6.24)$$

$$= \frac{V_{dolu\ gözenek}}{V_{gözenek}}$$

$$\varepsilon = \frac{V_{gözenek}}{V_{toplam}} \Rightarrow V_{gözenek} = \varepsilon V_{toplam} \quad (6.25)$$

$$Z = \frac{V_{dolu\ gözenek}}{V_{gözenek}} = \frac{V_{dolu\ gözenek}}{\varepsilon V_{toplam}} \quad (6.26)$$

$$V_{gözenek} = V_{dolu\ gözenek} + V_{boş\ gözenek} \quad (6.27)$$

$(\rho c_p)_{eff}$ ifadesi, içerdiği, zamana bağlı olarak 1 ile 0 arasında değişen Z terimi nedeniyle zamanın fonksiyonudur.

$$\dot{Q}_{buharlaşıma} = \dot{q}_{buharlaşıma} dV = \dot{q}_{buharlaşıma} r dr d\theta dz \quad (6.28)$$

$$(\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{ısıyla,r} + (\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi)_{kütleye,r} = \dot{E}_{depolanan} + \dot{Q}_{buharlaşıma} \quad (6.29)$$

Havanın yoğunluğu ρ_A , sabit basınçta özgül ısısı c_{pA} ve su buharının sabit basınçta özgül ısısı c_{pB} sabit kabul edilmişti.

$$\varepsilon \left[(k_A + k_B) d\theta dz dr \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \right] + (1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] d\theta dz dr$$

$$- \varepsilon \left[\rho_A u c_{pA} d\theta dz dr \frac{\partial}{\partial r} [rT] + u c_{pB} d\theta dz dr \frac{\partial}{\partial r} [\rho_B rT] \right] \quad (6.30)$$

$$= r d\theta dz dr \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon (\rho_A c_{pA} T + \rho_B c_{pB} T) + (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_{eff} T \right) \right)$$

$$+ \dot{q}_{buharlaşıma} r d\theta dz dr$$

Gerekli sadeleştirmeler ve düzenlemeler yapıldıktan sonra enerji denklemi aşağıdaki halini alır.

$$\frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$$- \frac{\varepsilon}{r} \left[(\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u \frac{\partial}{\partial r} (rT) + u c_{pB} (rT) \frac{\partial \rho_B}{\partial r} \right] \quad (6.31)$$

$$= \varepsilon (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon c_{pB} T \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho c_p)_{eff} T \right)$$

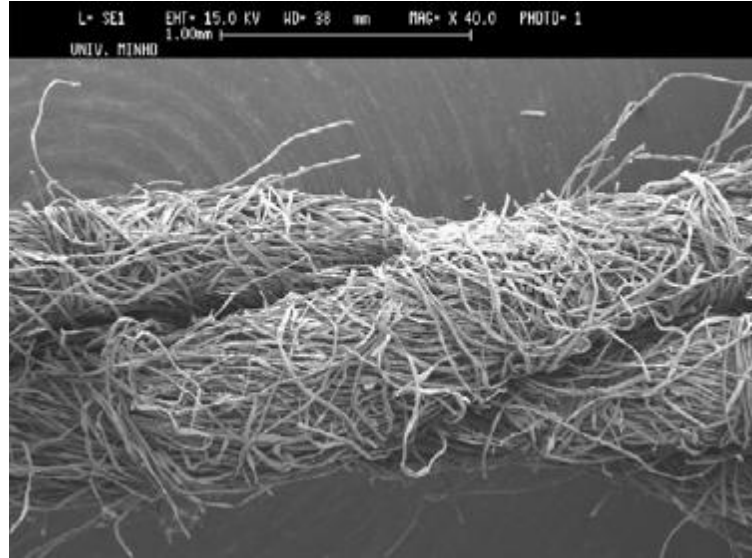
$$+ \dot{q}_{buharlaşıma}$$

(6.31) no'lu kısmi türevli diferansiyel denklemde sıcaklık ve su buharı yoğunluğu bağımlı değişkenler olduğundan, diferansiyel denklemin bu halde çözümü bize sıcaklık ve su buharı yoğunluğunun zamana ve konuma göre değişimini verecektir. Modelden beklenen ise sıcaklığın tespitidir.

(6.31) denkleminde $(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ ve $(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho c_p)_{eff} T \right)$ terimlerini farklı bir şekilde tanımlayalım. Öncelikle, bobinin gözenekliliğini $\varepsilon = \frac{V_{boşluk}}{V_{toplam}}$ olarak tanımlamıştık. İpliğin gözenekliliğini ve diğer oran terimlerini de aşağıdaki gibi tanımlayalım.

Kabul:

- Sıvı fazındaki su ipliklerin içerisindedir.
- İplik fiberlerden oluşmaktadır. Burada fiberler arasındaki boşluk ihmal edilmiş olup iplikteki katı matris dışındaki boşluk fiberler içerisindeki boşluk olarak kabul edilmiştir. Bu durumda ipliğin gözenekliliği fiberlerin gözenekliliğine eşit alınmıştır. Bu kabul altında, tezin geri kalan kısmında fiber ve iplik eş anlamlı kullanılacaktır ($V_{iplik} = V_{Toplam,f}$).



Şekil 6.3 295 g/km ipliğin elektron mikroskobundaki görüntüsü [34]

$$\varepsilon_f = \frac{V_{fiberlerdeki\ boşluk}}{V_{Toplam,f}} \quad (6.32)$$

ε_f : İplik fiberlerinin gözenekliliği (Fiberlerden oluşan ipliğin gözenekliliği)

$$\phi_A = \frac{V_A}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}} \quad (6.33)$$

ϕ_A : Fiberlerin (ipliğin) içerisindeki havanın kapladığı hacmin fiberlerin (ipliğin) içindeki toplam boşluk hacmine oranı (zamanın fonksiyonudur.)

V_A : Fiberlerin içerisindeki havanın kapladığı hacim (zamanın fonksiyonudur.)

$$\phi_{su} = \frac{V_{su}}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}} \quad (6.34)$$

ϕ_{su} : Fiberlerin (ipliğin) içerisindeki sıvı suyun kapladığı hacmin fiberlerin (ipliğin) içindeki toplam boşluk hacmine oranı (zamanın fonksiyonudur.)

V_{su} : Fiberlerin içerisindeki sıvı suyun kapladığı hacim (zamanın fonksiyonudur.)

$$V_{toplam} = V_{boşluk} + \frac{V_{Toplam,f}}{V_{fiberlerdeki\ boşluk} + V_{katı}} \quad (6.35)$$

$$V_{fiberlerdeki\ boşluk} = V_A + V_{su} \quad (6.36)$$

$$V_{toplam} = V_{boşluk} + V_A + V_{su} + V_{katı} \quad (6.37)$$

$$\phi_A = \frac{V_A}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}} \text{ ve } \phi_{su} = \frac{V_{su}}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}} \text{ olduğundan } \phi_A + \phi_{su} = 1 \text{ dir.}$$

$$\begin{aligned} & (1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ & = (1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial r} \left((1 - \varepsilon_f) k_k r \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon_f \left(\phi_A (k_A + k_B) r \frac{\partial T}{\partial r} + \phi_{su} k_{su} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \end{aligned} \quad (6.38)$$

k_k : Fiberlerin katı matrisinin ısı iletim katsayısı

k_A : Fiberler içerisindeki havanın ısı iletim katsayısı

k_B : Fiberler içerisindeki su buharının ısı iletim katsayısı

k_{su} : Fiberler içerisindeki sıvı suyun ısı iletim katsayısı

(6.38) eşitliğinde terimlerin fiziksel anlamları şu şekilde açıklanabilir:

$(1 - \varepsilon) = \frac{V_{toplam} - V_{boşluk}}{V_{toplam}}$ olup, içerisinde su ve/veya hava bulunduran fiberlerin

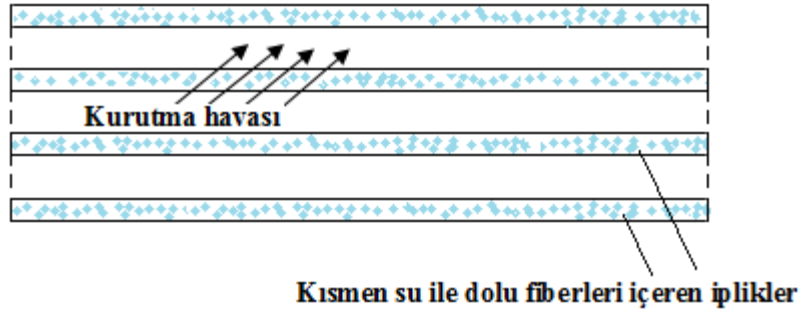
hacminin bobinin toplam hacmine oranını ifade eder. ε ifadesindeki $V_{boşluk}$ terimi

fiberler dışında bobinde hava ile dolu kısımların hacmini ifade etmektedir. $(1 - \varepsilon_f) =$

$\frac{V_{Toplam,f} - V_{fiberlerdeki\ boşluk}}{V_{Toplam,f}}$ olup, fiberlerin katı matris hacminin toplam fiber hacmine

oranıdır. (6.31) eşitliğindeki $\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ ifadesinin içerdği terimlerin fiziksel anlamı aşağıdaki denklem üzerinde açıklanmıştır.

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{Fiberlerden iletimle aktarılan ısı}} = \\
 & \underbrace{\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left((1-\varepsilon_f) k_k r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{Fiberlerin içerisindeki katı matris üzerinden iletimle aktarılan ısı}} \\
 & + \underbrace{\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_f \phi_A (k_A + k_B) r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{Fiberlerin içerisindeki hava boşluklarından iletimle aktarılan ısı}} \\
 & + \underbrace{\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_f \phi_{su} k_{su} r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{Fiberlerin içerisindeki sıvı fazındaki su üzerinden iletimle aktarılan ısı}}
 \end{aligned} \tag{6.39}$$



Şekil 6.4 Bobin içerisinde kurutma havasına maruz iplikler

Kabul:

- Ortalama kurutma sıcaklığı bobinin ilk haldeki sıcaklığı ile kurutma havası sıcaklıklarının ortalaması olmak üzere, k_k , k_A , k_B ve k_{su} bu ortalama sıcaklıkta sabit alınsın.

(6.39) eşitliğindeki sabit olan terimleri türev dışına çıkarır ve sadeleştirirsek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned}
\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = & \\
& \frac{1}{r} (1-\varepsilon) (1-\varepsilon_f) k_k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \\
& + \frac{1}{r} (1-\varepsilon) \varepsilon_f (k_A + k_B) \left(\phi_A \frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial \phi_A}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \phi_A r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \\
& + \frac{1}{r} (1-\varepsilon) \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} \frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \phi_{su} r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)
\end{aligned} \tag{6.40}$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında ise $\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ terimi aşağıdaki son halini alır.

$$\begin{aligned}
\frac{(1-\varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = & \\
\frac{1}{r} (1-\varepsilon) \left[r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \left((1-\varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) \phi_A + k_{su} \phi_{su} \right) + \right. & \\
\left. \frac{\partial T}{\partial r} \left((1-\varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) \left(\phi_A + r \frac{\partial \phi_A}{\partial r} \right) + \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) \right) \right] &
\end{aligned} \tag{6.41}$$

Benzer şekilde (6.31) eşitliğindeki $(1-\varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho c_p)_{eff} T \right)$ ifadesi yazılmış ve terimlerim fiziksel anlamları açıklanmıştır.

$$\begin{aligned}
\underbrace{(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} ((\rho c_p)_{eff} T)}_{\text{Fiberlerde depolanan ısı}} &= \underbrace{(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} ((1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k T)}_{\substack{\text{Fiberlerin içerisindeki} \\ \text{katı matriste} \\ \text{depolanan ısı}}} \\
&+ \underbrace{(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \phi_A (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) T)}_{\substack{\text{Fiberlerin içerisindeki} \\ \text{hava boşluklarında} \\ \text{depolanan ısı}}} \\
&+ \underbrace{(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \phi_{su} \rho_{su} c_{su} T)}_{\substack{\text{Fiberlerin içerisindeki} \\ \text{sıvı suda} \\ \text{depolanan ısı}}}
\end{aligned} \tag{6.42}$$

Kabul:

- Su buharının sabit basınçta özgül ısısı c_{pB} , havanın yoğunluğu ρ_A , sabit basınçta özgül ısısı c_{pA} ortalama sıcaklıkta sabit olarak alınmıştır. Fiberin katı matrisinin yoğunluğu ρ_k ve özgül ısınma ısı c_k ile fiberler içerisindeki sıvı fazdaki suyun yoğunluğu ρ_{su} ve özgül ısınma ısı c_{su} da ortalama sıcaklıkta sabit alınsın.

$$\begin{aligned}
\underbrace{(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} ((\rho c_p)_{eff} T)}_{\text{Fiberlerde depolanan ısı}} &= \underbrace{(1 - \varepsilon) (1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t}}_{\substack{\text{Fiberlerin içerisindeki} \\ \text{katı matriste} \\ \text{depolanan ısı}}} \\
&+ \underbrace{(1 - \varepsilon) \varepsilon_f \rho_A c_{pA} \frac{\partial}{\partial t} (\phi_A T) + (1 - \varepsilon) \varepsilon_f c_{pB} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_B \phi_A T)}_{\substack{\text{Fiberlerin içerisindeki} \\ \text{hava boşluklarında} \\ \text{depolanan ısı}}} \\
&+ \underbrace{(1 - \varepsilon) \varepsilon_f \rho_{su} c_{su} \frac{\partial}{\partial t} (\phi_{su} T)}_{\substack{\text{Fiberlerin içerisindeki} \\ \text{sıvı suda} \\ \text{depolanan ısı}}}
\end{aligned} \tag{6.43}$$

Yalnız bu modelde sıvı fazındaki su iplikler içerisindeki boşluklarda olup, buharlaşma ipliklerin içerisinde olmaktadır. Buharlaşma sıcaklığına kadar söz konusu boşluklardaki sıvı su sıcaklığı artacaktır. Yani (6.43) ifadesinde eşitliğin sağındaki üçüncü terim $T_0 < T < T_{\text{buharlaşma}}$ sıcaklıkları arasında geçerli olup bu süreçte $\phi_{su} = 1$ değerini alır. Benzer şekilde eşitliğin sağındaki ikinci terim buharlaşma sıcaklığına kadar $\phi_A = 0$ olduğundan sıfırdır. Fiberlerin içerisindeki hava boşluklarında su buharı ve kuru havanın depolama terimi buharlaşma sıcaklığı aşıldıktan sonra etkin hale gelecektir.

Bobin içinde buharlaşma sıcaklığına ulaşılma süresi kısa olduğundan (6.43) ifadesinde eşitliğin sağındaki üçüncü terim ihmal edilebilir. Havanın ve su buharının sabit basınçta özgül ısı ve yoğunluğu düşük olduğundan söz konusu ifadede eşitliğin sağındaki ikinci terimin de ihmal edilmesi yerinde bir karar olacaktır.

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho c_p)_{eff} T \right) = (1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.44)$$

(6.41) ve (6.44) eşitlikleriyle beraber (6.31) eşitliği gözenekli ortam olan bobin içerisindeki enerji geçişini ifade eden bir denklemdir. Gerekli düzenlemeler yapıldığında bu denklemde, sıcaklık T ve su buharı yoğunluğu ρ_B olmak üzere iki bağımlı değişken olacaktır. Şayet bobin içerisindeki su buharı yoğunluğu ρ_B diğer bağımlı değişken T'ye bağlı ifade edilebilirse, bu eşitlikler yardımıyla bobin içerisindeki, zamana ve r koordinatına bağlı T sıcaklığı bulunabilir.

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ & - \frac{\varepsilon}{r} \left[(\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u \frac{\partial}{\partial r} (rT) + u c_{pB} (rT) \frac{\partial \rho_B}{\partial r} \right] \end{aligned} \quad (6.31)$$

$$= \varepsilon (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon c_{pB} T \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho c_p)_{eff} T \right)$$

$$+ \dot{q}_{buharlaşma}$$

$$\frac{(1 - \varepsilon)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) =$$

$$\frac{1}{r} (1 - \varepsilon) \left[r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \left((1 - \varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f ((k_A + k_B) \phi_A + k_{su} \phi_{su}) \right) + \right. \quad (6.41)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \left((1 - \varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) \left(\phi_A + r \frac{\partial \phi_A}{\partial r} \right) + \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) \right) \right] \quad (6.44)$$

(6.41) ve (6.44) eşitlikleri ile ifade edilen ilgili terimlerin (6.31) enerji denklemi içerisine yerleştirilmesiyle enerji denklemi (6.45) eşitliğindeki formu alır.

$$\begin{aligned}
& \frac{\varepsilon}{r}(k_A + k_B) \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\
& + \frac{(1-\varepsilon)}{r} \left[r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \left((1-\varepsilon_f)k_k + \varepsilon_f((k_A + k_B)\phi_A + k_{su}\phi_{su}) \right) \right. \\
& \quad \left. + \frac{\partial T}{\partial r} \left((1-\varepsilon_f)k_k + \varepsilon_f(k_A + k_B) \left(\phi_A + r \frac{\partial \phi_A}{\partial r} \right) + \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) \right) \right] \\
& - \frac{\varepsilon}{r} \left[(\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u \frac{\partial}{\partial r} (rT) + u c_{pB} (rT) \frac{\partial \rho_B}{\partial r} \right] \\
& = \varepsilon (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon c_{pB} T \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \\
& + (1-\varepsilon)(1-\varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q}_{buharlaşma}
\end{aligned} \tag{6.45}$$

Eşitlik dzenlenirse aşağıdaki formu alır.

$$\begin{aligned}
& \frac{\varepsilon}{r}(k_A + k_B) \left(\frac{\partial T}{\partial r} + r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \\
& + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \left((1-\varepsilon_f)k_k + \varepsilon_f((k_A + k_B)\phi_A + k_{su}\phi_{su}) \right) (1-\varepsilon) \\
& + \frac{\partial T}{\partial r} \left((1-\varepsilon_f)k_k + \varepsilon_f(k_A + k_B) \left(\phi_A + r \frac{\partial \phi_A}{\partial r} \right) + \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) \right) \frac{(1-\varepsilon)}{r} \\
& - \frac{\varepsilon}{r} (\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u \left(T + r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\varepsilon}{r} u c_{pB} (rT) \frac{\partial \rho_B}{\partial r} \\
& = \varepsilon (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon c_{pB} T \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \\
& + (1-\varepsilon)(1-\varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q}_{buharlaşma}
\end{aligned} \tag{6.46}$$

$$\begin{aligned}
& \left[(1 - \varepsilon) \left((1 - \varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) \phi_A + k_{su} \phi_{su} \right) + \varepsilon (k_A + k_B) \right] \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \\
& + \left[\frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) \right. \\
& \quad \left. + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \left((1 - \varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) \left(\phi_A + r \frac{\partial \phi_A}{\partial r} \right) + \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) \right) \right] \frac{\partial T}{\partial r} \quad (6.47) \\
& \quad - \varepsilon (\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u \\
& - \left[\frac{\varepsilon}{r} (\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u + \varepsilon u c_{pB} \frac{\partial \rho_B}{\partial r} + \varepsilon c_{pB} \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right] T \\
& = \left[\varepsilon (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) + (1 - \varepsilon) (1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q}_{buharla\mathfrak{s}ma}
\end{aligned}$$

(6.47) eşitliğini basitleştirecek yardımcı ifadeler $\phi_A = \frac{V_A}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}}$,

$\phi_{su} = \frac{V_{su}}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}}$ şeklinde tanımlanmış olduklarından $\phi_A + \phi_{su} = 1$ olup,

$\phi_A = 1 - \phi_{su}$ şeklinde yazılabilir.

Kuruma sırasında fiberlerin içerisindeki boşlukta, sıvı suyun kapladığı hacimdeki değişim havanın kapladığı hacimdeki değişime eşit, fakat ters işaretlidir. Isı etkisiyle fiberlerin içerisinde buharlaşma olmakta, sıvı fazındaki su buhar fazına geçerek nemli havaya karışmakta ve havanın nemini arttırmaktadır. (6.47) eşitliğine $\partial \phi_A = -\partial \phi_{su}$ ve $\phi_A = 1 - \phi_{su}$ bağıntıları da uygulanırsa bağımlı değişkenlerden biri daha ortadan kalkar.

$$\begin{aligned}
& \left[(1 - \varepsilon) \left((1 - \varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) (1 - \phi_{su}) + k_{su} \phi_{su} \right) + \varepsilon (k_A + k_B) \right] \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \\
& + \left[\frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \left((1 - \varepsilon_f) k_k + \varepsilon_f (k_A + k_B) \left(1 - \phi_{su} - r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) + \varepsilon_f k_{su} \left(\phi_{su} + r \frac{\partial \phi_{su}}{\partial r} \right) \right) \right] \frac{\partial T}{\partial r} \quad (6.48) \\
& \quad - \varepsilon (\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u \\
& - \left[\frac{\varepsilon}{r} (\rho_A c_{pA} + c_{pB} \rho_B) u + \varepsilon u c_{pB} \frac{\partial \rho_B}{\partial r} + \varepsilon c_{pB} \frac{\partial \rho_B}{\partial t} \right] T \\
& = \left[\varepsilon (\rho_A c_{pA} + \rho_B c_{pB}) + (1 - \varepsilon) (1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q}_{buharla\mathfrak{s}ma}
\end{aligned}$$

$$\phi_{su} = \frac{V_{su}}{V_{fiberlerdeki\ boşluk}}, \quad \varepsilon_f = \frac{V_{fiberlerdeki\ boşluk}}{V_{toplam,f}}, \quad (1 - \varepsilon) = \frac{V_{toplam,f} - V_{boşluk}}{V_{toplam}}$$

eşitliklerinden yararlanılarak, $\phi_{su} = \frac{V_{su}}{\varepsilon_f V_{toplam,f}} = \frac{V_{su}}{\varepsilon_f (1 - \varepsilon) V_{toplam}}$ ifadesi elde edilir. Bu ifadedeki V_{su} fiberlerin içerisinde sıvı fazındaki suyun kapladığı hacmi, V_{toplam} ise bobinin toplam hacmini ifade etmektedir.

$$m_{su} = \rho_{su} V_{su} \Rightarrow V_{su} = \frac{m_{su}}{\rho_{su}} \Rightarrow \phi_{su} = \frac{\frac{m_{su}}{\rho_{su}}}{\varepsilon_f(1 - \varepsilon)V_{toplaml}} \quad (6.49)$$

$$= \frac{1}{\rho_{su} \varepsilon_f(1 - \varepsilon)V_{toplaml}} m_{su}$$

(6.48) eşitliği gözenekli ortamdaki kuruma sürecini modelleyen bir ifadedir. Yalnız burada daha sonraki sayfalarda tespit edilen termofiziksel özelliklere bakıldığında bazı terimlerin ihmal edilebileceği görülmüştür.

Termokupllar bobine güçlkle batırılabilmiştir. Bobinin geçirgenliği çok düşüktür. Bu da iplikler arası boşluklarda hava hızının düşük olacağı, yani (6.31) temel denkleminde hıza bağlı aktarım terimlerinin ihmal edilebileceği anlamına gelmektedir.

İpliğin efektif özelliklerinin tespitinde kullanılan ϕ_{su} ve ϕ_A terimleri 0 ile 1 arasında değişmektedir. İpliğin içerisindeki hava boşluklarından iletimle ısı aktarım terimi modelin diğer iletimle ısı aktarım terimleri yanında ihmal edilebilir. İpliğin efektif ısıl iletkenliği teriminde kendini gösteren iplik içi boşluklardaki sıvı su üzerinden iletimle ısı aktarım terimi en büyük değerini $\phi_{su} = 1$ iken almaktadır. Bu da buharlaşma sıcaklığına erişilene kadar sürer. Buharlaşma sıcaklığına ulaşma süresi kısadır. Ayrıca buharlaşma başladıktan sonra ϕ_{su} değeri 1'den 0'a kadar azalacağından söz konusu terim zamanla azalan bir etkiye sahiptir. Bu durumda problemi basitleştirmek adına bu terim de ihmal edilebilir. Zira bu modelde amaçlanan bobin içi sıcaklık dağılımının tahmini için bir yaklaşım ileri sürmektir.

Diğer yandan, aktarım terimlerinin ihmal edilmesi üzerine, bobin boyunca su buharındaki zamana bağlı değişim bize buharlaşma miktarını verecektir.

$$\dot{q}_{buharlaşma} = -\Delta H \frac{\partial \rho_B}{\partial t} = -\Delta H \frac{\partial \rho_B}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.50)$$

Modelin iskeletini oluşturan (6.30) eşitliğine bakıldığında ipliğin katı matrisinin depolama terimi yanında iplik dışı boşluklarda kuru havanın ve su buharının depolama terimleri ihmal edilebilir.

Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında temel denklem aşağıdaki formu alır.

$$\frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} (1 - \varepsilon_f) k_k \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) =$$

$$(1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta H \frac{\partial \rho_B}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.51)$$

$$\left[\frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} (1 - \varepsilon_f) k_k \right] \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) =$$

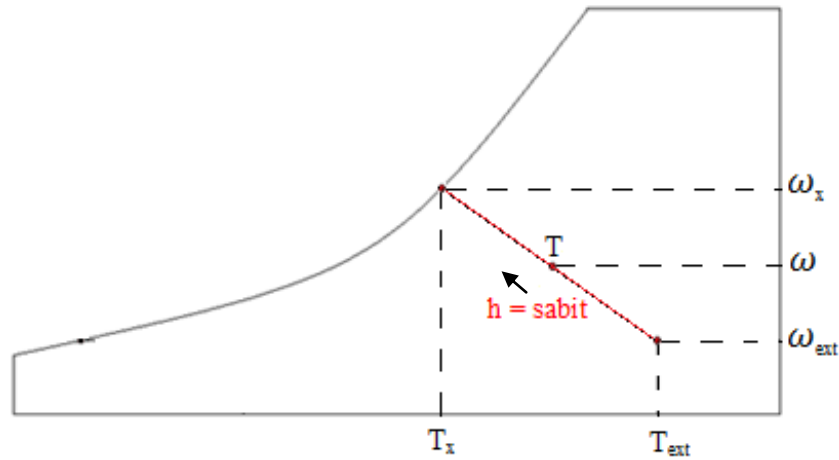
$$(1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta H \frac{\partial \rho_B}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.52)$$

İncelenen kontrol hacminde zamanla gözeneklerdeki sıvı miktarı azalmakta, su buharı kurutma havasına karışarak kurutma havasının özgül nemini arttırmaktadır. Burada havanın özgül nemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\omega = \frac{m_{nem}}{m_{kuru\ hava}} = \frac{\rho_B}{\rho_A} \quad (6.53)$$

ρ_B : Gaz fazındaki suyun yoğunluğu

Kurutma süresince sabit entalpide sıcaklığı düşen havanın özgül nemi sıcaklığa bağlıdır. Yani incelenen kontrol hacminde belirli bir sıcaklıkta havanın taşıdığı nem miktarı belli olup, havadaki su buharı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı olarak ifade edilmesi (6.52) denklemindeki bağımlı değişken sayısını düşürecektir.



Şekil 6.5 Kurutma havasının sabit entalpide nemlenmesi

Üçgen benzerliğinden yararlanarak havanın özgül nemi (6.55) formunda T (°C) sıcaklığına bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$\frac{\omega - \omega_{ext}}{\omega_x - \omega_{ext}} = \frac{T_{ext} - T}{T_{ext} - T_x} \quad (6.54)$$

$$\omega = a_1 + b_1 T \quad (6.55)$$

$$a_1 = \omega_{ext} + (\omega_x - \omega_{ext}) \frac{T_{ext}}{T_{ext} - T_x} \quad (6.56)$$

$$b_1 = -\frac{(\omega_x - \omega_{ext})}{T_{ext} - T_x} \quad (6.57)$$

Literatürde de havanın özgül nemi için $\omega = a_1 + b_1 T$ formuna uyan bağıntılara rastlanmıştır [35,36].

$$\omega = \frac{\rho_B}{\rho_A} = a_1 + b_1 T \Rightarrow \frac{\partial \rho_B}{\partial T} = \rho_A b_1 \quad (6.58)$$

$$\left[\frac{\varepsilon}{r} (k_A + k_B) + \frac{(1 - \varepsilon)}{r} (1 - \varepsilon_f) k_k \right] \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \quad (6.59)$$

$$(1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta H \rho_A b_1 \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$K_1 = \varepsilon(k_A + k_B) + (1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_f) k_k \quad (6.60)$$

$$K_2 = (1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_f) \rho_k c_k \quad (6.61)$$

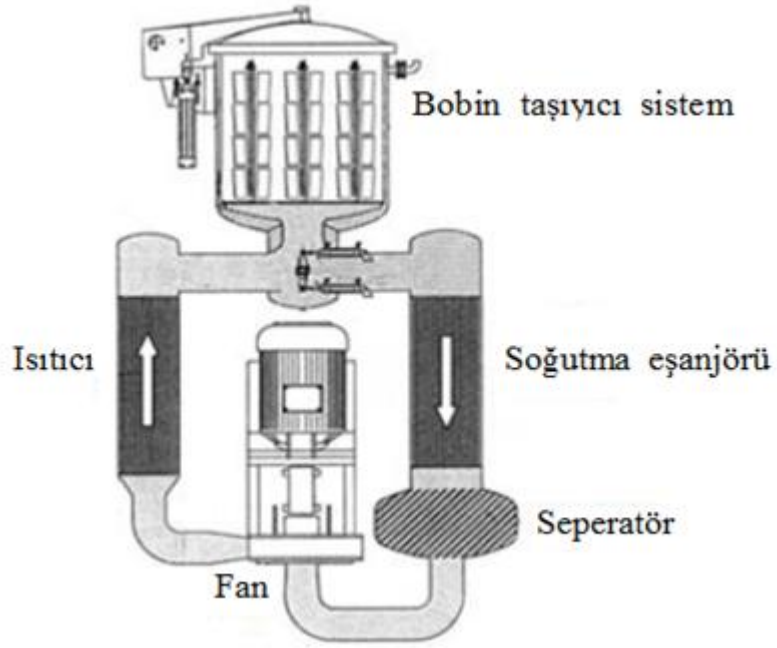
$$K_3 = -\Delta H \rho_A b_1 \quad (6.62)$$

$$\frac{K_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = (K_2 + K_3) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.63)$$

$$T(r, t) = \left[C_1 J_0 \left(\frac{\lambda}{\sqrt{K_1}} r \right) + C_2 Y_0 \left(\frac{\lambda}{\sqrt{K_1}} r \right) \right] e^{-\frac{\lambda^2}{K_2 + K_3} t} \quad (6.64)$$

6.2. Fiziksel ve Termofiziksel Özelliklerin Tespiti

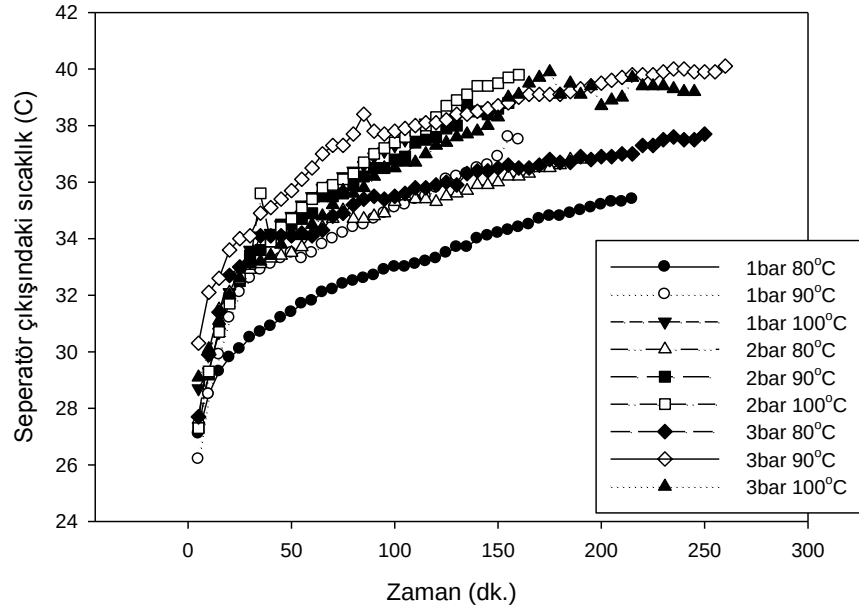
6.2.1. Su Buharı Yoğunluğunun Sıcaklığa Bağlı İfadesinde Gerekli Parametrelerin Tespiti



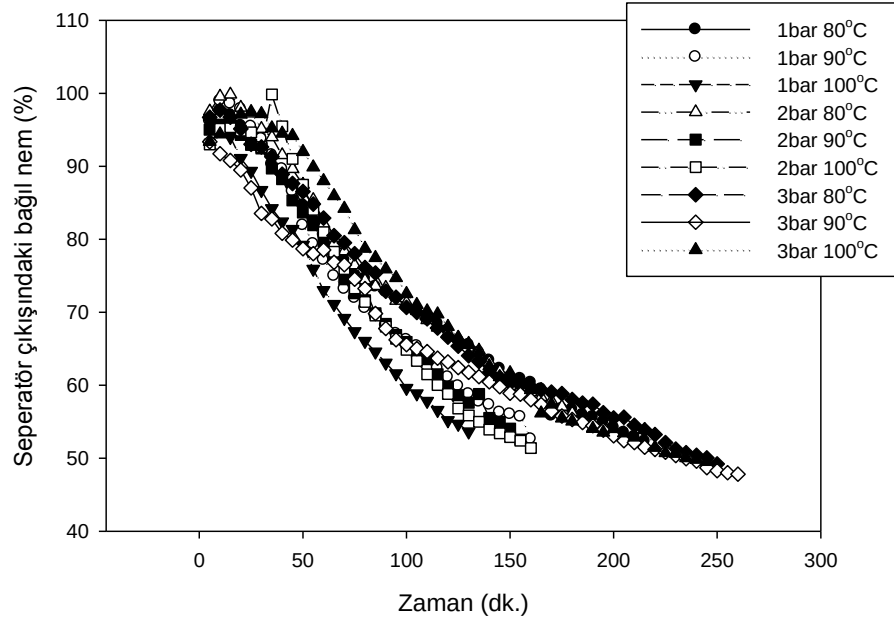
Şekil 6.6 Bobin kurutma cihazının şematik görünüşü [37]

Kurutma cihazımızda hava kapalı bir çevrimde dolaşmakta, ısıtıcıya gelmeden önce sırasıyla seperatör ve fandan geçmektedir. Portmantiyere (bobin taşıyıcı sisteme) T_{ext} sıcaklığında giren havanın bağıl nemi, dolayısıyla da portmantiyere giren kurutma havasının şartları seperatör çıkışındaki sıcaklık ve bağıl nemin ortalama değerleri kullanılarak bulunabilir.

Elimizdeki deneysel verilerden seperatör çıkış sıcaklık ve bağıl neminin zamana bağlı değişimi Sigma-Plot programı kullanılarak elde edilmiştir.



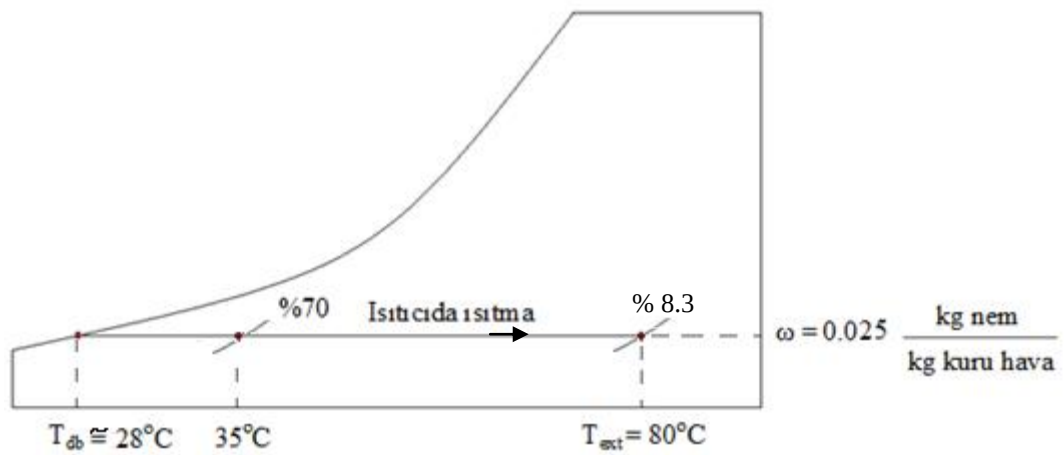
Şekil 6.7 İçten dışa kurutmada seperatör çıkış sıcaklığı-zaman grafiği



Şekil 6.8 İçten dışa kurutmada seperatör çıkışındaki bağıl nem-zaman grafiği

Grafiklerden de görüldüğü üzere, tüm deneyler için seperatör çıkışındaki havanın bağıl nemi ortalama %70 civarındadır. Ortalama seperatör çıkış sıcaklığı kurutma havasının 1 bar, 80°C şartı için 32°C, diğer haller için 36°C alınabilir. O halde tüm deneysel veriler için seperatör çıkışındaki ortalama sıcaklığı 35°C, ortalama bağıl nemi ise %70 almak doğru bir yaklaşım olacaktır.

$$\left. \begin{array}{l} T_{\text{seperatör çıkış}} = 35^{\circ}\text{C} \\ \varphi_{\text{seperatör çıkış}} = \%70 \end{array} \right\} \Rightarrow \omega = 0.025 \frac{\text{kg nem}}{\text{kg kuru hava}} \quad (6.65)$$



Şekil 6.9 Psikrometrik diyagramda havanın ısıtılması

Seperatör çıkışı ısıtma eşanjöründe ısıtılan havanın özgül nemi değişmez. Su buharı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı ifadesinin tespit edilmesi amacıyla (6.56) ve (6.57) eşitlikleri ile psikrometrik diyagramda sabit entalpide nemlenen kurutma havasının oluşturduğu benzer üçgenlerden yararlanılarak her bir kurutma havası sıcaklığı için a_1 ve b_1 katsayıları tespit edilmiş ve Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Özgül nemin sıcaklığa bağlı ifadesindeki sabitler

T_{ext}	a_1	b_1
80°C	0.05791	- 4.1139·10 ⁻⁴
90°C	0.06109	- 4.01·10 ⁻⁴
100°C	0.06623	- 4.1237·10 ⁻⁴

a_1 ve b_1 katsayılarının basınçla çok az değiştiği görülmüş, modelde tüm deney şartları için $P_{eff} = 1$ bar iken elde edilen katsayılar kullanılmıştır.

Dikkat edilmesi gereken bir husus ise deneylerdeki basınç değerlerinin mutlak basınç değil, efektif basıncı ifade ettiğidir. a_1 ve b_1 katsayılarının tespitinde CYTSoft Psychrometric Chart 2.2 Demo programından yararlanılmıştır.

6.2.2. İpliğe Ait Fiziksel Özelliklerin Tespiti

Tablo 6.2 Yün ve orlona ait fiziksel özellikler

Özellik	Referans
$\rho_{yün} = 1.32 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$ $k_{yün} = 0.052 \frac{W}{mK}$ $c_{yün} = 1.382 \frac{kJ}{kgK}$	[38, 29, 39]
$\rho_{orlon} = 1.19 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$ $k_{orlon} = 0.18 \frac{W}{mK}$ $c_{orlon} = 1450 \cdot 10^{-3} \frac{kJ}{kgK}$	[30]

%65 yün %35 orlondan oluşan ipliğin termofiziksel özellikleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$k_k = \underbrace{0.65 \cdot k_{yün} + 0.35 \cdot k_{orlon}}_{\text{Paralel model}} = 0.0968 \frac{W}{mK} \quad [4] \quad (6.66)$$

$$\rho_k = 0.65 \cdot \rho_{yün} + 0.35 \cdot \rho_{orlon} = 1.2745 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3} \quad [1] \quad (6.67)$$

$$\rho_k c_k = 0.65 \cdot (\rho_{yün} c_{yün}) + 0.35 \cdot (\rho_{orlon} c_{orlon}) \Rightarrow c_k = 1.4 \frac{kJ}{kgK} \quad (6.68)$$

6.2.3. Bobinin ve İpliğin Gözenekliliklerinin Hesaplanması

Çalışmada kullanılan ipliğin numarası 13Nm (Numara metrik) olup literatürden alınan aşağıdaki eşitlikler yardımıyla teorik olarak hesaplanmıştır.

$$Ne \text{ cinsinden} = \frac{Nm}{1.693} \cong 7.68Ne \quad [40] \quad (6.69)$$

$$\text{İplik çapı (mm)} = \frac{1.08}{\sqrt{\text{ipik no (Ne)}}}, \quad R^2 = 0.942 \quad [41] \quad (6.70)$$

$$\text{İplik çapı} = 0.39\text{mm}$$

Deneylerde %65 yün %35 orlon iplikten oluşan 8 adet bobin kurutulmuştur. Yapılan deneylerde 8 bobinin kuru haldeki ağırlıklarının 8523.5 g olduğu görüldü. Bir bobinin kuru haldeki kütlesi 1065.44 g'dır. 94.5 g olan bobin makarasının ağırlığı bir bobinin kuru kütlesinden çıkarıldığında ise bir bobindeki ipliğin kütlesi 970.94 g olarak bulunur. Deneylerde kullanılan bobin hafif konik formda olduğundan, bobinin dış çapı için söz konusu iki farklı çap değerinin ortalaması alınarak, hesaplamalarda 16 cm olarak ortalama bir dış çap değeri alınmıştır. Bu durumda bobinin geometrik ölçüleri aşağıda verildiği gibidir.

Bobinin geometrik ölçüleri:

$$\left. \begin{array}{l} r_i (\text{iç yarıçap}) = 2.7 \text{ cm} \\ r_d (\text{dış yarıçap}) = 8 \text{ cm} \\ h (\text{yükseklik}) = 15.5 \text{ cm} \end{array} \right\} V_{\text{toplaml}} (\text{bobin hacmi}) = 2.7614 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (6.71)$$

Bobinde kullanılan ipliğin uzunluğu aşağıdaki gibi elde edilebilir [42].

$$Nm = \frac{L(m)}{m_{\text{ipik}}(g)} \Rightarrow L = 13 \cdot 970.94 \cong 12622\text{m} \quad (6.72)$$

Bobinde ipliğin kapladığı hacim:

$$V_{\text{ipik}} = \frac{\pi d^2}{4} L = \frac{\pi (0.39 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} 12622\text{m} = 1.507812 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (6.73)$$

$$m_{\text{ipik}} = \rho_{\text{ipik}} V_{\text{ipik}} \Rightarrow \rho_{\text{ipik}} = \frac{0.97094 \text{ kg}}{1.507812 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \cong 644 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (6.74)$$

İplik katı matris ve boşluk kısmından oluşmaktadır. Daha önce bulunan $\rho_k = 1.2745 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ değeri ipliği oluşturan katı matrisin yoğunluğu olduğundan, $\rho_{\text{ipik}} < \rho_k$ olması beklenen bir sonuçtur.

Bobinin gözenekliliği (6.75)'deki gibi bulunur.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{toplaml}}(\text{bobin hacmi}) - V_{\text{iplik}}}{V_{\text{toplaml}}(\text{bobin hacmi})} = 0.4539 \quad (6.75)$$

İpliğin gözenekliliği ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \frac{V_{\text{iplik}} - V_{\text{katı}}}{V_{\text{iplik}}} = \frac{V_{\text{iplik}} - \frac{m_k}{\rho_k}}{V_{\text{iplik}}} = \frac{1.507812 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 - \frac{0.97094 \text{ kg}}{1.2745 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}{1.507812 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \\ &= 0.495 \end{aligned} \quad (6.76)$$

6.2.4. İpliğin İçerisindeki Suyu Buharlaştırmak için Gerekli Buharlaşma Enerjisinin Tespiti

A. K. HAGHI'nin yaptığı çalışmadan yararlanarak iplik fiberlerinin içerisindeki suyu buharlaştırmak için gereken buharlaşma gizli ısısı aşağıdaki gibi bulunmuştur [3].

Gözenekli orlon fiberi için sorpsiyon ısısı:

$$\Delta H_{\text{orlon}} = 2522 \text{ kJ/kg} \quad (6.77)$$

Yün için sorpsiyon ısısı:

$$\Delta H_{\text{yün}} = [1602.5 \cdot \exp(-11.72W_c) + 2522] \text{ kJ/kg} \quad (6.78)$$

$$W_c(\text{Fiberlerdeki su içeriği}) = \frac{C_f \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\rho_{\text{yün}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \quad (6.79)$$

C_f : Fiberlerin içerisindeki su buharı konsantrasyonu

Bu çalışmada C_f , ipliğin içerisindeki su konsantrasyonu yerine kullanılmıştır. Bobin içerisindeki nem, ipliklerin içerisinde depolanmaktadır. $W_{c,\min} \cong 0$ alınabilir. Bu durumda minimum su içeriği için gerekli buharlaşma enerjisini ifade eden $\Delta H_{\text{yün},\min} = 4124.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ olur. İpliklerdeki suyun maksimum seviyede olması demek, ipliklerdeki boşlukların tamamının su ile dolu olması demektir.

$$C_f = C_{f,\max} \Rightarrow V_{\text{ipliklerdeki boşluk}} = V_{\text{su}} \quad (6.80)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \frac{V_{\text{ipliklerdeki boşluk}}}{V_{\text{iplik}}} = \frac{V_{\text{su}}}{1.507812 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 0.495 \\ &\Rightarrow V_{\text{su}} = 7.463669 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (6.81)$$

$$C_f = \frac{m_{\text{su}}}{V_{\text{iplik}}} \quad (6.82)$$

Kurutma havası 80°C iken suyun yoğunluğu, 20°C ortam havası ve kurutma havasının ortalaması olan 50°C’de 988kg/m³ olarak bulunmuştur.

$$C_{f,max} = \frac{\rho_{su} V_{su}}{V_{iplik}} = \rho_{su} \varepsilon_f = 988 \frac{kg}{m^3} 0.495 = 489.06 \frac{kg}{m^3} \quad (6.83)$$

$$W_{c,max} = \frac{C_{f,max}}{\rho_{yün}} = \frac{489.06 \frac{kg}{m^3}}{1.32 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}} = 0.3705 \quad (6.84)$$

Bulunan maksimum fiberlerdeki su içeriği değerine karşılık gelen buharlaşma enerjisi ise aşağıdaki gibi tespit edilir.

$$\Delta H_{yün,max} = 2542.84 \frac{kJ}{kg} \quad (6.85)$$

Suyu ipliklerin içerisindeki yünden buharlaştırmak için gerekli enerji, söz konusu buharlaştırma enerjisinin minimum ve maksimum değerlerinin ortalaması alınarak bulunur.

$$\Delta H_{yün} = \frac{\Delta H_{yün,min} + \Delta H_{yün,max}}{2} = 3333.67 \frac{kJ}{kg} \quad (6.86)$$

İplikler %65 yünden, %35 orlondan oluştuğundan modelde kullanılacak olan ΔH değeri,

$$\Delta H = 0.65 \Delta H_{yün} + 0.35 \Delta H_{orlon} = 3049.585 \frac{kJ}{kg} \quad (6.87)$$

şeklinde bulunur. Benzer işlemler kurutma havasının 90°C ve 100°C değerleri için yapılarak bulunan buharlaşma enerjisinin değerleri Tablo 6.3’e yazılmıştır.

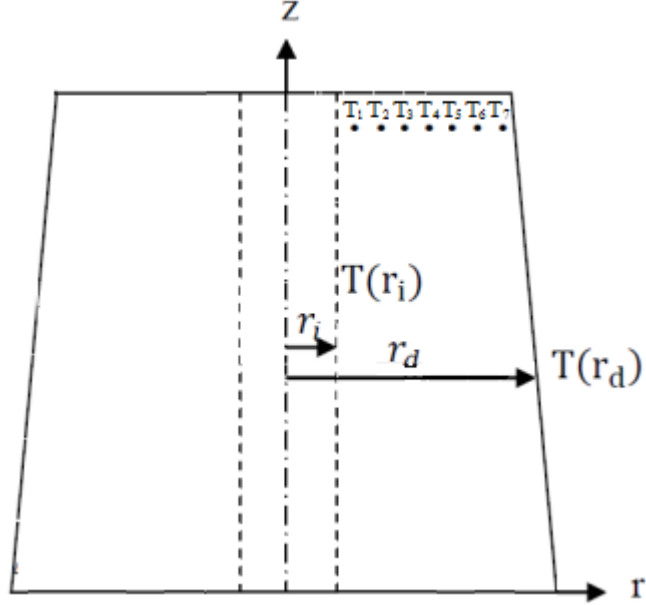
Bulunan sabitler yerlerine konulmuş, modelin kısmi türevli diferansiyel denklemini Matlab Programı kullanılarak uygun sınır ve başlangıç şartları altında çözülmüştür.

Tablo 6.3 Fiziksel ve termofiziksel özellikler

	Kurutma Havaşı Sıcaklıkları (°C)		
Özellik	80°C ($T_{ort} \cong 50^\circ C$)	90°C ($T_{ort} \cong 55^\circ C$)	100°C ($T_{ort} \cong 60^\circ C$)
a_1	0.05791	0.06109	0.06623
b_1	$-4.1139 \cdot 10^{-4}$	$-4.01 \cdot 10^{-4}$	$-4.1237 \cdot 10^{-4}$
$c_{pA} (J/kgK)$	1008	1008.1	1008.3
$c_{pB} (J/kgK)$	1899.8	1907.8	1916.67
$c_k (J/kgK)$	$1.4 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^3$
$c_{su} (J/kgK)$	4181.2	4183.2	4185.26
$\Delta H (J/kg)$	$3049.585 \cdot 10^3$	$3049.676 \cdot 10^3$	$3049.735 \cdot 10^3$
$k_A (W/mK)$	$28.002 \cdot 10^{-3}$	$28.372 \cdot 10^{-3}$	$28.7531 \cdot 10^{-3}$
$k_B (W/mK)$	$21.18 \cdot 10^{-3}$	$21.54 \cdot 10^{-3}$	$21.889 \cdot 10^{-3}$
$k_k (W/mK)$	0.0968	0.0968	0.0968
$k_{su} (W/mK)$	$643 \cdot 10^{-3}$	$648 \cdot 10^{-3}$	$653.78 \cdot 10^{-3}$
ε	0.4539	0.4539	0.4539
ε_f	0.495	0.495	0.495
$\rho_A (kg/m^3)$	1.0849	1.0682	1.0510
$\rho_{su} (kg/m^3)$	988	985	983
$\rho_k (kg/m^3)$	$1.2745 \cdot 10^3$	$1.2745 \cdot 10^3$	$1.2745 \cdot 10^3$

$c_{pA} (J/kgK)$, $c_{pB} (J/kgK)$, $c_{su} (J/kgK)$, $k_A (W/mK)$, $k_B (W/mK)$, $k_{su} (W/mK)$, $\rho_A (kg/m^3)$ ve $\rho_{su} (kg/m^3)$ termofiziksel özellikleri ortalama sıcaklık değerleri için tespit edilmiştir [43].

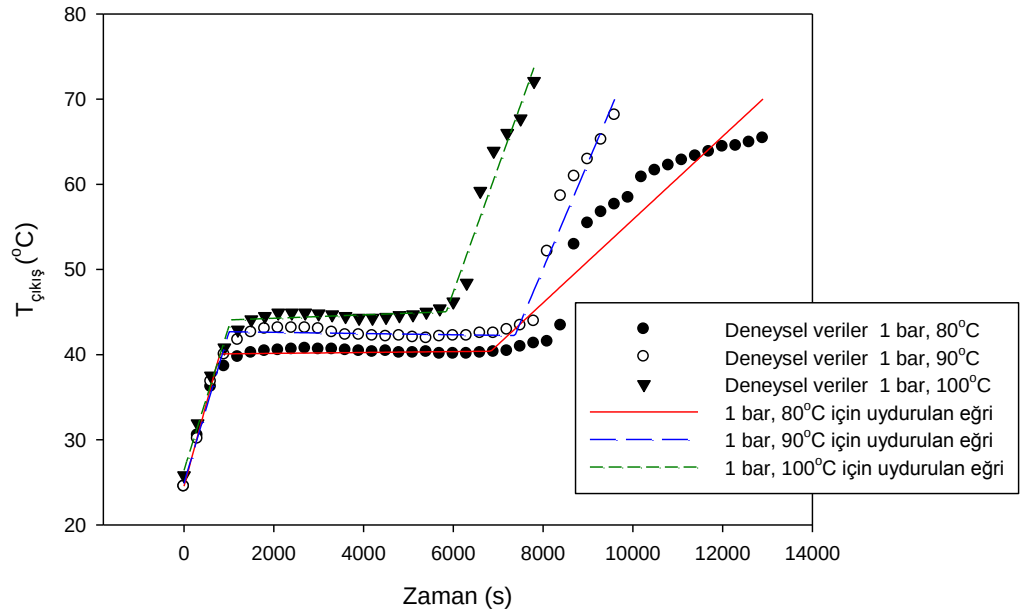
6.3. Sınır ve Başlangıç Şartlarının Belirlenmesi



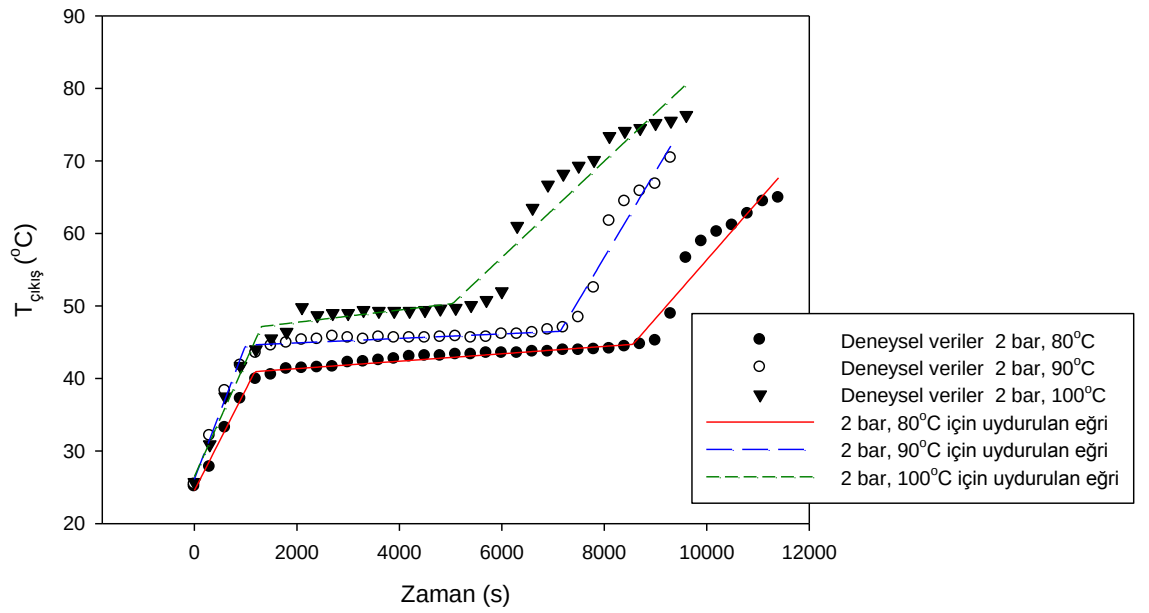
Şekil 6.10 İplik bobininin şematik görünüşü

Bobinin içten dışa kurutulması hali ve kurutma havasının çeşitli sıcaklık ve basınç değerleri için yapılmış deneysel veriler kullanılarak, bobinin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla makine çıkış sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimine SigmaPlot programında eğri uydurulmuştur.

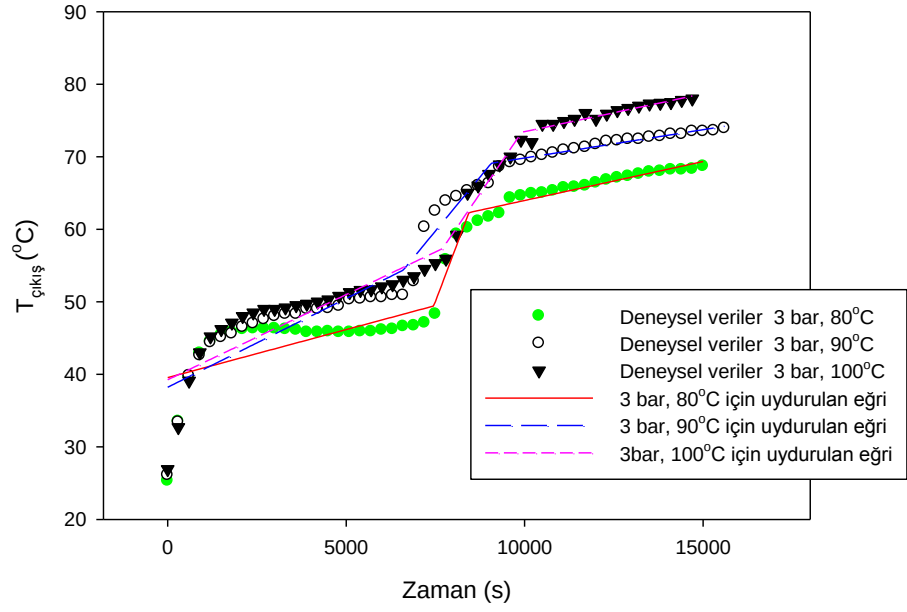
İncelenen zaman aralığı için makine çıkış sıcaklığı ile bobinin en dış kısmından ölçülen T_7 sıcaklığı birbirlerine pek yakındır. Kurutma havasının 1 bar 80°C değeri için deneysel verilere bakıldığında görülmüştür ki bobin dış yüzey sıcaklığı sınır şartı için söz konusu T_7 sıcaklık değerlerine uydurulan eğri deneysel verilere daha az yakınsamaktadır. Diğer bir yandan termokupllar bobine batırılarak ölçüm yapılmaktadır. Bu nedenlerden ötürü bobinin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişiminin elde edilebilmesi için makine çıkış sıcaklık verilerinden yararlanılması daha uygundur.



Şekil 6.11 İçten dışı kurutmada kurutma havasının 1 bar basınç değeri için bobin dışı yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi



Şekil 6.12 İçten dışı kurutmada kurutma havasının 2 bar basınç değeri için bobin dışı yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi



Şekil 6.13 İçten dışa kurutmada kurutma havasının 3 bar basınç değeri için bobin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Bobin dış yüzey sıcaklığının zamanla değişimini veren sınır şartı için SigmaPlot programında (6.88) eşitliğinde verilen formda eğri uydurulmuştur. Eşitlikte T sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$ cinsinden iken t zamanı saniye cinsindendir.

$$t_o = t_{\min}$$

$$t_3 = t_{\max}$$

$$T = \frac{y_1(t_1 - t) + y_2(t - t_o)}{(t_1 - t_o)} \quad t_o \leq t \leq t_1$$

$$T = \frac{y_2(t_2 - t) + y_3(t - t_1)}{(t_2 - t_1)} \quad t_1 < t \leq t_2 \quad (6.88)$$

$$T = \frac{y_3(t_3 - t) + y_4(t - t_2)}{(t_3 - t_2)} \quad t_2 < t \leq t_3$$

Tablo 6.4 Çeşitli kurutma şartlarında bobin dış yüzey sıcaklığı için uydurulan eğriler

Kurutma Havası Şartı	y_1	y_2	y_3	y_4	t_o	t_3	t_1	t_2	Determinasyon katsayısı (R^2)
1 bar, 80°C	24.5500	40.0833	40.3936	70.0104	0	12900	796.5773	6836.4677	0.9560
1 bar, 90°C	24.8700	42.6813	42.2345	69.9750	0	9600	1004.3938	7374.4029	0.9840
1 bar, 100°C	26.4100	44.0793	45.0316	73.6893	0	7800	1047.5870	5844.4813	0.9837
2 bar, 80°C	24.5700	40.9461	44.7163	67.6691	0	11400	1178.1340	8559.5900	0.9812
2 bar, 90°C	26.0900	44.5986	46.5052	72.0583	0	9300	1002.2708	7142.0238	0.9833
2 bar, 100°C	26.4800	47.1607	50.3304	80.5684	0	9600	1308.9059	5039.4888	0.9738
3 bar, 80°C	39.5495	49.4280	62.2970	69.3415	0	15000	7454.6908	8439.5689	0.9385
3 bar, 90°C	38.2221	54.3695	69.1115	74.1999	0	15600	6600	9073.5015	0.9620
3 bar, 100°C	39.2538	57.3566	73.3812	78.3691	0	14700	7707.5023	9925.0746	0.9635

Bobinin içten dışa kurutulması için dış sınır şartı olarak Tablo 6.4’de verilen dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi, iç sınır şartı olarak kurutma havasının sıcaklığı, başlangıç şartı olarak ise $T_o=20^\circ\text{C}$ değeri girilmiştir. Matlab Programında uygun sınır ve başlangıç şartları kullanılarak teorik sonuçlar elde edilmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Bobinin Kuruma Davranışını Modelleyen Genetik Algoritma Modelinin Sonuçları

Yün bazlı orlon bobinlerin sıcak havayla kurutulması için geliştirilen genetik algoritma modelinin uygunluk değerleri Tablo 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 ve 7.9’da verilmiştir.

Difüzyon katsayısının $D_{eff} = D_0 \exp[D_1 X(r,t) - D_2 / T(K)] \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ şeklinde Arrhenius tipi eşitliği için, genetik algoritmayla en uygun D_0 , D_1 ve D_2 üçlüsü tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla D_0 , D_1 ve D_2 parametrelerinin alabilecekleri maksimum değerler programa sırasıyla 12, 4, 200 olarak girilmiştir. Söz konusu maksimum değerlerin tespiti tecrübeye dayanmaktadır.

Genetik algoritma modelinde elitizm yapılmış, her nesildeki uygunluk değeri en yüksek birey değiştirilmeden bir sonraki nesil için oluşan popülasyonun ilk bireyi olarak atanmıştır. Bu sayede bir nesilde elde edilen en yüksek uygunluk değerine sahip bireyin uygunluk değeri bir önceki nesilde elde edilen en yüksek uygunluk değerine sahip bireyinkine ya eşit ya da onunkinden daha fazla olmaktadır. Bu şekilde bir sonraki nesilde maksimum uygunluk değerinin artırılması amaçlanmaktadır.

Her bir deney şartı için kuru baza göre nem içerik değerlerinin zamana bağlı değişimlerinin deneysel değerleri ve yirminci nesil sonunda elde edilen en uygun difüzyon katsayısı için model sonuçları aynı grafik üzerinde verilmiştir (Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9). Model sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür. Söz konusu grafikler elde edilirken 5 dakika aralıklarla elde edilen model ve deney sonuçları kullanılmıştır. Bu şekilde bir deney şartı için yirmi nesilin tamamlanması 3 GB RAM belleğe sahip bir bilgisayarda yaklaşık iki saate (1 sa 45dk.)

yakın bir zaman almaktadır. Verilerin alınış sıklığının arttırılması bu süreyi uzatmaktadır, uygunluk değerini etkilememektedir.

Tablo 7.1 1 bar 80°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					1 bar 80°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.4824	1.6086	1.6367	1.6367	1.6893	1.7042	1.7433	1.7435	1.7435	1.7435
0.4556	0.5311	1.2157	1.6366	0.4309	1.6360	1.4016	1.6910	1.6934	1.7059
1.1619	1.4343	1.2570	0.8825	1.1090	1.3712	1.2120	1.6597	1.6447	1.3834
0.5623	0.9903	1.4806	1.4723	1.6982	1.6963	1.1222	1.6820	1.6764	1.6936
1.4729	1.4685	0.9986	1.2777	0.7734	1.6430	1.5016	1.6596	1.0719	1.7057
1.1508	0.4367	0.9627	1.4343	1.6963	1.6367	1.6935	1.6920	0.7201	1.6871
1.4714	1.1094	1.6349	1.6086	1.4925	1.6370	0.6280	1.6825	1.6937	1.4213
0.4712	1.6086	1.6366	1.1462	1.4006	1.6893	1.2266	1.6911	1.5525	1.3147
0.9916	0.5746	1.4741	1.6668	1.3712	1.3830	1.6963	0.7070	1.6927	0.3613
0.4184	0.9578	0.6099	0.7694	1.6997	1.7039	0.3801	1.6927	1.7031	1.6820
0.4550	1.1462	1.1017	1.6366	1.6324	1.6578	1.6910	1.7008	1.6951	1.7087
0.4975	1.2490	0.9599	1.6893	1.2450	1.4530	1.6393	1.6827	1.2777	1.6363
0.8100	0.4888	1.0957	1.3111	0.9732	1.3716	1.4140	1.6691	1.6934	1.7435
0.5687	0.5770	0.6329	1.1446	1.1138	1.6911	1.6982	1.6903	1.7035	1.4772
0.4809	0.2854	1.2491	1.6367	1.4751	1.6995	1.6911	1.6793	1.4772	1.6934
1.1818	0.9595	1.3111	1.3150	1.0418	1.2813	0.6604	1.0926	1.7435	0.9214
1.6086	0.5051	1.6086	0.3804	1.6430	0.7644	1.3600	1.6714	1.7039	1.6934
0.4888	0.9964	1.5404	1.1499	1.7042	1.6963	1.6524	1.7031	1.6944	1.6944
0.9358	1.5503	1.1462	1.6517	1.6367	1.3891	1.6594	1.4203	1.6934	1.4995
1.2433	0.6100	1.1093	1.1202	1.6462	1.3542	0.6629	1.7039	1.7007	0.5511
0.7610	0.6090	1.6086	1.6462	1.3162	1.7042	1.6827	1.6934	1.6533	1.5108
0.5174	0.4315	1.2777	0.9640	0.5972	1.7054	0.4872	1.6934	1.6920	1.6882
0.4927	1.2340	1.4343	1.6179	1.3868	1.3809	1.6995	1.6937	1.6890	1.7015
0.5642	0.8455	1.6085	1.6323	1.6180	1.6483	1.7435	1.6233	1.6934	1.2812
0.6093	0.9791	1.6024	0.9731	1.6371	1.6921	1.7039	1.6959	1.6922	1.7031
0.4285	1.6367	0.9321	1.2803	1.6366	1.6887	1.6934	1.5213	1.6900	1.6935
0.9008	1.4770	1.6367	1.1203	1.6365	1.6781	1.6366	1.7034	0.3868	1.2880
0.8378	1.0818	1.6086	1.2500	1.6311	1.7433	1.7008	1.7038	1.7058	0.5593
0.4612	0.8719	1.0819	1.4805	1.6894	0.3413	1.6911	1.4960	1.6870	1.6858
0.9595	1.1452	1.6086	1.6367	1.6323	1.2795	1.6911	1.6901	1.6633	1.6935
0.7813	0.9799	1.3020	1.3389	1.4084	1.5106	1.4154	1.6142	1.5709	1.4707
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.1 1 bar 80°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				1 bar 80°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.7435	1.8242	1.8245	1.8328	1.8328	1.8390	1.8390	1.8390	1.8390	1.8390
1.6933	1.5242	1.6786	1.6803	1.2340	1.6528	1.6699	1.7631	1.8290	1.8237
1.1255	1.4834	1.8243	1.8301	1.8153	0.6538	0.6976	1.7828	1.8383	0.7544
1.8242	1.7442	1.7104	1.8245	1.7441	1.8327	1.8322	1.8328	1.7529	1.8239
1.4787	1.6292	1.7254	1.7866	1.8203	1.8267	1.8095	1.8328	1.7567	1.2094
1.3410	1.8245	1.6977	1.7104	1.8339	1.7829	1.8097	1.8139	1.7610	1.7787
1.4988	1.8242	1.8195	1.6982	1.8390	1.8329	1.8046	1.4176	1.8317	1.8036
1.1511	0.8962	1.0055	1.7412	1.8253	1.6822	1.8014	1.8290	1.8341	1.8328
0.6087	1.4313	1.7465	1.5449	1.7015	1.8329	1.8153	1.8097	1.7920	1.8315
1.6920	1.3959	1.8241	1.6983	1.7469	1.8301	1.2249	1.8390	1.2083	0.7125
1.2561	1.6944	1.6983	1.8153	1.7439	1.8045	1.8341	1.7567	1.8239	1.7476
1.7434	1.6944	1.3542	1.6766	1.8245	1.1982	0.7191	1.8329	1.7830	1.7886
1.7080	1.6429	0.3865	1.3542	1.6982	1.8034	1.8152	1.6370	0.7652	1.8177
0.8962	1.6897	1.8153	1.7005	1.7830	1.8330	0.6977	1.6963	1.8245	1.8368
0.6261	1.8198	1.6275	0.3496	1.8201	1.1058	1.8327	1.8245	1.1356	1.8311
1.7015	1.6996	1.7005	1.6550	1.6627	1.6115	1.8237	1.3164	1.1022	1.6373
0.6653	1.7101	1.6662	1.7442	1.8152	1.8201	0.7319	1.6428	1.7787	1.1847
1.4313	1.6982	1.8328	1.6113	1.8329	1.8097	1.8327	1.8322	1.8390	1.7787
1.6983	1.7015	1.7442	0.5436	1.8327	1.5945	1.7476	1.6264	1.8308	1.4047
1.7430	1.6944	1.1795	1.7009	1.8333	1.8329	1.3113	1.7814	1.7140	1.7140
1.7011	1.7015	1.7010	1.8235	1.6113	0.6807	1.8329	0.6666	1.8325	1.2489
1.5032	1.8244	1.4208	1.8245	1.0819	0.7816	1.7045	1.7458	1.8328	0.7789
1.6486	1.5234	1.6944	1.8149	1.6103	1.8187	1.8034	1.8329	1.8341	1.6814
1.6917	1.5158	0.6129	1.8328	1.8308	1.8152	1.7543	0.7195	1.5003	1.8328
1.6373	0.6676	1.7101	1.6944	1.8301	1.7435	1.7827	1.8341	1.8289	1.7561
1.3951	1.7430	1.3653	1.6944	1.8307	1.8310	1.8190	1.8329	1.7656	1.8341
1.7412	1.7011	1.7015	1.7439	1.1104	1.6617	1.8343	0.7416	1.8327	1.8384
1.6944	1.6491	1.5248	1.6943	1.7866	1.7544	1.6426	1.8239	1.8328	1.8327
1.6934	1.4377	1.3808	1.8251	1.7438	1.8334	1.8045	1.8315	0.6986	1.8390
1.7015	0.6299	1.5247	1.7428	1.6944	1.8244	0.8303	1.7045	1.7632	1.6738
1.4677	1.5671	1.5499	1.6396	1.7123	1.6308	1.5819	1.6479	1.6587	1.6155
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.2 1 bar 90°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					1 bar 90°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.6273	1.9698	1.9698	1.9698	2.0284	2.0284	2.0284	2.0284	2.0402	2.0418
0.5808	0.7214	1.3965	1.8326	1.5644	1.9327	1.9557	1.9992	1.9910	2.0051
0.9861	1.1087	1.8290	1.8560	1.5857	1.8409	1.3938	1.9435	1.9595	1.9614
0.7652	1.6649	1.6518	2.0284	1.7801	1.9797	1.6270	1.9820	1.9862	2.0401
1.9698	1.5425	1.6655	1.8479	0.9109	2.0279	1.1533	2.0058	1.2572	2.0155
1.6561	0.5509	0.8084	1.6649	1.9801	1.9698	1.9965	1.9999	0.6294	1.9498
1.5363	0.9453	1.9515	1.9698	1.7189	1.9359	0.8634	1.9873	2.0159	1.6734
0.6096	1.2933	1.8244	1.6523	1.7532	1.9596	1.7522	2.0078	2.0058	1.8374
1.6674	0.7882	1.5260	1.9351	1.8409	1.8413	1.9797	0.8922	2.0402	1.3062
0.5292	1.5803	0.8683	1.9865	1.9756	1.9894	1.4778	2.0402	2.0024	2.0120
0.4637	1.6523	1.8091	1.8092	1.9432	1.9038	2.0011	1.9992	1.9964	1.9923
0.6444	1.8245	1.5822	1.8761	1.6925	2.0210	1.7927	1.9873	1.7093	1.9351
1.2251	0.6482	1.8387	1.6212	1.6068	1.9911	1.4108	2.0017	1.9929	2.0418
0.7734	0.7990	0.5972	1.6513	1.6000	2.0078	1.9741	2.0078	2.0157	1.7482
0.6247	0.3166	1.8270	1.9698	1.9695	1.9750	2.0078	1.6646	1.7485	1.9929
0.9663	0.8081	1.6212	1.7667	1.8541	1.4412	0.5369	0.8806	2.0284	0.6502
1.2933	0.6781	1.9698	1.5203	2.0279	0.8545	1.0801	1.9574	2.0268	2.0058
0.6482	1.4975	1.9148	1.6540	1.9899	1.9801	1.9364	2.0024	2.0000	2.0000
1.4590	1.2342	1.6523	1.2657	1.9698	1.9259	1.9102	1.5942	2.0017	1.9044
1.8209	0.8689	0.9452	1.4156	1.9594	1.4116	0.4438	1.9929	2.0037	1.9474
1.1434	0.8667	1.9698	1.9594	1.9861	1.9898	1.9873	1.9910	1.9731	0.9339
0.6771	0.4446	1.8479	1.6028	0.6705	1.1207	0.9461	2.0011	2.0058	1.9986
0.6384	1.8192	1.6649	1.9690	1.5726	1.0741	2.0082	2.0155	1.9881	2.0084
0.7654	0.7740	1.5425	1.9360	1.9751	1.8487	1.9502	1.1253	2.0024	1.2579
0.8671	1.6459	1.2912	1.6070	1.9700	1.9517	1.9899	1.9792	1.9908	2.0039
0.5363	1.3329	0.8160	1.8476	1.8268	1.9913	1.9929	1.6550	2.0418	2.0077
1.4664	1.5164	1.3932	1.8781	1.8326	1.9505	1.9697	2.0275	1.5147	1.5052
0.7679	0.9238	1.2934	1.8244	1.9441	1.8324	1.9831	1.9878	1.9874	1.0850
0.5914	1.3931	0.9245	1.8385	1.9427	1.5085	2.0078	1.6435	1.9496	2.0068
0.8081	0.9720	1.9698	1.9701	1.7921	1.8063	2.0078	1.9843	1.6383	2.0023
0.9702	1.1393	1.5320	1.7908	1.7754	1.8030	1.6721	1.8461	1.8847	1.7956
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.2 1 bar 90°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					1 bar 90°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2.0418	2.0483	2.0486	2.0486	2.0487	2.0488	2.0494	2.0494	2.0505	2.0557
1.9993	1.9252	2.0043	1.8890	1.6892	2.0323	2.0175	1.9962	2.0407	2.0435
1.3875	1.7429	2.0344	2.0306	2.0402	0.5403	0.5321	2.0264	1.9433	1.1797
2.0337	2.0424	1.9952	2.0487	2.0424	2.0403	2.0450	2.0304	2.0557	2.0504
1.7382	1.8850	1.7444	2.0349	2.0447	2.0263	2.0337	2.0341	2.0317	1.6471
1.7366	2.0328	1.8667	1.9952	2.0416	2.0347	2.0338	2.0387	2.0420	2.0416
1.9049	2.0333	2.0416	2.0058	1.9785	2.0324	2.0382	1.5573	2.0456	2.0270
1.7660	1.8691	1.3361	2.0318	2.0319	1.8188	2.0007	2.0407	2.0429	2.0342
0.4394	1.8843	2.0415	1.9312	2.0066	2.0300	2.0401	2.0408	2.0328	2.0158
1.9990	1.6778	2.0325	1.8613	2.0449	2.0425	1.6854	2.0425	1.5621	0.5368
1.7038	2.0000	2.0049	2.0402	2.0424	1.9976	2.0429	2.0313	2.0504	1.7637
2.0418	2.0000	1.5260	2.0120	2.0486	1.6327	0.8775	2.0314	2.0416	2.0407
2.0059	1.7311	1.2541	1.5260	2.0049	2.0353	2.0401	1.8287	0.5390	2.0327
1.8691	2.0014	2.0402	2.0096	2.0283	2.0424	1.4915	2.0363	2.0433	2.0265
0.6410	2.0368	1.7457	1.3820	2.0405	1.3149	2.0403	2.0433	1.3322	2.0359
2.0084	1.9948	2.0096	2.0318	1.9573	2.0148	2.0435	1.5451	1.9333	1.7977
1.5383	1.9915	1.9120	2.0424	2.0401	2.0405	0.8630	1.7737	2.0033	1.6956
1.8843	1.9982	2.0297	1.7048	2.0301	2.0338	2.0322	2.0450	2.0425	2.0420
1.9199	2.0080	2.0424	0.7162	2.0403	1.7081	2.0316	2.0201	2.0400	1.5765
2.0417	2.0000	1.8319	2.0177	2.0488	2.0405	1.5492	2.0239	2.0416	2.0416
2.0079	2.0084	1.9945	2.0446	1.9312	1.5485	2.0300	1.5442	2.0301	1.7864
1.6397	2.0327	1.7610	2.0486	1.2012	0.9080	1.9648	2.0432	2.0341	1.4029
1.9429	1.4687	2.0000	2.0218	2.0140	2.0408	2.0422	2.0410	2.0429	2.0164
1.9972	1.8899	0.4474	2.0300	2.0452	2.0401	2.0312	0.8767	1.7574	2.0341
2.0102	1.5399	1.9915	2.0000	2.0324	2.0494	2.0271	2.0429	2.0336	2.0559
1.8458	2.0486	1.9839	2.0000	2.0424	2.0449	2.0416	2.0435	2.0069	2.0429
2.0483	2.0101	2.0080	2.0424	1.3202	1.8312	2.0401	0.8742	2.0356	2.0480
2.0000	1.8623	1.4672	2.0072	2.0349	2.0376	1.7784	2.0505	2.0341	2.0341
1.9929	1.8875	1.6905	2.0345	2.0424	2.0417	2.0353	2.0455	0.5109	2.0434
2.0080	0.6356	1.4679	2.0422	2.0000	2.0418	0.5023	1.9648	2.0202	2.0386
1.8064	1.8762	1.8117	1.9210	1.9637	1.8697	1.7993	1.8920	1.8806	1.8729
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.3 1 bar 100°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				1 bar 100°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.8046	2.1718	2.1718	2.2307	2.2307	2.2307	2.2307	2.2308	2.2317	2.2334
0.7291	0.9522	1.9390	1.9015	2.1397	2.2143	2.2153	2.2165	2.1902	2.2087
0.9452	1.0448	1.9410	2.1713	1.6145	2.2133	1.5429	2.2056	2.2105	2.1934
1.0199	2.1707	1.8944	2.2063	2.2103	2.1908	1.9568	2.1981	2.2315	2.2312
1.8260	1.9031	2.1691	2.2046	1.0060	2.2073	1.4129	2.1777	1.4264	2.2090
1.8215	0.6857	1.8288	2.1707	2.1908	2.2307	2.1936	2.1979	1.2124	2.1618
1.4175	0.9132	2.1467	2.1719	2.1597	2.2057	1.0053	2.2309	2.1666	1.7965
0.7775	1.1771	1.9092	2.1627	1.7844	2.1822	2.0802	2.2042	2.2115	2.1403
2.1718	1.0593	1.4110	2.2067	2.2133	2.2148	2.1909	0.9960	2.2285	1.5329
0.6464	2.0846	1.1901	2.0231	2.1713	2.1955	1.7078	2.2285	2.2110	2.1888
0.5176	1.8231	2.1325	2.1325	2.2054	2.0959	2.2165	2.2165	2.1844	2.1968
0.8250	1.9097	2.0959	2.1822	2.1565	2.1797	2.1598	2.2047	1.7588	2.2053
1.6675	0.8303	2.2063	2.0058	2.1074	2.1451	1.7278	2.1893	2.1902	2.2317
1.0050	1.0774	0.6345	2.1611	1.5173	2.2042	2.1933	2.2001	2.2043	2.0991
0.8005	1.9316	1.9094	2.1718	2.2046	2.2013	2.2043	2.2006	2.0986	2.2105
0.9330	1.8288	2.0058	1.7199	2.1718	1.5704	1.0434	1.4734	2.2308	1.4587
1.1771	0.8838	2.1718	1.9087	2.2064	0.9961	1.5328	2.1936	2.2320	2.2315
0.8303	1.8507	2.2307	2.1646	2.1948	2.1908	2.2054	2.1916	2.2334	2.2334
1.8988	1.1328	2.1628	1.8105	2.2307	2.2139	2.2004	1.7882	2.2110	2.2021
1.9130	1.1912	0.9127	1.9622	2.2046	1.7628	1.0589	2.2052	2.1880	1.4461
1.5949	1.1876	2.1718	2.1462	2.0167	2.1947	2.2047	2.1902	2.1880	1.0482
0.8853	0.4986	2.2046	2.0964	0.7841	1.9530	1.9164	2.2110	2.1978	2.1935
0.8271	1.9136	2.1707	2.2150	1.9946	1.5187	2.2042	2.1666	2.1872	2.1979
1.0195	0.8271	1.9031	2.2054	2.1765	2.0776	2.2047	1.4657	2.2315	1.3713
1.1883	2.1628	1.1740	2.1074	2.2307	2.1909	2.2052	2.1996	2.2044	2.2110
0.6649	1.2068	1.0996	2.2086	2.1326	2.1972	2.1900	1.8140	2.2280	2.2110
1.9962	1.4016	1.8320	2.2033	2.1075	2.2046	2.2308	2.2317	1.5427	1.5656
0.7677	0.9995	1.1877	2.0842	2.2073	2.1199	2.1768	2.2082	2.2089	0.6539
0.7501	1.832	1.1913	2.2062	2.1948	1.7011	2.2042	1.2118	2.1618	2.2052
0.8164	0.9318	2.1719	2.1722	2.2054	2.204	2.2042	2.1799	2.1985	2.2311
1.1412	1.3861	1.8056	2.1104	2.0323	2.0669	1.9606	2.0542	2.1066	1.9766
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.3 1 bar 100°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					1 bar 100°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2.2334	2.2334	2.2334	2.2385	2.2385	2.2385	2.2385	2.2385	2.2385	2.2385
2.2276	2.2121	2.2031	2.1985	2.0492	2.1703	2.1886	2.2311	2.2319	2.2322
1.4785	2.1038	2.1824	2.1807	2.2317	0.9874	0.9853	2.2144	2.1058	2.0462
2.1824	2.2146	2.2218	2.2334	2.2334	2.2319	2.2284	2.2262	2.1545	2.2311
2.1063	2.0750	2.1936	2.2309	2.2337	2.2201	2.2279	2.2266	2.2007	2.0920
2.0204	2.1817	2.1923	2.2218	2.2385	2.2083	2.2279	2.2319	2.2040	2.1866
2.2020	2.1824	2.2385	2.1135	2.1839	2.2268	2.2253	1.6352	2.2331	2.2246
2.1437	1.3117	1.4752	2.1645	2.2219	2.0467	2.2249	2.2293	2.2288	2.2311
1.0346	2.1996	2.2283	2.2308	2.1920	2.2268	2.2317	2.2279	2.2186	2.2244
2.1955	2.0859	2.1882	2.2147	2.2275	2.2324	2.0819	2.2329	2.0125	0.9803
2.0083	2.2334	2.2115	2.2317	2.2324	2.2274	2.2287	2.2007	2.2150	1.9105
2.2277	2.2334	1.6950	2.2335	2.2277	2.0826	0.9990	2.2276	2.2142	2.1953
2.2318	1.8454	1.6795	1.6950	2.2080	2.2325	2.2318	1.9996	0.9642	2.2040
1.3116	2.1973	2.2277	2.2050	2.2085	2.2280	1.6808	2.1868	2.2325	2.2314
1.0151	2.2330	2.0900	1.5641	2.2165	1.5038	2.2319	2.2325	1.5245	2.2160
2.2052	2.1884	2.2050	2.2308	1.8811	2.1906	2.2148	1.6168	1.3281	2.0145
1.6545	2.2281	2.1366	2.2146	2.2319	2.2317	1.0076	2.0013	2.1866	2.0784
2.1996	2.2334	2.2266	2.1469	2.2268	2.2279	2.2277	2.2284	2.2329	2.2040
2.1309	2.1996	2.2146	1.4838	2.2315	2.1373	2.2003	2.1937	2.2244	1.6798
2.2317	2.2277	1.8725	2.2317	2.2303	2.2268	1.6392	2.1908	2.1645	2.1646
2.1970	2.1979	2.1873	2.2337	2.2308	1.7302	2.2268	1.7142	2.2270	1.9055
1.7563	2.1872	1.9604	2.2277	1.5941	0.9923	2.1114	2.1993	2.2266	1.4597
2.2099	1.6789	2.2277	2.1910	2.1909	2.2158	2.2326	2.2318	2.2287	2.2012
2.1998	2.2155	0.9331	2.2268	2.2336	2.2318	2.2001	0.9993	1.9010	2.2317
2.2022	1.7057	2.2338	2.2277	2.1806	2.2144	2.2131	2.2287	2.2294	2.1617
2.2021	2.2317	2.1752	2.2334	2.2279	2.2287	2.2217	2.2268	2.2317	2.2288
2.2315	2.1918	2.2334	2.2324	1.5095	1.9940	2.2289	1.0211	2.2260	2.2227
2.2334	2.0975	1.6768	2.2334	2.2309	2.2002	2.0014	2.2147	2.2266	2.2293
2.2105	2.1992	2.0765	2.1994	2.2324	2.2303	2.2325	2.2330	1.0040	2.2329
2.1921	1.0471	1.6784	2.2280	2.2277	2.2277	1.1636	2.1114	2.2311	2.1837
2.0225	2.0790	2.0432	2.1499	2.1601	2.0781	2.0118	2.0650	2.0615	2.0880
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.4 2 bar 80°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					2 bar 80°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5029	1.5244	1.5467	1.5467	1.5896	1.6153	1.6386	1.6387	1.6387	1.6387
0.4745	0.5532	1.1933	1.5467	0.4575	1.5464	1.3566	1.5953	1.5928	1.6062
1.1459	1.3964	1.2558	0.9057	1.1100	1.3581	1.2181	1.5680	1.5536	1.6072
0.5835	1.0108	1.4272	1.4350	1.6153	1.5953	1.1157	1.5930	1.5965	1.6020
1.4363	1.4294	1.0273	1.2736	0.8065	1.5517	1.4454	1.5649	1.0896	1.6061
1.1691	0.4543	0.9846	1.3964	1.5953	1.5467	1.5929	1.5916	0.7810	1.5877
1.4332	1.0994	1.5453	1.5244	1.4413	1.5470	0.6528	1.5836	1.5915	1.3866
0.4912	1.5244	1.5467	1.1649	1.3629	1.5896	1.2069	1.5952	1.4797	1.3046
1.0120	0.5948	1.4346	1.5709	1.3581	1.3486	1.5953	0.7409	1.6026	0.6225
0.4357	0.9815	0.6363	0.7878	1.5989	1.6052	0.5757	1.6026	1.6036	1.5924
0.4877	1.1650	1.1160	1.5467	1.5435	1.5705	1.5953	1.6007	1.6015	1.5927
0.5169	1.2488	0.9828	1.5896	1.2537	1.4002	1.5610	1.5838	1.2614	1.5588
0.8415	0.5106	1.1104	1.3104	0.9956	1.3394	1.3917	1.5730	1.5928	1.6387
0.5944	0.6003	0.6637	1.1635	1.1145	1.5952	1.6033	1.5933	1.6048	1.4197
0.5013	0.3092	1.2488	1.5467	1.4242	1.6041	1.5952	1.5909	1.4198	1.5928
1.1724	0.9817	1.3104	1.2927	1.0716	1.2585	0.6869	1.0858	1.6387	0.9440
1.5244	0.5282	1.5244	0.4095	1.5517	0.7972	1.3190	1.5747	1.5955	1.5971
0.5106	1.0251	1.4705	1.1683	1.6049	1.5953	1.5680	1.6036	1.5887	1.5889
0.9643	1.4780	1.1650	1.5729	1.5467	1.3464	1.5650	1.3858	1.5972	1.4598
1.2438	0.6363	1.0994	1.1091	1.5543	1.3442	0.6894	1.6051	1.6006	0.5834
0.7916	0.6354	1.5244	1.5543	1.2937	1.6049	1.5838	1.5928	1.5233	1.3967
0.5399	0.4627	1.2736	0.9868	0.6216	1.6087	0.5139	1.5972	1.5916	1.5969
0.5132	1.2356	1.3964	1.5322	1.3708	1.3371	1.6041	1.5915	1.5948	1.6049
0.5862	0.8501	1.5243	1.5435	1.5318	1.5656	1.6387	1.5377	1.5971	1.2846
0.6356	1.0000	1.5195	0.9955	1.5471	1.5920	1.6051	1.5954	1.5889	1.6036
0.4450	1.5467	0.9395	1.2764	1.5466	1.5888	1.5928	1.4587	1.5786	1.5972
0.9267	1.4363	1.5467	1.1324	1.5466	1.5805	1.5466	1.5987	0.4161	1.2641
0.8429	1.0748	1.5244	1.2497	1.5424	1.6386	1.6007	1.6039	1.6062	0.5798
0.4804	0.8989	1.0749	1.4271	1.5896	0.3687	1.5952	1.4474	1.5877	1.5941
0.9817	1.1312	1.5244	1.5467	1.5435	1.2802	1.5952	1.5900	1.5800	1.5970
0.7928	0.9774	1.2712	1.3035	1.3576	1.4440	1.3616	1.5294	1.4898	1.4216
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.4 2 bar 80°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					2 bar 80°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.6387	1.6957	1.6959	1.6973	1.6974	1.7016	1.7016	1.7016	1.7016	1.7016
1.5974	1.4789	1.6072	1.5811	1.2248	1.5734	1.5839	1.6698	1.6963	1.6976
1.1307	1.4137	1.6958	1.6963	1.6970	0.6783	0.7283	1.6494	1.6965	0.7841
1.6957	1.6381	1.5924	1.6969	1.6382	1.6973	1.6973	1.6974	1.6486	1.6979
1.4120	1.5557	1.6253	1.6815	1.6931	1.6935	1.6887	1.6967	1.6442	1.2049
1.3411	1.6959	1.5950	1.5924	1.6971	1.6679	1.6890	1.6963	1.6471	1.6593
1.4593	1.6957	1.6937	1.5953	1.7016	1.6974	1.6925	1.3787	1.6971	1.6818
1.1628	0.6336	1.0298	1.5364	1.6964	1.5671	1.6690	1.6950	1.6972	1.6967
0.6336	1.4027	1.6408	1.4958	1.6048	1.6974	1.6970	1.6890	1.6777	1.6958
1.5993	1.3610	1.6953	1.5964	1.6411	1.6963	1.2183	1.7016	1.2236	0.7394
1.2575	1.6059	1.5792	1.6970	1.6372	1.6708	1.6973	1.6442	1.6979	1.6324
1.6386	1.5961	1.3202	1.6041	1.6959	1.1957	0.7614	1.6973	1.6484	1.6735
1.5972	1.5511	0.4292	1.3202	1.6196	1.6824	1.6970	1.5595	0.7903	1.6804
0.3583	1.5972	1.6970	1.6049	1.6678	1.6975	0.7325	1.6100	1.6980	1.7029
0.6467	1.6939	1.5384	0.3774	1.6979	1.1290	1.6973	1.6980	1.1509	1.6982
1.6049	1.6041	1.6049	1.6064	1.5626	1.5646	1.6976	1.2884	1.1118	1.5499
0.7009	1.5961	1.5571	1.6381	1.6969	1.6979	0.7660	1.5359	1.6593	1.2255
1.4027	1.6059	1.6973	1.5107	1.6974	1.6889	1.6972	1.6973	1.7016	1.6593
1.5976	1.6049	1.6381	0.5718	1.6973	1.5255	1.6381	1.5655	1.6974	1.3721
1.6384	1.5974	1.3601	1.5896	1.6986	1.6979	1.2914	1.6455	1.6171	1.6171
1.6049	1.6049	1.6048	1.6956	1.5107	0.7162	1.6974	0.7025	1.6971	1.2491
1.4122	1.6958	1.3475	1.6959	1.1014	0.8173	1.6018	1.6404	1.6967	0.8116
1.5714	1.4605	1.6059	1.6900	1.5648	1.6983	1.6825	1.6974	1.6973	1.5994
1.6010	1.4744	0.6364	1.6974	1.6969	1.6970	1.6429	0.7602	1.4584	1.6967
1.5911	0.7032	1.5961	1.6059	1.6963	1.6402	1.6493	1.6973	1.6949	1.6505
1.3976	1.6384	1.3338	1.6059	1.6970	1.6971	1.6799	1.6976	1.6412	1.6973
1.6371	1.6052	1.6059	1.6372	1.1333	1.5614	1.6970	0.7729	1.6964	1.6972
1.5889	1.5705	1.4616	1.6059	1.6815	1.6430	1.5361	1.6977	1.6967	1.6967
1.5928	1.4036	1.3487	1.6963	1.6372	1.6985	1.6824	1.6971	0.7250	1.7014
1.6049	0.6510	1.4615	1.6364	1.6059	1.6959	0.8571	1.6018	1.6698	1.5618
1.3905	1.4810	1.4764	1.5418	1.6059	1.5361	1.4922	1.5494	1.5592	1.5244
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.5 2 bar 90°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				2 bar 90°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5656	1.6109	1.6109	1.6481	1.6481	1.6561	1.6580	1.6580	1.6707	1.6708
0.5278	0.6351	1.0886	1.4563	1.1926	1.6357	1.6331	1.6315	1.6113	1.6417
1.0436	1.2036	1.4524	1.3916	1.2827	1.5159	1.1916	1.6564	1.6591	1.5801
0.6699	1.2477	1.2748	1.5880	1.6382	1.6181	1.5831	1.5847	1.6472	1.6533
1.6109	1.4314	1.2481	1.4696	0.7822	1.6309	1.0645	1.6415	1.2889	1.6572
1.3424	0.5036	0.8883	1.2477	1.6181	1.6481	1.6165	1.6186	0.5372	1.6423
1.4309	1.0044	1.6222	1.6109	1.2802	1.6326	0.7521	1.6483	1.6573	1.4333
0.5507	1.3447	1.4475	1.3387	1.3771	1.6151	1.4796	1.6544	1.6477	1.4792
1.2492	0.6870	1.4272	1.6274	1.5159	1.5197	1.6182	0.8428	1.6532	1.1329
0.4850	1.2054	0.7430	1.5204	1.6030	1.6123	1.3342	1.6532	1.6551	1.6634
0.4964	1.3387	1.3616	1.3743	1.6320	1.6580	1.6317	1.6315	1.6483	1.6527
0.5806	1.4476	1.2036	1.4172	1.2646	1.6329	1.6551	1.6297	1.4188	1.6619
0.9971	0.5790	1.3624	1.2588	1.2190	1.5124	1.1138	1.6707	1.6113	1.6707
0.6830	0.6955	0.6448	1.3374	1.2186	1.6409	1.5721	1.6624	1.6574	1.5733
0.5634	0.3322	1.4478	1.6109	1.6524	1.5412	1.6409	1.6292	1.5736	1.6591
1.0476	0.8879	1.2588	1.3668	1.2566	1.2387	0.4635	0.7500	1.6580	0.5199
1.3428	0.6024	1.6109	1.1654	1.6174	0.7957	0.8819	1.6412	1.6562	1.6443
0.5790	1.2015	1.6481	1.3416	1.6133	1.6181	1.6561	1.6551	1.6597	1.6595
1.1541	1.2938	1.3387	1.5811	1.6481	1.6338	1.6373	1.3392	1.6708	1.6385
1.4434	0.7433	1.0044	1.0989	1.6155	1.0242	0.4335	1.6412	1.6519	1.5043
0.9408	0.7418	1.6109	1.6155	1.5212	1.6131	1.6297	1.6113	1.6093	0.8461
0.6074	0.4744	1.4696	1.2160	0.7295	1.0303	0.8009	1.6179	1.6414	1.6456
0.5754	1.4371	1.2477	1.6346	1.2236	0.8881	1.6409	1.6573	1.6426	1.6638
0.6724	0.8099	1.4329	1.6321	1.6066	1.6544	1.6374	1.0150	1.6446	1.1336
0.7422	1.2352	1.3398	1.2191	1.6481	1.6580	1.6412	1.6244	1.6261	1.6496
0.4916	1.3744	0.8742	1.4705	1.4471	1.6111	1.6112	1.5186	1.6443	1.6664
1.1358	1.4226	1.3744	1.3884	1.4575	1.6374	1.6482	1.6580	1.3905	1.3358
0.8038	0.9836	1.3428	1.4480	1.6309	1.5701	1.6260	1.6429	1.6393	0.5981
0.5366	1.0921	0.9839	1.3623	1.6561	1.2277	1.6580	1.2968	1.6423	1.6622
0.8879	1.0312	1.6109	1.6112	1.4136	1.4590	1.6544	1.6111	1.6202	1.6448
0.8585	1.0199	1.2990	1.4349	1.4336	1.4909	1.4054	1.5364	1.5778	1.4861
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.5 2 bar 90°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				2 bar 90°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.6708	1.6786	1.6786	1.6888	1.6904	1.6904	1.6904	1.6904	1.6906	1.6906
1.6596	1.6405	1.6684	1.6739	1.4872	1.6427	1.6420	1.6770	1.6856	1.6855
1.5637	1.5811	1.6786	1.6822	1.6856	0.4751	0.4850	1.6380	1.3919	1.0018
1.6786	1.6741	1.6563	1.6791	1.6741	1.6854	1.6795	1.6870	1.6539	1.6859
1.5804	1.6500	1.6888	1.6904	1.6771	1.6806	1.6589	1.6829	1.6336	1.5049
1.5970	1.6786	1.6711	1.6563	1.6879	1.6509	1.6583	1.6856	1.6826	1.6585
1.6387	1.6786	1.6789	1.6747	1.4377	1.6828	1.6791	1.3230	1.6847	1.6875
1.5436	1.1624	1.2397	1.6708	1.6831	1.5902	1.6523	1.6795	1.6816	1.6829
0.4491	1.5446	1.6750	1.6659	1.6567	1.6828	1.6856	1.6583	1.6628	1.6821
1.6481	1.5967	1.6815	1.6737	1.6739	1.6822	1.4982	1.6906	1.5779	0.4839
1.4004	1.6595	1.6365	1.6858	1.6744	1.6569	1.6817	1.6336	1.6859	1.6254
1.6708	1.6595	1.2746	1.6578	1.6786	1.5151	0.8073	1.6834	1.6489	1.6492
1.6538	1.4903	1.3103	1.3103	1.6388	1.6852	1.6855	1.5896	0.4830	1.6822
1.1624	1.6583	1.6790	1.6622	1.6509	1.6826	1.3736	1.6834	1.6860	1.6869
0.4262	1.6786	1.5902	1.3518	1.6846	1.1416	1.6855	1.6860	1.1763	1.6853
1.6638	1.6524	1.6622	1.6707	1.5929	1.6337	1.6862	1.3213	1.5610	1.5799
1.3634	1.6520	1.6280	1.6741	1.6855	1.6856	0.7833	1.5646	1.6585	1.5325
1.5446	1.6595	1.6826	1.6425	1.6828	1.6585	1.6836	1.6795	1.6906	1.6826
1.6387	1.6638	1.6741	0.6020	1.6854	1.6382	1.6312	1.6384	1.6831	1.3405
1.6711	1.6593	1.5269	1.6520	1.6715	1.6846	1.2979	1.6614	1.6571	1.6570
1.6645	1.6639	1.6511	1.6755	1.6659	1.3328	1.6828	1.2795	1.6832	1.4967
1.4570	1.6786	1.4713	1.6786	1.1609	0.8319	1.6114	1.6491	1.6829	1.3701
1.6588	1.2200	1.6595	1.6813	1.6333	1.6892	1.6849	1.6856	1.6817	1.6336
1.6484	1.5672	0.4693	1.6830	1.6823	1.6855	1.6324	0.8078	1.4561	1.6829
1.6742	1.3641	1.6520	1.6595	1.6824	1.6748	1.6484	1.6817	1.6796	1.6556
1.6140	1.6708	1.4558	1.6595	1.6825	1.6750	1.6704	1.6862	1.6720	1.6829
1.6704	1.6633	1.6639	1.6744	1.1377	1.5803	1.6904	0.8088	1.6826	1.6827
1.6595	1.6569	1.2190	1.6595	1.6904	1.6323	1.5646	1.6860	1.6829	1.6831
1.6591	1.5440	1.5999	1.6829	1.6742	1.6716	1.6852	1.6847	0.4583	1.6902
1.6638	0.4504	1.2218	1.6748	1.6595	1.6786	0.4572	1.6116	1.6770	1.6829
1.5198	1.5599	1.5348	1.6131	1.6222	1.5632	1.4990	1.5711	1.5544	1.5715
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.6 2 bar 100°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				2 bar 100°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.4139	1.4139	1.4929	1.5439	1.5439	1.5439	1.5598	1.5598	1.5598	1.5642
0.6177	0.4607	1.0984	1.2547	1.5067	1.5201	1.5146	1.3493	1.5094	1.5666
0.7754	1.1020	1.1599	1.3931	1.5425	1.5426	1.5437	1.5319	1.5436	1.4691
0.5460	0.7803	1.4038	1.4360	1.5342	1.4193	1.4635	1.5543	1.5544	1.5417
0.4780	0.8493	0.5393	1.3931	1.4197	0.6918	0.9068	1.5554	1.2631	1.5636
0.8268	1.3992	1.4975	1.4931	1.5303	1.5598	1.4129	1.5439	1.4973	1.5285
0.7808	0.6181	1.4176	1.5425	1.3618	1.4349	1.1914	1.4422	1.5217	1.5545
1.2734	1.1462	1.4139	0.5271	1.4199	1.5429	1.5439	1.5212	1.5193	1.5577
0.6219	1.2734	1.1980	1.3459	1.3926	0.6866	1.5492	1.5485	1.5410	1.5513
0.5650	0.8455	1.4145	0.7734	0.7771	1.5375	1.5502	1.4129	1.5560	1.4991
1.3912	0.7081	0.6181	1.4153	1.4182	1.5065	1.5494	1.5200	1.1807	1.5579
0.9276	1.2694	1.4143	1.3618	1.3764	1.5429	1.2801	1.5174	1.5013	1.5577
0.8496	1.4137	1.5439	1.1021	1.4544	1.5430	1.5408	1.5334	1.5126	1.5534
0.8167	1.4139	1.3931	1.3478	0.9266	1.5205	1.5174	1.4629	1.5578	1.5569
0.4948	1.0266	1.3467	1.1592	1.1043	1.4665	1.2048	1.5555	1.5334	1.5360
0.7417	1.4929	1.1017	1.4544	1.3153	1.5426	1.1970	1.5495	1.5408	1.3905
1.1934	1.4139	0.3228	0.5446	1.3430	1.4546	1.4666	1.5557	1.5439	1.5217
0.5582	0.9007	1.4187	1.4935	0.8617	1.5439	1.5422	1.4912	1.1398	1.5419
1.0672	0.7820	1.3683	0.9266	0.5096	1.5433	0.5607	1.5495	1.5560	1.5641
1.1462	1.4268	1.0115	1.4148	1.3757	1.3797	1.5201	1.5408	1.5584	1.5560
0.5645	1.3931	1.1480	1.4199	1.3764	1.2799	1.5200	1.5414	1.5642	1.5196
0.6472	0.8171	0.6056	0.8493	1.4271	1.3334	1.3493	1.5408	1.5555	1.4942
0.5153	1.1465	1.1460	1.2493	1.5439	1.5497	1.5478	1.5558	1.5485	1.5492
0.8191	1.4138	1.1019	1.3765	1.4952	1.3822	1.4161	1.5148	1.5577	1.5538
0.5702	1.0119	1.4135	0.5417	0.5312	1.4117	1.5554	1.4840	1.5537	1.5642
0.5248	0.7739	1.1679	1.5436	1.3932	1.5439	1.4503	1.5584	1.5161	1.5560
0.7398	0.9170	0.9243	1.4975	0.5455	1.2817	1.5430	1.4372	1.5536	1.5217
0.6345	1.1462	1.2133	1.4175	1.5429	1.2822	1.2405	1.5220	1.5420	1.5658
0.7332	0.4690	1.4362	1.4362	1.5433	0.4980	1.5433	1.5410	1.2454	1.5577
0.9007	0.9273	0.8494	0.9823	0.8376	1.5303	1.4193	1.5552	1.5534	1.5577
0.7911	1.0584	1.1727	1.2412	1.2650	1.3872	1.4066	1.5182	1.4960	1.5390
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.6 2 bar 100°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları						2 bar 100°C			
D ₀ için değişken aralık değeri						12			
D ₁ için değişken aralık değeri						4			
D ₂ için değişken aralık değeri						200			
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.5666	1.5666	1.5669	1.5670	1.5670	1.5670	1.5670	1.5672	1.5672	1.5672
1.4987	1.5645	1.5450	1.5448	1.5634	1.5515	1.5624	1.5670	1.5668	1.2481
1.3995	1.5666	1.5602	1.5587	1.5648	1.4790	1.5515	1.5638	1.5508	1.5659
1.5578	1.5447	1.5660	1.5669	1.5572	1.0027	1.5670	1.3394	1.5524	1.5609
1.5463	1.5554	1.5617	1.4251	1.5656	1.4447	1.5669	1.4604	1.5651	1.5663
1.5532	1.5565	1.5653	0.5925	1.5603	1.5650	1.5645	1.5541	1.5649	1.5572
1.4468	1.5618	0.5601	0.7445	1.4691	1.5505	1.4441	1.5665	0.7592	1.5671
0.5766	1.5490	0.5559	0.7705	1.5663	1.5487	1.5578	1.5571	1.5659	1.5642
1.4915	1.0483	1.5565	0.5861	1.5447	1.5652	1.5648	1.1085	1.3394	1.4976
1.3442	1.5581	1.5559	1.5645	1.5454	1.5645	0.6607	1.5646	1.5668	1.3252
1.5636	1.5577	1.5670	1.5565	1.2628	1.4418	1.5615	1.5640	1.4646	1.5592
1.5578	1.5636	1.5581	1.5572	1.0592	1.5670	1.5533	1.5495	1.5642	1.5672
1.5552	1.5657	1.5572	1.5650	1.5649	1.2443	1.2197	1.5648	1.2375	1.5373
1.5577	1.2142	1.5467	1.2017	1.5623	1.5635	1.4883	1.5672	1.4613	1.5647
1.5497	1.5640	1.5587	0.9430	1.5667	1.5450	1.5667	1.2374	1.5648	1.5508
1.5452	1.5536	0.6017	1.5518	1.5495	1.5552	1.5638	1.4883	1.5638	1.5648
1.5247	1.5669	1.4112	1.5546	1.3321	1.5515	1.5546	1.5659	1.5671	1.5659
1.3140	0.6189	1.5469	1.5668	0.9431	1.5652	1.5655	1.5668	1.5648	1.5651
1.5367	1.5441	1.5463	0.5598	1.4561	1.4906	1.0845	1.5659	1.5669	0.6020
1.5509	1.2050	1.5641	1.2030	1.0863	1.2726	1.4448	1.5648	1.5623	0.7488
1.5565	1.5463	1.5638	1.3273	1.5645	0.9564	1.5659	1.5644	1.5659	1.5638
1.5610	1.5310	1.1097	1.5618	1.5645	1.5664	1.5547	1.5522	1.5571	1.5581
1.5283	1.5449	1.2293	1.5623	1.5418	1.5634	1.5493	1.0902	1.4885	1.5650
1.5580	1.5639	1.5661	1.5665	1.5618	1.4789	1.2748	1.5639	1.3209	1.5648
1.5577	1.3756	1.5645	0.5508	0.7270	1.5648	1.5478	1.5632	1.1041	1.5661
1.5538	1.5664	1.4746	1.5626	0.6801	1.5664	1.5537	1.5515	1.5350	1.4807
1.5574	1.5510	1.3181	1.1164	1.5668	1.5578	1.5672	1.0741	1.4875	1.5651
1.5437	1.5561	1.5565	1.5469	1.5515	1.0845	1.5645	1.5038	1.5665	1.5508
1.5643	1.5573	1.5448	1.5613	1.5662	1.2429	1.5505	1.5375	1.5672	1.5623
1.5658	1.4729	1.5632	1.4080	1.5636	1.4908	1.4718	1.5668	1.5654	1.5672
1.4927	1.4763	1.4180	1.2981	1.4258	1.4569	1.4803	1.4883	1.4824	1.4796
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.7 3 bar 80°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				3 bar 80°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.3772	1.2134	1.2134	1.2238	1.2267	1.2490	1.2506	1.2550	1.2553	1.2553
0.5314	0.8415	0.8665	1.0581	0.9095	0.8931	1.0668	1.2552	1.2552	1.2497
0.6560	0.4939	0.4900	1.0430	0.5881	1.0410	1.1901	0.8948	1.2497	1.2483
0.5388	0.6886	0.6580	0.8721	0.4948	1.1594	0.5015	1.2506	1.2325	1.2115
0.3934	1.0651	1.2148	1.2136	1.1081	1.2253	1.2484	1.2115	1.2240	0.5564
1.0119	1.1640	0.9481	1.0625	1.0239	1.2506	1.2239	0.5448	1.1789	1.2551
1.2134	0.9613	1.1674	0.7266	1.0625	1.2135	0.4420	0.4912	1.1511	1.2550
1.0650	0.5313	0.8787	1.1673	1.2238	0.3318	1.0614	1.2238	1.2239	1.2551
0.3859	0.9481	1.0373	0.9494	1.1691	0.6602	1.2238	1.2239	1.2115	1.2503
0.4938	0.3498	0.5301	1.2156	1.1674	0.9916	1.2235	1.2235	0.8953	0.9858
0.4500	1.0115	0.3316	1.2148	1.2239	1.2238	0.4882	1.2504	1.2502	1.2497
0.9613	0.5380	1.0625	1.2134	1.2134	1.2238	1.0641	1.2553	1.2254	1.1790
0.4538	0.7824	1.0059	0.7882	1.1450	1.0625	1.2253	1.2233	1.2239	1.1511
0.3413	0.5313	1.1640	0.9152	0.9127	1.0511	1.1431	0.8530	1.2410	1.2239
0.4548	0.9961	1.0113	1.2267	1.2238	1.0122	1.1983	0.6861	1.2551	1.2380
0.4512	1.1802	0.7527	0.9403	0.5224	1.2133	1.2133	1.2238	1.2258	0.9177
0.4835	0.5907	0.8598	1.0620	1.2490	1.2133	0.4950	0.4466	1.2232	1.2336
0.6074	1.0646	1.0556	0.7856	1.0616	1.2000	1.2238	0.8917	1.1624	1.2508
0.4781	0.4987	1.2238	0.9134	0.8943	1.2504	1.2135	1.1562	1.2349	1.2488
0.7373	1.0114	1.0636	0.2356	1.1587	1.2143	1.1597	1.0641	0.9846	1.2505
0.3443	0.5237	0.6500	0.9982	1.1971	1.2131	1.1979	1.1504	0.5558	0.5555
0.4147	0.6560	0.9980	1.1582	1.2148	1.2271	1.2119	1.2483	1.2551	1.2123
0.3415	0.3120	0.7749	1.0615	1.0404	1.1984	1.2504	1.2253	0.8636	1.2550
0.5946	1.0256	0.6177	0.9999	1.2134	1.0615	1.2508	1.0015	1.2123	1.2550
0.9486	0.3579	1.0000	1.0537	1.0093	1.1584	1.0122	1.2253	0.5273	1.2460
0.3118	0.3245	0.4175	0.8776	0.9872	1.2349	1.2550	1.1462	0.6861	1.2239
0.7486	0.6078	0.4694	0.7749	1.2236	0.5778	1.2491	1.2279	1.1363	0.9533
0.5934	0.7371	1.1793	0.9331	1.2134	0.5220	1.0041	1.2287	1.2458	0.7398
0.3495	0.3415	1.0581	1.1674	1.2230	1.1451	1.2239	1.2491	1.2510	1.0071
0.4575	0.4512	1.0655	0.8251	1.0404	1.2228	1.2500	1.2239	1.2505	1.2410
0.5730	0.7266	0.8921	0.9892	1.0647	1.0747	1.0920	1.0850	1.1295	1.1384
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.7 3 bar 80°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları					3 bar 80°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.2553	1.2553	1.2553	1.2555	1.2575	1.2575	1.2575	1.2583	1.2608	1.2608
1.2484	1.2040	1.2555	1.2347	1.2547	1.1467	1.2556	1.0660	1.2605	0.5978
0.8616	1.2551	1.2424	1.2298	1.2117	1.2575	1.2576	1.2608	1.2501	0.4648
1.2495	1.0984	1.2507	1.2529	1.2450	1.2542	1.2288	1.2540	1.2566	1.1978
1.2503	1.2208	1.2549	1.2497	1.1258	1.2521	1.0748	0.6377	1.1861	1.2570
1.2504	1.2551	1.2545	1.2549	1.2302	1.2449	1.2575	1.2575	1.2583	1.2521
0.8738	1.2124	1.2551	1.2538	1.2530	0.5260	1.2545	1.2576	1.2549	1.2135
1.1929	1.2549	1.2520	1.2482	1.2492	1.2288	1.2555	1.2499	1.2557	1.2563
1.2435	1.2439	0.4993	1.2551	1.2062	1.2572	1.2551	1.2564	1.2568	1.2584
1.2334	0.4875	1.2495	1.1258	1.2552	1.2553	1.2574	1.2560	0.5953	1.2583
1.2549	1.2249	1.2496	1.2545	1.2410	0.6377	1.2575	1.2583	1.2161	1.2572
1.2383	1.2485	1.2403	0.5073	1.2550	1.2092	1.2553	1.2575	1.1691	1.2000
0.9750	1.2504	0.9217	1.2521	1.2553	1.2255	1.1608	1.2560	1.2576	1.2586
0.9389	1.2361	1.2504	1.2554	0.9716	0.9942	0.4767	1.1808	1.2520	1.1046
0.4886	1.2355	1.2553	1.2495	1.2551	1.2575	0.5949	1.2580	1.2560	1.2583
1.2236	1.2429	0.5379	1.2293	1.2552	1.2552	1.2499	1.2520	0.5970	1.2572
1.2464	1.254	0.5975	0.9938	1.2549	1.1798	1.1749	1.2443	1.2586	1.2573
1.2551	1.2519	1.2505	1.2552	1.2556	1.2523	1.2440	0.4899	1.2560	0.8765
1.2247	1.2419	1.2292	1.2450	1.2287	1.2297	1.1016	1.2551	1.2514	1.2564
0.9723	1.2197	1.2413	1.1936	1.2467	0.8742	1.2542	1.2574	1.2573	1.2568
1.0706	1.2505	1.2088	1.1538	1.2494	1.2494	1.2550	1.0947	0.6380	1.2370
1.0665	1.2326	0.9548	1.2508	1.2521	1.2450	1.1839	1.2586	1.2571	1.2500
1.2115	1.2552	1.2553	1.1531	1.2552	1.2551	1.2576	0.5018	1.2572	1.2563
1.1727	1.2551	1.2497	1.2495	1.1731	1.2550	1.2551	1.2098	1.2584	1.1134
0.5294	1.2498	1.2433	1.2575	0.5200	1.2546	1.2583	1.2572	1.2560	0.5953
1.2551	1.2413	1.2550	1.2130	1.1812	1.2543	1.1604	1.2561	1.2503	0.9445
1.2460	0.6156	0.6425	1.2549	1.2550	1.2542	0.5672	1.2551	1.1724	0.5964
1.1789	1.2541	0.5847	1.1959	1.2542	1.0957	1.2564	1.2443	1.2583	1.2574
1.2343	1.2497	0.9125	1.1818	1.1818	1.2539	0.6380	1.2583	0.5888	1.2570
1.2496	1.2463	1.2130	0.5319	1.2495	1.2551	1.2551	1.2545	0.5093	1.2564
1.1230	1.1914	1.1020	1.1746	1.2026	1.1722	1.1403	1.1684	1.1350	1.1254
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.8 3 bar 90°C için uygunluk değerleri

Kurutma şartları				3 bar 90°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.2825	1.3016	1.3016	1.3522	1.4371	1.4371	1.4371	1.4833	1.4957	1.4960
0.9201	0.9209	0.4254	0.8571	0.9587	1.4371	1.4371	1.4000	1.3521	1.4274
0.5980	0.8686	1.2507	1.3020	1.3015	1.3889	1.3099	1.3440	0.9936	1.3740
0.4117	0.4587	1.0390	0.8634	1.3525	0.8987	1.2999	1.3758	1.3986	1.4957
0.3633	0.4276	0.6632	0.7973	1.2447	1.3021	1.3945	1.3950	1.4876	1.3088
0.6557	0.3962	0.8936	1.1832	0.7508	1.0987	1.4833	1.3446	1.4857	0.5002
0.4922	0.6014	0.6120	1.1418	0.5823	1.3445	1.3440	1.1822	1.3445	1.4876
0.2793	1.2507	0.9194	0.4867	1.2039	1.3424	1.3764	1.2348	1.4277	1.4768
0.6789	0.9203	1.2388	1.0865	1.3018	1.2942	1.4127	1.2210	0.8212	1.4629
0.7973	0.5943	0.7960	1.1211	1.3446	1.3031	1.3890	1.2706	1.3738	1.4016
1.2113	0.4852	1.2414	1.0279	1.3015	1.4371	1.3966	1.3917	1.3276	1.4960
0.6798	1.3016	1.3522	1.3424	1.3663	1.3011	0.8703	1.0213	1.3759	1.3522
0.3801	0.7973	0.7813	0.4997	1.1057	1.4041	1.3663	1.4278	1.3283	1.3283
0.4500	0.4586	1.3016	1.4041	1.2909	1.3425	1.3427	1.3360	1.3414	1.3738
0.5421	1.2414	0.7032	0.8709	0.8691	1.3016	1.2095	1.4957	0.4457	1.3473
0.8586	0.5427	0.7973	1.3017	0.7631	1.2871	1.0882	1.3406	1.3631	1.4885
0.3725	0.6808	1.3016	1.0401	1.3016	1.3016	1.3543	1.3852	1.3852	1.4359
0.4827	0.6800	0.9317	1.3016	1.3016	1.2507	1.1823	1.3275	0.8797	1.0352
0.4587	0.9397	0.6808	0.9317	1.3012	1.4180	1.3359	1.0862	1.3771	1.3961
1.3016	1.0393	1.3014	1.3016	1.2925	1.3018	1.2504	1.4083	1.3287	1.4845
0.3665	0.6047	1.3016	1.2585	0.8503	1.3016	1.1952	1.3153	1.3274	1.4046
1.2909	0.7875	0.4429	1.2585	1.4371	1.3092	1.3155	0.8678	1.3522	0.5225
0.4511	0.6633	0.8565	1.3016	1.3016	1.4056	1.2453	1.3986	0.8071	0.8463
0.8479	0.8933	0.9317	1.2447	1.3427	0.9095	1.3018	1.3264	1.3990	1.4957
0.5943	1.2471	0.9902	1.1901	1.3424	1.3027	1.3984	0.8552	1.0862	1.3581
1.1778	0.4865	1.0215	0.8936	1.2447	1.2417	1.0292	1.2349	1.4960	1.3888
0.5388	0.9456	1.2362	1.1539	0.8935	1.4039	1.3880	1.3546	1.3526	1.4267
0.3961	0.4589	1.2585	1.4371	1.4041	1.3013	0.7576	1.3638	1.4317	1.3950
0.6808	1.3014	1.1539	1.3016	1.2585	1.3526	1.3271	1.4371	1.4370	1.4527
0.7865	1.2507	1.3369	0.8919	1.3016	1.3663	1.0193	1.4876	1.0194	1.4947
0.6782	0.8181	1.0020	1.1048	1.1915	1.3028	1.2752	1.3037	1.2680	1.3317
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.8 3 bar 90°C için uygunluk değerleri

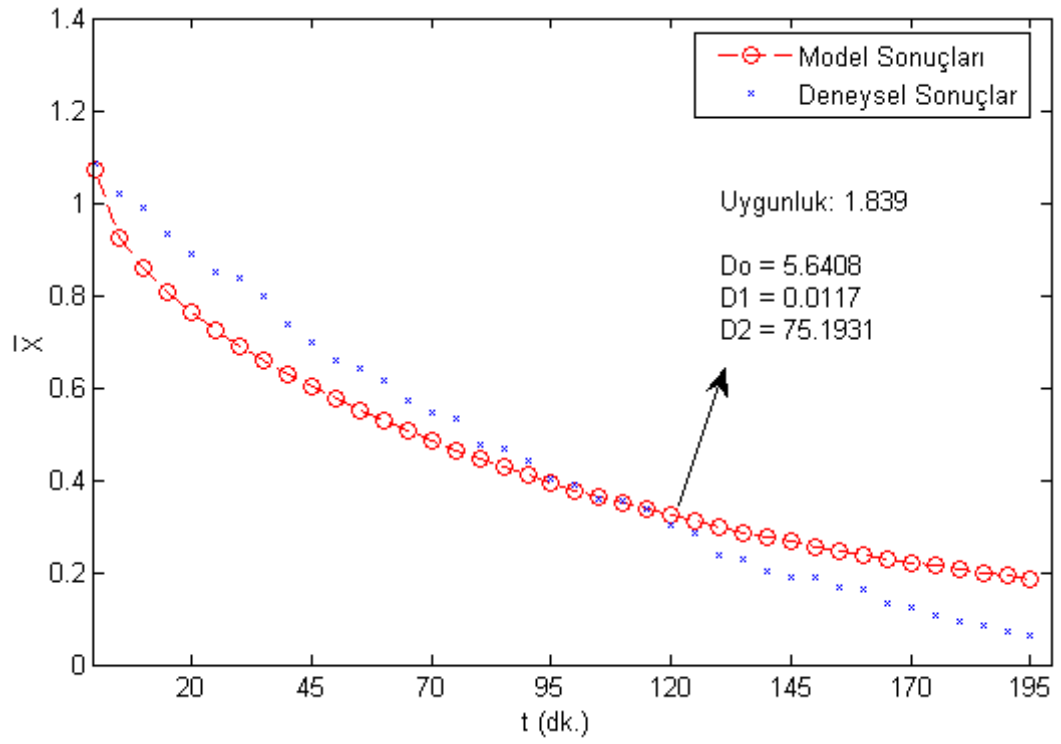
Kurutma şartları					3 bar 90°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.4960	1.5020	1.5020	1.5020	1.5020	1.5021	1.5022	1.5022	1.5022	1.5022
1.4360	1.1074	1.4959	1.4849	1.3228	0.7045	1.4918	1.4938	1.4859	1.4964
1.4261	1.4540	1.5020	1.0951	1.4923	1.4957	1.4829	1.1869	1.5021	1.4810
0.7636	1.4957	1.5013	1.4849	1.1573	1.4959	1.4096	1.4958	1.4979	1.5022
1.3419	1.4851	1.4882	1.4608	1.4845	1.3796	1.4248	1.4850	1.5021	1.5021
1.4274	1.4959	1.4715	1.4741	1.4649	1.4959	1.4670	1.1153	1.5022	1.1893
1.4845	1.3312	1.4910	1.4860	1.3799	1.5014	1.5021	1.4957	1.4910	1.5023
1.3667	1.4608	1.4957	0.5114	1.4876	1.4108	1.5021	1.5018	1.4957	1.5022
1.4807	1.3423	1.3631	1.4959	0.7607	1.4941	1.5018	1.5021	1.4670	1.5022
0.4903	1.4865	0.7073	1.5011	1.4741	1.0730	1.5022	1.4797	1.4958	1.4986
1.4871	1.4340	1.1931	0.8660	1.4945	0.5114	1.4936	1.4965	1.4798	0.7119
1.4016	1.4704	0.7439	1.1458	0.6663	1.4847	1.5021	1.3754	0.7148	1.5022
1.4959	1.4961	1.0800	0.4395	1.4847	1.4757	1.5014	1.0700	1.5022	1.5018
1.4629	1.4846	1.4607	1.4910	1.5018	1.5021	1.4094	1.5016	1.4861	1.4957
1.3391	1.3669	1.4959	1.4959	1.4016	1.4752	1.4795	1.5005	1.4957	1.4950
1.5020	1.4748	1.4849	1.4661	1.4959	1.4905	1.4958	1.3621	1.4670	1.5019
1.4085	0.5146	1.4844	1.5020	1.4918	1.4670	1.4959	1.5021	1.4326	1.4957
1.4629	1.4376	1.0436	1.4645	1.5021	1.4959	0.6870	1.0679	1.5022	1.4854
1.3143	1.1106	1.4959	1.4959	0.7381	1.3531	1.5019	1.4761	1.4965	1.5022
1.4845	1.4948	1.4944	1.5016	1.4646	1.4243	1.5022	1.4670	1.5005	1.5022
1.4129	1.5020	1.4827	1.4833	1.4957	1.0730	1.3269	1.4929	1.5005	0.5163
1.4796	1.3833	1.3825	1.4924	1.4959	0.7040	1.4941	1.4947	1.1874	1.4949
1.1090	1.4881	1.4935	1.3347	1.4909	1.4959	1.4245	0.7600	1.4738	1.4863
1.0799	1.4503	1.4851	1.4959	1.3526	1.3735	0.4372	1.4328	1.4965	1.4936
1.4881	1.4885	1.2979	1.4937	1.4751	1.4823	1.4847	1.5018	0.5173	1.5022
0.7603	1.2891	1.3669	1.1589	1.5013	1.5017	1.5019	1.5014	1.5021	1.5019
1.2521	1.4887	1.4935	1.4960	1.5017	1.5019	1.4906	1.5022	1.4851	1.4518
1.4849	1.4935	1.4645	1.4849	1.5020	1.4876	0.7521	0.7747	1.5022	0.7464
1.4528	1.4881	1.3430	1.0350	1.4959	1.4909	0.7336	1.4093	1.5018	1.5022
1.4886	1.4354	1.4748	1.4748	1.4876	1.5022	1.4761	1.4859	1.5022	0.4583
1.3360	1.3984	1.3759	1.3438	1.3855	1.3615	1.3659	1.3811	1.4229	1.3675
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.9 3 bar 100°C için uygunluk değerleri

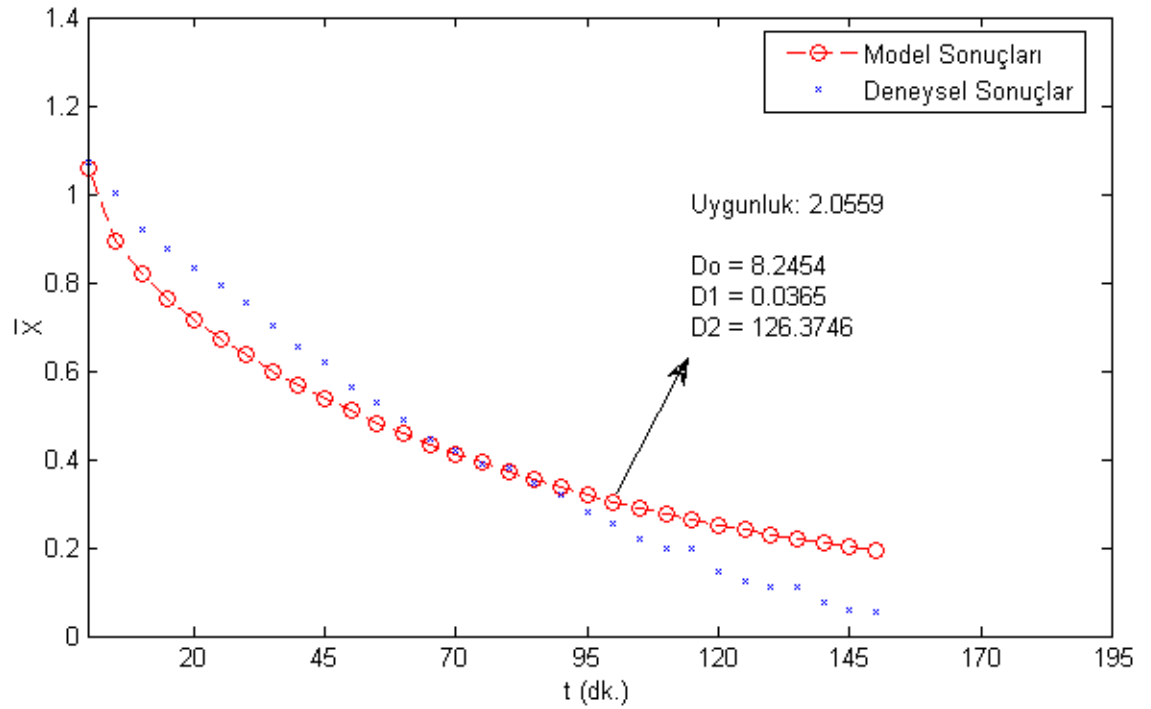
Kurutma şartları					3 bar 100°C				
D ₀ için değişken aralık değeri					12				
D ₁ için değişken aralık değeri					4				
D ₂ için değişken aralık değeri					200				
Nesil:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.3665	1.1747	1.1747	1.1765	1.1766	1.1766	1.1769	1.1929	1.1929	1.1957
1.1159	0.4417	0.4749	1.1038	0.9523	0.9907	1.0758	1.1769	1.1424	1.1274
0.3079	0.4360	0.7140	0.4329	1.1112	1.0782	1.1588	1.0142	1.1852	1.2001
0.3676	0.9115	0.9506	0.4633	0.4467	1.1765	1.1765	1.0998	1.1752	1.1645
0.3575	0.4502	0.4784	1.1747	0.3217	1.1058	1.0385	1.1443	1.1957	1.1385
0.5130	0.4353	0.4119	0.9013	0.3603	0.6076	1.1224	1.1584	0.5295	1.1654
0.4501	0.4242	0.7325	0.9331	1.1766	1.1347	0.8015	1.1758	1.1767	1.1753
0.3252	0.9580	0.4355	1.1008	1.0922	1.0982	1.1821	1.1769	1.0170	1.1752
0.9389	0.9645	0.4431	0.3107	0.9717	0.7262	1.1741	1.1827	0.8018	0.9121
1.0414	0.4385	0.9725	0.8007	1.1142	0.9146	1.1416	1.1298	1.1527	1.1769
0.5735	0.4957	0.4554	0.4253	1.1584	1.1528	1.1767	1.0607	1.1181	1.1846
0.3786	0.7882	0.9114	0.8813	1.1582	1.0289	1.1632	1.1818	1.1766	0.8084
0.5875	0.3855	1.1747	0.9717	1.1746	1.1760	1.0998	1.0472	1.1810	0.5495
0.9649	0.3674	1.0653	1.1751	1.1058	1.1424	1.1575	1.1220	1.1779	1.1850
0.4232	0.4452	1.1477	0.4461	0.9907	1.1477	1.0917	1.0774	1.1769	1.1947
0.3850	0.4109	0.3591	1.1563	1.0323	1.1548	1.1584	1.1527	1.1601	1.1870
0.3584	0.3855	0.6085	0.9134	0.4992	1.1751	1.1769	1.1840	1.0956	1.1766
1.1747	0.4147	1.0658	0.9615	0.5597	0.9879	1.0781	1.1416	1.1518	1.1354
1.1153	0.5768	0.4197	1.1142	0.9144	1.1432	1.1424	1.1769	1.1569	0.5066
0.6350	1.1478	0.4363	1.1766	0.9130	0.9080	1.1765	1.1588	1.0193	1.1417
0.5844	0.5122	0.9649	1.1552	0.6525	0.9144	1.1929	1.1561	1.1617	1.1452
0.8144	0.6008	1.1765	1.1414	1.1033	1.1766	1.1424	0.5511	1.0893	1.1957
0.7860	1.0661	0.8741	0.9649	0.8832	1.1582	1.1172	1.1902	1.1769	0.7807
0.4360	0.6078	0.4029	0.6085	0.8687	1.0605	1.0600	1.0866	1.1654	1.1828
0.3858	1.1030	1.1552	0.5451	1.0055	1.0055	0.9872	1.1770	0.5106	1.1618
0.3102	0.4754	1.0661	0.7891	1.1552	1.1058	1.1215	1.1588	1.1424	1.1565
0.4289	0.4364	0.7882	0.4250	0.9311	1.0283	0.9585	1.1905	1.1269	1.1766
0.2194	0.3800	0.4381	0.7340	1.1503	1.0886	0.8015	1.1767	1.1569	1.1527
0.4611	0.7326	1.1030	1.1747	1.1751	1.1769	1.1425	1.1424	1.1520	1.1773
0.4141	0.4077	0.4754	1.0387	1.1751	1.1585	1.1905	1.0757	1.1828	1.1766
0.5740	0.6124	0.7625	0.8731	0.9443	1.0633	1.1061	1.1219	1.0949	1.0935
Ortalama Uygunluk									

Tablo 7.9 3 bar 100°C için uygunluk değerleri

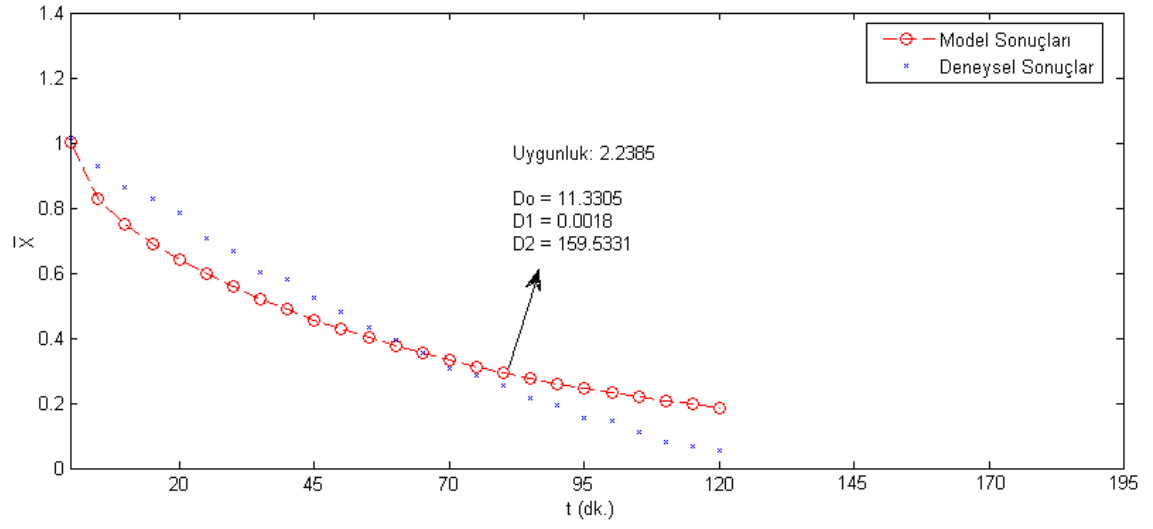
Kurutma şartları				3 bar 100°C					
D ₀ için değişken aralık değeri				12					
D ₁ için değişken aralık değeri				4					
D ₂ için değişken aralık değeri				200					
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.2001	1.2001	1.2020	1.2023	1.2023	1.2042	1.2066	1.2067	1.2067	1.2067
1.1645	1.1788	1.1958	1.1776	0.9378	1.1255	1.2034	1.1970	1.1854	0.9584
1.1709	1.1775	1.2023	1.2023	1.2042	1.0020	1.1958	0.9777	1.1876	1.1906
1.1954	1.1758	0.4093	1.1983	0.9340	1.1578	1.1333	1.2067	1.2041	0.5841
1.0869	1.1761	1.2002	1.1788	1.1468	0.9838	1.0789	1.2042	1.2045	1.2040
1.1758	1.1959	1.2020	1.1342	0.8834	1.1778	1.1101	1.2034	1.2045	1.1445
0.8822	1.2020	1.0603	1.1745	1.1949	1.1779	1.2018	1.2042	1.1678	1.2065
1.1753	1.1983	1.1953	1.1453	1.1982	1.1494	0.9669	0.9636	1.1974	1.2041
0.4048	1.1852	0.8826	1.1468	1.1613	1.0616	1.1293	1.2034	0.8841	0.9581
1.1958	0.4920	1.1642	0.5143	1.1866	1.1819	1.0621	1.2049	1.2060	1.2043
0.9287	0.5733	1.1799	1.2020	1.1429	0.8321	0.6086	1.0233	1.2055	1.2041
1.1369	1.1626	1.0848	1.1426	1.1997	1.2011	1.0620	1.1696	1.1723	1.2045
0.5457	0.8167	1.1758	1.2005	1.1961	1.1866	1.2022	1.1833	0.9540	1.2065
1.1129	1.1300	1.1815	1.2009	1.1223	1.1771	1.2041	1.1846	1.2066	1.1855
1.1645	0.8822	1.1984	1.1716	1.1997	0.7652	1.2067	1.2011	1.2042	1.2043
1.1791	0.8139	1.2009	1.1947	0.5162	0.8532	1.2042	1.1196	1.2019	1.2071
0.9116	1.1854	1.1759	1.2020	1.2009	1.0104	1.2042	0.9583	1.1980	1.2019
1.1983	1.0560	1.1983	1.2002	1.0505	1.2042	0.5158	1.2042	1.2046	1.2055
1.1501	1.0860	1.1958	1.1778	1.1502	1.2066	0.6716	1.2046	1.1996	1.2042
0.9157	1.1961	1.1776	1.1963	0.4727	1.1951	1.0097	1.1819	1.0453	1.1996
1.1302	1.1774	1.1350	0.5150	1.2022	1.1968	1.1968	1.2067	0.9584	1.1873
0.9615	1.2000	1.1536	1.1506	1.1789	1.2022	1.1415	1.1720	0.8937	1.1949
0.8290	1.1001	1.1776	1.2021	1.1961	1.0407	1.2034	1.2011	1.2038	1.2072
1.1508	1.1642	1.1788	1.2005	1.1342	1.2019	1.2042	1.2018	1.0578	1.2066
1.1775	1.1030	0.9352	1.1812	0.5582	1.2034	1.1819	1.2038	1.2042	1.1941
1.1409	1.1508	1.1303	1.1777	1.2022	1.1415	1.1254	1.0659	1.2043	1.1963
1.1852	0.4636	1.0825	0.9378	1.1745	1.1319	1.2042	1.2045	1.1988	0.8455
0.9081	1.1958	1.1963	1.1961	1.1778	1.2003	1.2011	0.5618	1.1906	1.2040
1.1766	1.1792	1.1983	0.4924	1.1961	1.1768	1.2026	1.2034	1.2041	1.1864
1.1830	1.0459	1.2006	1.1711	1.1292	1.2042	1.1696	1.1667	1.2041	1.2066
1.0579	1.0621	1.1290	1.1062	1.0816	1.1184	1.1002	1.1396	1.1519	1.1504
Ortalama Uygunluk									



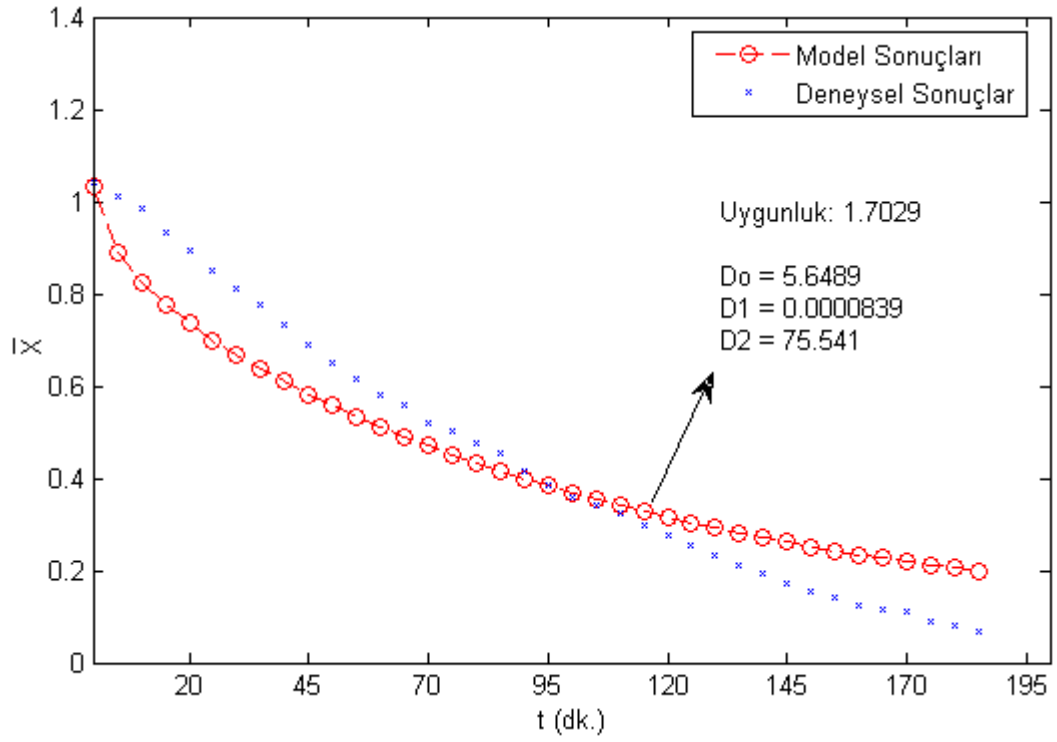
Şekil 7.1 1 bar 80°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



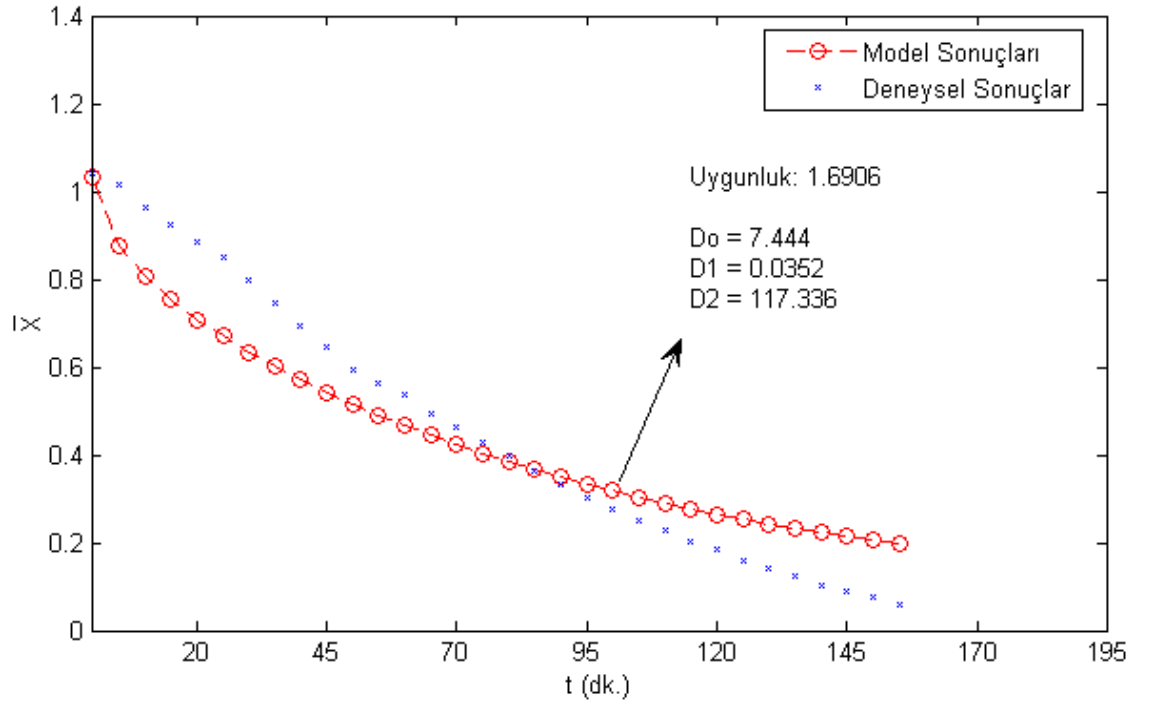
Şekil 7.2 1 bar 90°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



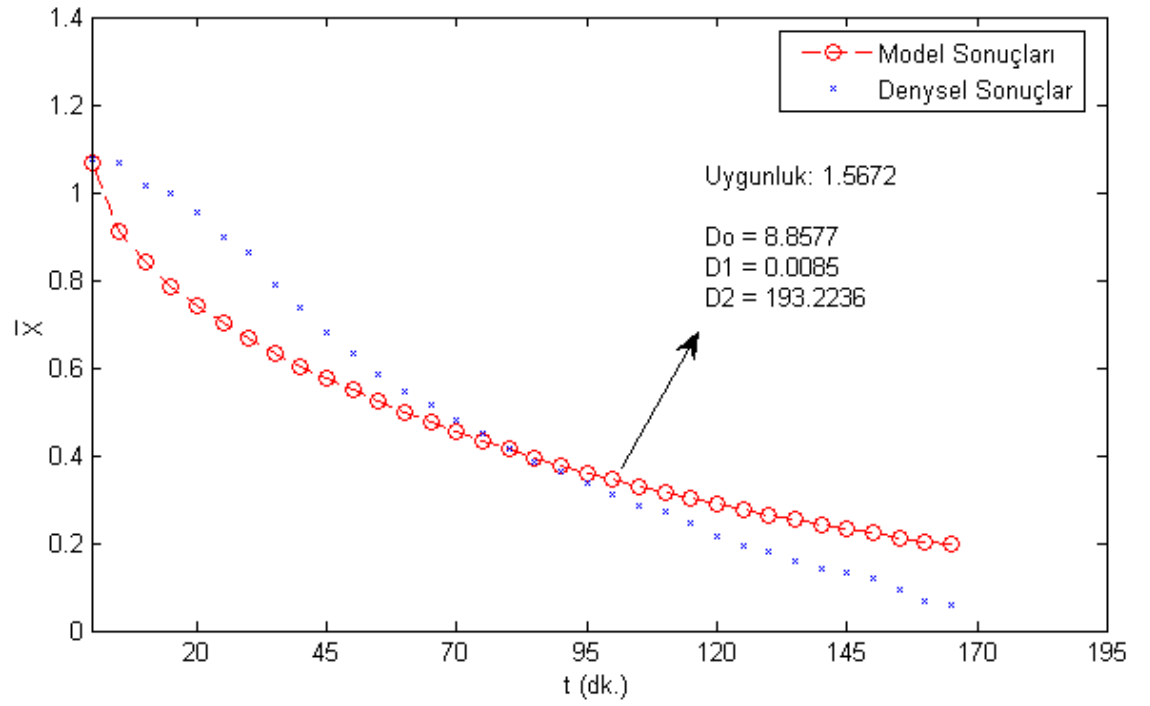
Şekil 7.3 1 bar 100°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



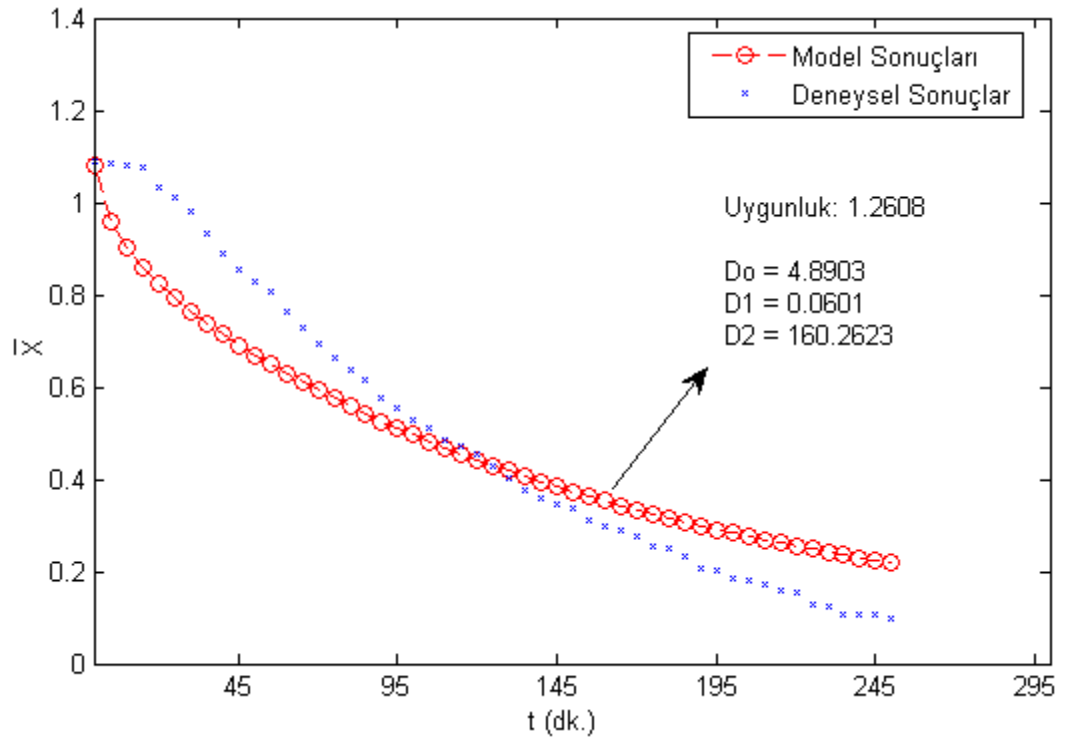
Şekil 7.4 2 bar 80°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



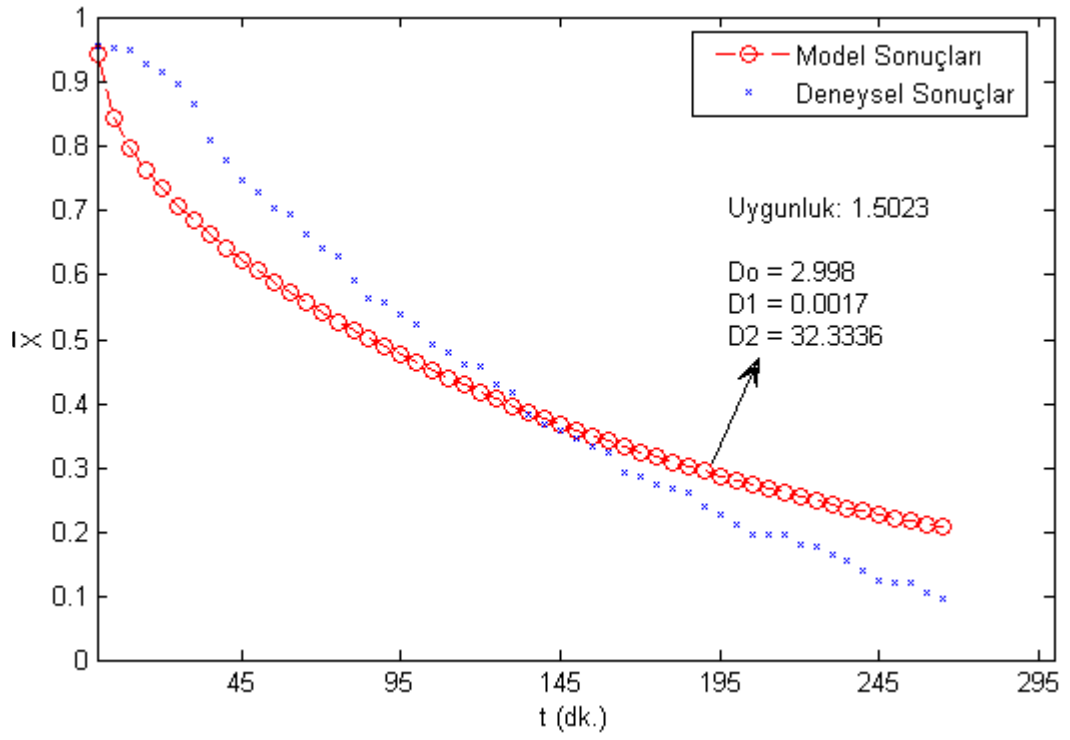
Şekil 7.5 2 bar 90°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



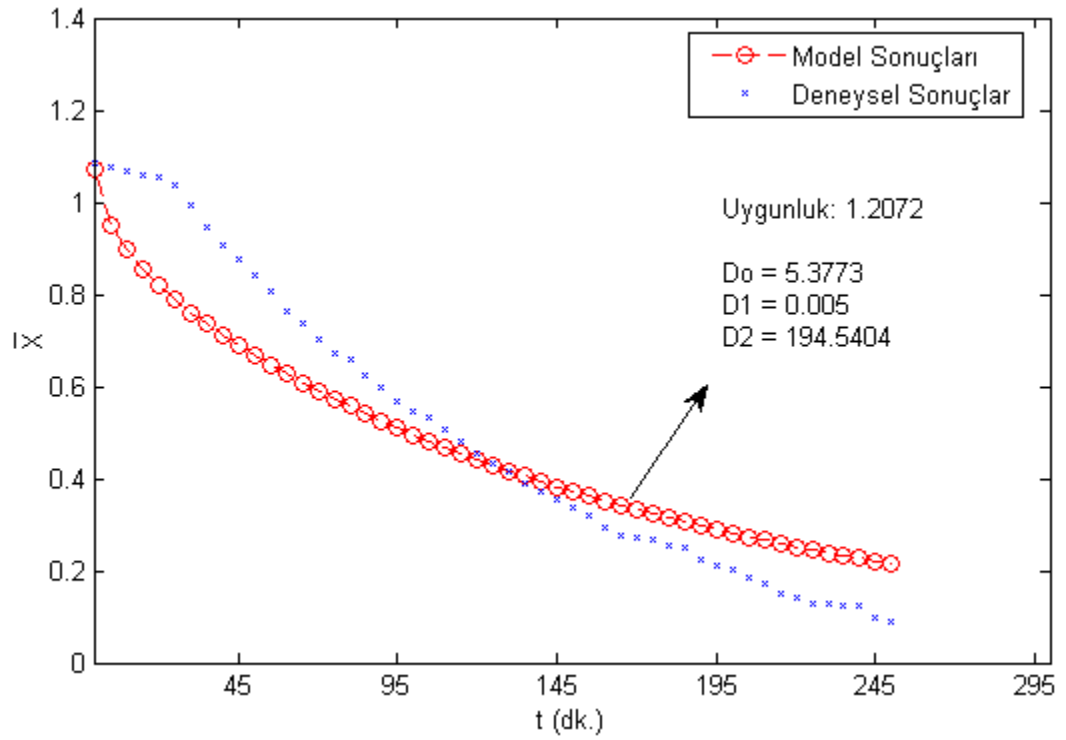
Şekil 7.6 2 bar 100°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



Şekil 7.7 3 bar 80°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

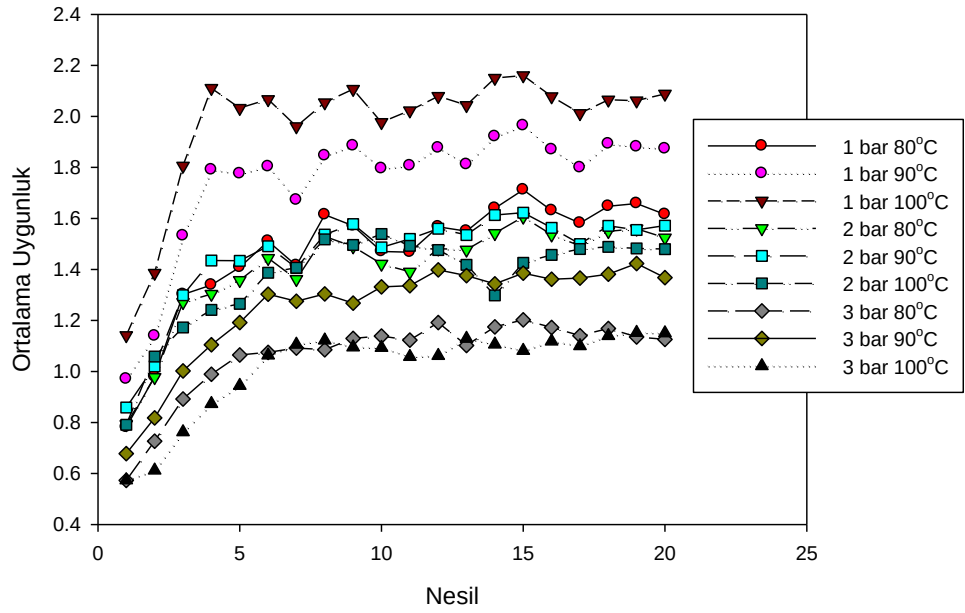


Şekil 7.8 3 bar 90°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması



Şekil 7.9 3 bar 100°C için G. A. model sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Diğer yandan her bir deney şartı için ilk dört ya da beş nesile kadar ortalama uygunluk değerlerinde nesil sayısı ile lineer bir artış görülürken, dördüncü ya da beşinci nesilden sonra bu artış hızı azalmaktadır (Şekil 7.10). Ortalama uygunluk değerinin yüksek olduğu deney şartları için, söz konusu lineer artışın sonlandığı nesil sayısı dört iken, diğerlerinde beş yada altıdır. Söz konusu artışın lineerliğinin bozulduğu nesilden sonra ortalama uygunluk değerlerinde ufak düşüş ve çıkışlar görülebilse de, on beşinci nesile kadar genelde bir artış söz konusudur. Genetik algoritma yirminci nesile kadar çalıştırılmış ve her bir deney şartı için yirminci nesilde en yüksek uygunluk değerleri elde edilmiştir. Her nesilde ortalama uygunluk değerinin en fazla olduğu deney şartı 1 bar 100°C içindir. Aynı zamanda yirminci nesil sonunda elde edilen en yüksek uygunluk bu deney şartı için elde edilmiş olup değeri 2.2385'dir. Basınç arttıkça ortalama uygunluk değerleri ve yirminci nesil sonunda elde edilen en yüksek uygunluk değerinin azaldığı görülmüştür.

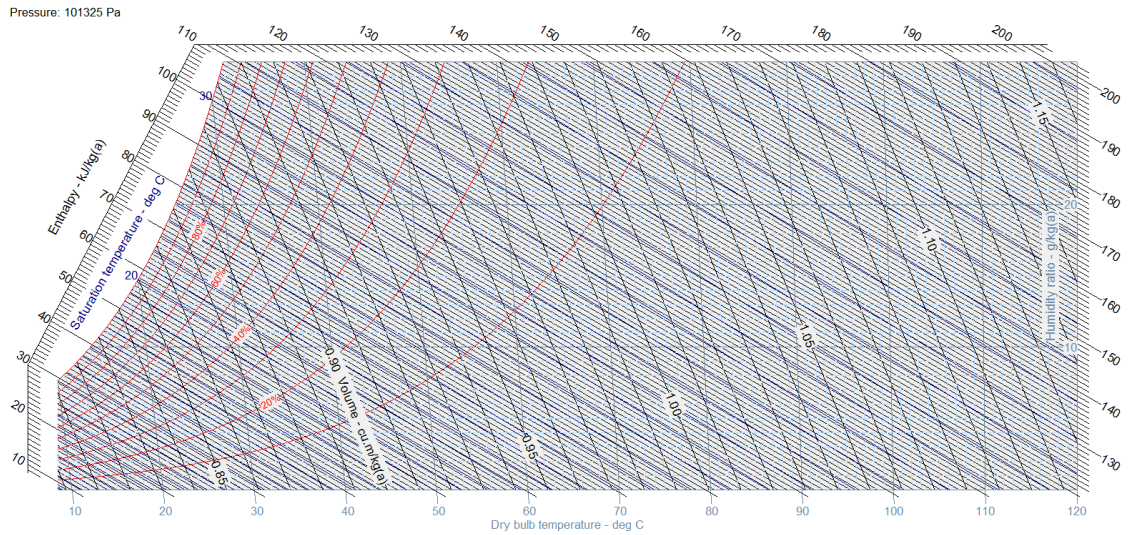


Şekil 7.10 Ortalama uygunluk değerlerinin nesillere göre değişimi

AKYOL, AKAN ve DURAK tarafından yapılan çalışmada [44] kuru baza göre nem içerik değerlerinin başlangıçta 1 olduğu görülürken, bu çalışmada söz konusu değerin 1'in üzerine çıkabildiği görülmüştür. Bunun nedeni ise yapılan bu çalışmada bobinin kuru kütlesi hesaplanırken makara ağırlığının toplam ağırlıktan çıkarılmasıdır.

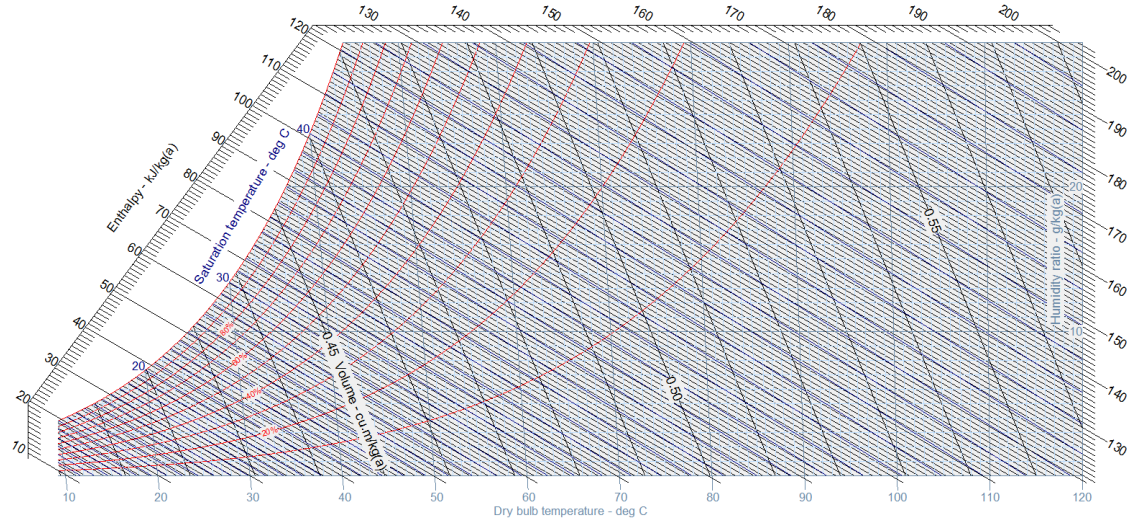
Kullanılan deneysel veriler kurutma havasının 1 bar 80°C 450m³/h, 1 bar 90°C 450m³/h, 1 bar 100°C 450m³/h, 2 bar 80°C 450m³/h, 2 bar 90°C 450m³/h, 2 bar 100°C 370m³/h, 3 bar 80°C 450m³/h, 3 bar 90°C 390m³/h, 3 bar 100°C 350m³/h değerleri içindir. 1 bar basınçta, 450 m³/h hacimsel debide kurutma şartları için sıcaklık arttıkça kuruma süresinin kısaldığı görülmüştür. Aynı hacimsel debide ve aynı kurutma havası basıncında sıcaklık arttırıldıkça kuruma süresinin kısılması beklenen bir sonuçtur. Çünkü sıcaklık arttıkça sabit özgül nem için bağıl nem azalmaktadır. Aynı hacimsel debilerde ve sıcaklıklarda yapılan deneylerde görülmüştür ki sıcaklık 80°C iken basıncın 1 bar'dan 2 bar'a çıkarılması kurutma süresini kısaltırken 3 bar'a çıkarılması bu süreyi arttırmaktadır. Benzer şekilde sıcaklık 90°C iken basıncın 1 bar'dan 2 bar'a çıkarılması kuruma süresini arttırmaktadır.

Portmantiyere giren havanın bağıl nemi ne kadar düşük olursa kuruma o derece kısa sürede gerçekleşir. Belirli bir özgül nem değerine sahip çevre havası kurutma havası sıcaklığına ısıtılarak portmantiyere gönderilmektedir. Bu arada havanın özgül nemi değişmemektedir. Şekil 7.11, 7.12 ve 7.13’den de görüleceği gibi belirli bir kurutma havası sıcaklığı ve özgül nem değeri için basıncın artırılması havanın özgül hacminin düşmesine yani yoğunluğunun artmasına sebebiyet vermektedir. Kurutma havasının yoğunluğundaki bu artış kuruma hızını artırıcı bir etkiye sahiptir. Diğer yandan yine belirli bir kurutma havası sıcaklığı ve özgül nem değeri için basıncın artırılması havanın bağıl nemini arttırmaktadır. Basıncın artırılmasıyla daha yüksek bağıl nemde portmantiyere giren kurutma havası, bağıl nemindeki artış nedeniyle kuruma sürecinin uzamasına neden olmaktadır. Bu durumda basıncın artırılması sonucu, havanın yoğunluğundaki artışın yarattığı kuruma süresini kısaltıcı etki eğer bağıl nemindeki artışın yarattığı kuruma süresini uzatıcı etkiden küçükse kuruma süresi basınç artışıyla uzayacaktır. Şekil 7.11, 7.12 ve 7.13 CYTSoft Psychrometric Chart 2.2 Demo programından alınmıştır.



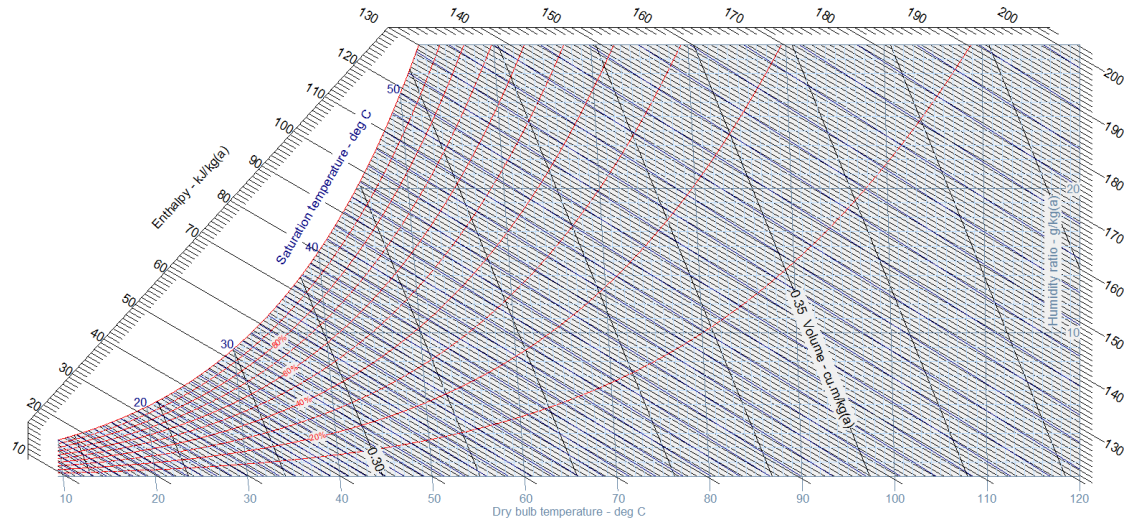
Şekil 7.11 1 bar basınç için Psikrometrik Diyagram

Pressure: 202650 Pa



Şekil 7.12 2 bar basınç için Psikrometrik Diyagram

Pressure: 303975 Pa



Şekil 7.13 3 bar basınç için Psikrometrik Diyagram

Diğer yandan burada amaçlanan söz konusu kuruma şartları için difüzyon katsayısının sıcaklığa ve nem içeriğine bağlı en uygun değerlerinin genetik algoritma metoduyla tespit edilmesidir. Bu şekilde tespit edilen en uygun difüzyon katsayısı için model sonuçları ve deneysel sonuçlar bir arada verildiğinde kuruma süresi sonunda model sonuçlarına göre elde edilen nem değeri deneysel olarak elde edilen değerden

fazladır. 3 bar basınç için model sonuçlarının uygunluk değeri en düşük olanlar olması ve kuruma sonunda model sonuçları ve deneysel sonuçlar arasındaki bu sapma nedeniyle, 3 bar basınç için kuruma, denge nemine ulaşılması beklenmeden, nem değeri 0.09 (kb) civarı olduğunda sonlandırılmıştır. Burada amaçlanan incelenen aralıkta uygunluk değerinin yükseltilmesidir. Bu şekilde söz konusu kuruma aralığı için difüzyon katsayısının Arrhenius tipi eşitliği elde edilmiştir. Debinin azalması kuruma süresini arttırırken, sıcaklığın artması kuruma süresini kısaltmaktadır. Bu yüzden, kurutma havasının 3 bar 80°C ve 3 bar 100°C değerleri için aynı süre sonunda elde edilen nem içerik değerleri yakındır.

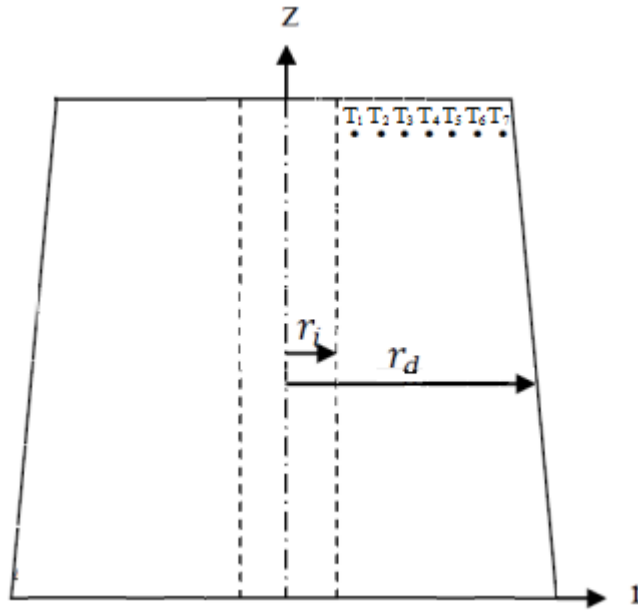
7.2. Bobinin Kuruma Davranışını Modelleyen İkinci Matematiksel Model

Sonuçları

7.2.1. Çözülecek Denklem, Başlangıç ve Sınır Şartları

Çözülecek kısmi türevli diferansiyel denklem, başlangıç ve sınır şartları aşağıda verildiği gibidir.

$$K_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = (K_2 + K_3) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7.1)$$



Şekil 7.14 İplik bobininin şematik görünüşü

Bobin içten dışa kurutulduğundan, iç yüzey sıcaklığı kurutma havası sıcaklığı olarak alınmıştır, dış yüzey sıcaklığı için ise 6. Bölümde zamanın fonksiyonu olarak elde edilen ifadeler kullanılmıştır.

$$T(r = r_i = 0.027m) = T_{ext} \quad (7.2)$$

$$T(r = r_d = 0.08m) = T_d(t) \quad (7.3)$$

$$T(t = 0) = T_o = 20^\circ C \quad (7.4)$$

7.2.2. Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemlerin Sınıflandırılması ve Modelin

Çözümü

İki bağımlı değişken içeren, homojen olmayan, sanki lineer ikinci mertebe genel bir kısmi diferansiyel denklem (7.5)'deki gibi ifade edilir ve Tablo 7.10'a göre sınıflandırılır [45].

$$Au_{xx} + Bu_{xy} + Cu_{yy} + Du_x + Eu_y + Fu = G \quad (7.5)$$

Tablo 7.10 Kısmi diferansiyel denklemlerin sınıflandırılması

$B^2 - 4AC$	Sınıflandırma
Negatif	Eliptik
Sıfır	Parabolik
Pozitif	Hiperbolik

(7.5) denkleminde A, B ve C katsayıları x, y, u_x ve u_y 'ye, D, E, F katsayıları x, y ve u ' ya, G katsayısı ise x ve y' ye bağlı olabilir [45].

(7.1) kısmi türevli diferansiyel denklemi Matlab'de çözülecek olup ilgili literatürle benzerlik için bağımlı değişken T, bağımsız değişkenlerden r sırasıyla u ve x simgeleriyle ifade edilmiştir. Bu durumda denklemin düzenlenmiş hali aşağıdaki gibidir.

$$\underbrace{K_1}_A u_{xx} + \underbrace{\left(\frac{K_1}{x}\right)}_D u_x + \underbrace{(-K_2 - K_3)}_E u_t = \underbrace{0}_G \quad (7.6)$$

(7.5) diferansiyel denklemine benzetilen (7.6) kısmi türevli diferansiyel denklemi B^2-4AC terimi sıfır olduğundan parabolik yapıdadır. Matlab Programında, kısmi türevli diferansiyel denklem başlangıç sınır değer problem çözücüsü (PDE Initial-Boundary Value Problem Solver, pdepe) kullanılarak söz konusu kısmi türevli diferansiyel denklem çözülmüştür. Kısmi türevli diferansiyel denklem başlangıç sınır değer problem çözücüsü, bir boyutsal değişkene ve zamana bağlı, parabolik ve eliptik formdaki kısmi türevli diferansiyel denklem sistemleri için başlangıç değer problemlerini çözmek için kullanılır. pdepe çözücüsünde kısmi türevli diferansiyel denklem aşağıdaki gibi tanımlanır [46].

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \quad \begin{array}{l} t_0 \leq t \leq t_f \\ a \leq x \leq b \end{array} \quad (7.7)$$

Söz konusu çözücünde başlangıç ve sınır şartları ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [46].

$$u(x, t_0) = u_0(x) \quad t = t_0 \quad (7.8)$$

$$p(x, t, u) + q(x, t, u) f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0 \quad x = a \text{ veya } x = b \quad (7.9)$$

(7.7) denkleminde $m = 0$ kartezyen koordinatlara, $m = 1$ silindirik koordinatlara, $m = 2$ küresel koordinatlara karşılık gelmekte olup, oluşturulan model silindirik koordinatlarda olduğundan (7.6) denklemi (7.7) denklemine benzetilmeye çalışılırken m sabiti 1 olarak alınır. m sabiti 1 olarak alınıp düzenlendiğinde (7.7) eşitliği (7.10) eşitliğine dönüşür. Bu forma benzetilmeye çalışılan temel denklem (7.6) ise (7.11)'deki gibi olur.

$$c \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{f}{x} + s \quad (7.10)$$

$$(K_2 + K_3)u_t = K_1 u_{xx} + \frac{K_1}{x} u_x \quad (7.11)$$

Bu durumda, katsayılar aşağıdaki gibi eşitlenirse (7.10) ve (7.11) denklemleri aynı forma kavuşmuş olur.

$$c = K_2 + K_3 \quad (7.12)$$

$$s = 0 \quad (7.13)$$

$$f = K_1 u_x \quad (7.14)$$

Sınır ve başlangıç şartlarının tanımlanması için ise denklem (7.8) ve (7.9)'a uygun olarak ilgili değişkenler aşağıdaki gibi girilmiştir.

$$u_0 = 20^\circ\text{C} \quad t = 0 \quad (7.15)$$

$$p_l = u_l - T_{\text{ext}} \quad x = a \text{ (} r = r_i \text{)} \quad (7.16)$$

$$q_l = 0 \quad x = a \text{ (} r = r_i \text{)} \quad (7.17)$$

$$p_r = u_r - T_r \quad x = b \text{ (} r = r_d \text{)} \quad (7.18)$$

$$q_r = 0 \quad x = b \text{ (} r = r_d \text{)} \quad (7.19)$$

Burada l alt indisi sol yüzeyi, r alt indisi ise sağ yüzeyi temsil etmektedir. Elde edilen model sonuçları ve deneysel sonuçlar aşağıda verildiği gibidir. Kurutma havasının bobinden çıktığı yüzeyin sıcaklığı T_r için 6. Bölüm'de tespit edilen zamana

bağlı üç parçalı fonksiyonlar kullanılmıştır. Model ve deney sonuçları Şekil 7.15-7.32’de verilmiştir.

Söz konusu modelde basıncın termofiziksel özellikler üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Daha önce tespit edilip 6. Bölüm’de verilen termofiziksel özellikler içerisinde basıncıdaki değişimlerden en fazla etkilenecek termofiziksel özellik kuru havanın yoğunluğu ρ_A ’dır. Model sonuçları alınırken kuru hava yoğunluğu ifadesinin basınç, havanın gaz sabiti ve sıcaklığın fonksiyonu olarak $\rho_A = P/(RT)$ şeklinde ifade edilmesinin model sonuçlarını etkilemediği görülmüştür. Bu modelde amaç bobinin kuruması sırasında bobin içi sıcaklık dağılımının tahmin edilmesidir. Elde edilen ve sıcaklık dağılımının bağımlı değişken olduğu bu modelde (denklem (7.1)), diğer katsayılar K_2 ’dir K_2 sabiti içinde $(1 - \epsilon)(1 - \epsilon_f)\rho_k c_k$ terimi diğer terimlere göre oransal olarak çok büyük olup ρ_A terimini içermemektedir. Zaten bobini terk eden havanın sıcaklığı deneysel verilere eğri uydurularak zamanın fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Bu durumda bobin efektif özellikleri için farklı ifadeler türetilerek geliştirilen ve bobin içerisinde sıcaklık dağılımının bulunmasına yönelik bu modelde basıncın sıcaklık dağılımı üzerine etkisi yoktur denebilir. Zira modelin iskeletini oluşturan (6.30) eşitliğine bakıldığında ρ_A terimi aktarım terimleri içerisinde ve bobin içindeki boşluktaki havanın depolama teriminde kendini göstermektedir. Aktarım terimlerinde hız düşük ve söz konusu bobin içi boşluktaki havanın depolama terimi ihmal edilebilir mertebede olduğundan havanın yoğunluğu üzerinde basıncın etkisini katmanın sonuçları değiştirmeyeceği aşıkardır.

Bobin içerisindeki iplik yüzeyleri sürtünme etkisi yaratacak, kaymama şartından hava hızı iplik yüzeylerinde yaklaşık sıfır olacaktır. Diğer yandan bobinin geçirgenliği çok düşüktür, Darcy yasasına göre bobin içinde gözeneklerden geçen hava hızının ihmal edilebilir mertebede olması doğaldır. Bu durumda kuruma sürecinde kendini gösteren aktarım terimlerinin etkisi, bobin içerisinde çok düşük hızlar söz konusu olduğundan çok düşüktür.

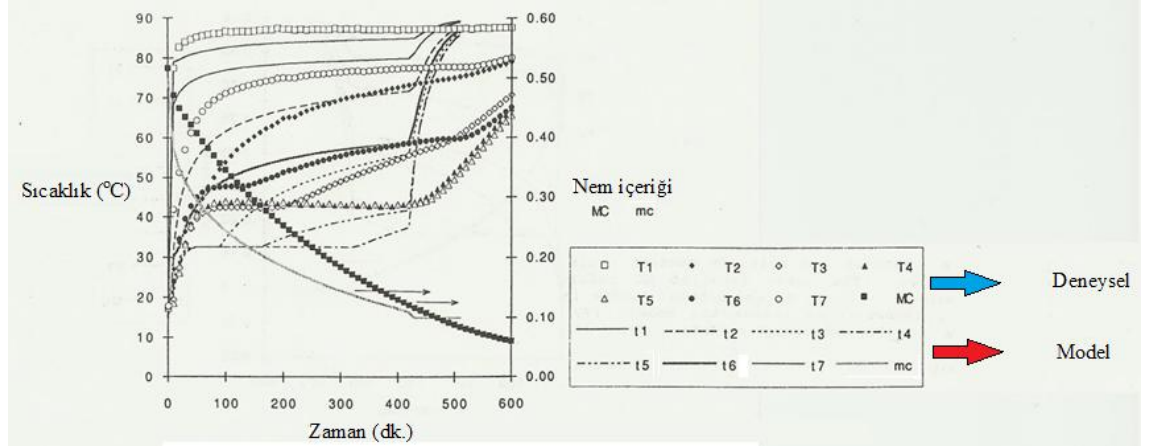
Model şu prensibe dayanarak oluşturulmuştur: Su ipliklerin içerisinde, hava ise ipliklerin üzerinden geçmektedir. Buharlaşma ipliklerin içerisinde vuku bulur. Modelin iskeletini oluşturan (6.30) denkleminde de görüleceği üzere, su buharı yoğunluğu ρ_B açık olarak aktarım teriminde ve depolama terimlerinde kendini

göstermektedir. Modelde aktarım terimlerinin etkisi ihmal edilmiştir. Aynı zamanda ele alınan diferansiyel kontrol hacmi için boşluklarda depolanan enerji, ipliği oluşturan katı matriste depolanan enerjinin yanında küçüktür ve ihmal edilmiştir.

Diğer yandan, literatürden [35,36] su buharı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı ifadesi ($\rho_B = \rho_A a_1 + \rho_A b_1 T$) gibi gözenekli ortam için su buharı yoğunluğunu veya havanın yoğunluğunu basınçla ilişkilendiren yeni bir korelasyonun türetilmesi modeli geliştirecek bir etken olacaktır. Bu tarz bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu model, higroskopik malzemelerde kuruma sırasında sıcaklık dağılımının tespitine yönelik bir yaklaşım ileri sürmektedir. Sıcaklık dağılımı üzerinde hangi terimlerin etkisinin büyük, hangi terimlerin etkisinin ihmal edilebilir mertebede olduğunu göstermektedir. İpliğin depolama ve ısı iletim terimleri efektif büyüklükler cinsinden tanımlanmıştır. Söz konusu efektif terimlerde ipliğin katı matrisinin etkisi diğer terimlerin etkisine nazaran daha fazla olduğundan modelden istenen sonuç alınmıştır.

Model sonuçları kuruma sırasında bobin içi sıcaklık dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Bu da malzeme kalitesinin korunması açısından önem arz eder. Bobinin kurutulması içten dışa doğru yapılmak olup, her bir deney şartı için en iç ve en dıştaki sıcaklıklar deneysel verilerle en fazla uyum içerisinde olanlarıdır. Burada tüm sıcaklıklar bobin et kalınlığı içerisinde ölçülen sıcaklıklar olup, en iç ve en dıştaki sıcaklıkların yüzey sıcaklıkları olmadığına dikkat çekilmelidir.

Kuruma sırasında bobin içerisinde yaş ve kuru bölgeleri ayıran hareketli bir sınır oluşmaktadır. Hareketli sınır kuruma ilerledikçe kurumanın yönüne bağlı hareket etmektedir. Gerçekte buharlaşmanın büyük kısmı bu hareketli sınır üzerinden olmakta ve faz değişimi sırasında ise sıcaklık sabit kalmaktadır. O yüzden deneysel sonuçlara bakıldığında herhangi bir konum için sıcaklığın önce arttığı, daha sonra sabit kaldığı, sonra yine arttığı ve en sonunda da kurutma havası sıcaklığında sabit kaldığı görülmektedir. Model sonuçlarına bakıldığında, elde edilen sonuçların RIBERIO ve VENTURA'nın [15] rüzgar tüneli içerisine yerleştirilen iplik bobininin kurutulması için geliştirdikleri modelin sonuçlarına benzerliği dikkat çekmektedir.

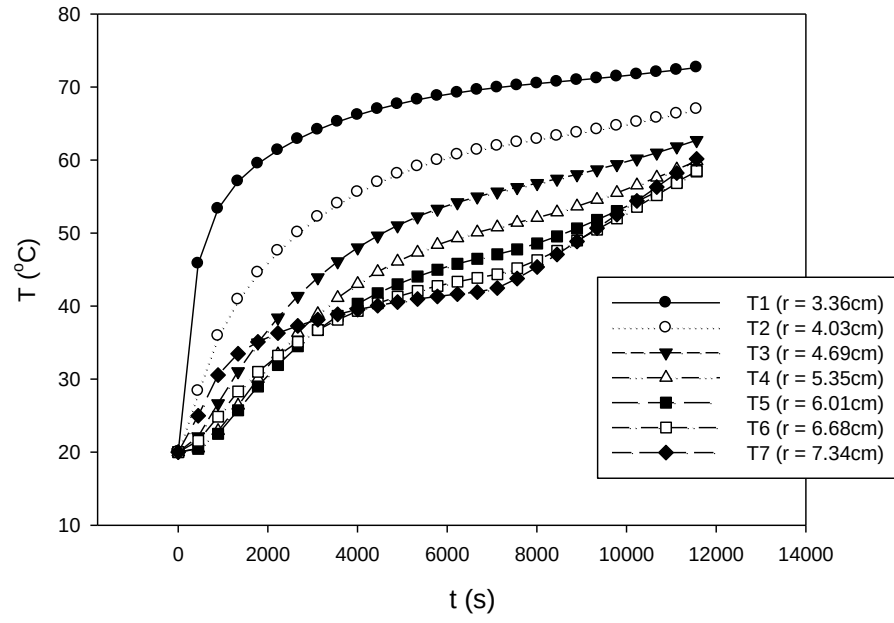


Şekil 7.15 Literatürdeki kuruma modelinde bobin içi sıcaklık dağılımı ve bobinin nem içeriğinin deney ve model sonuçları (Kurutma havası sıcaklığı 90°C’dir.) [15]

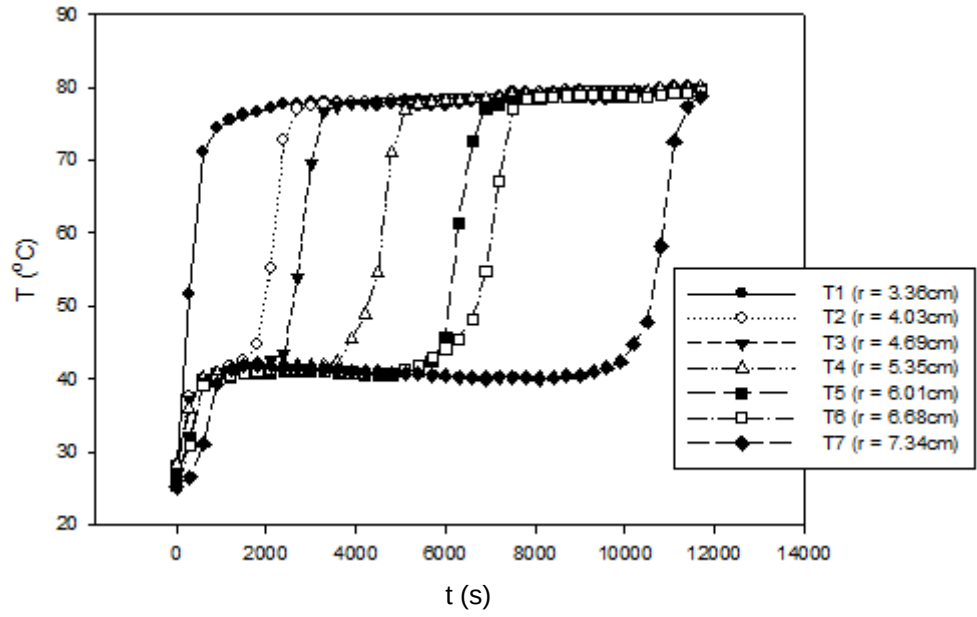
Modelde kurumanın başlarında, deneysel sonuçlarda ise bazı yerlerde, özellikle 1 bar, 80°C kurutma havası için 2000s civarında, 3 bar, 100°C kurutma havası için 900s civarında T_7 sıcaklığının T_6 sıcaklığından büyük olduğu görülmüştür. Bu sıcaklık düşüşünün nedeni için, içten dışa kurutmada dış bölgeye göre göreceli olarak daha düşük sıcaklığın görülebildiği iç bölgede bobine verilen ısının büyük kısmının buharlaşmaya harcandığı şeklinde yorum yapılabilir.

Diğer yandan 1 bar ve 2 bar şartları için kurumanın sonlarında T_7 sıcaklığının T_6 sıcaklığından çok az da olsa yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun nedeni ikinci matematiksel model oluşturulurken, Şekil 6.11 ve 6.12’de görüldüğü gibi bobin dış yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi için uydurulan üç parçalı eğride son kısımda deneysel verilerden olan hafif sapmadır.

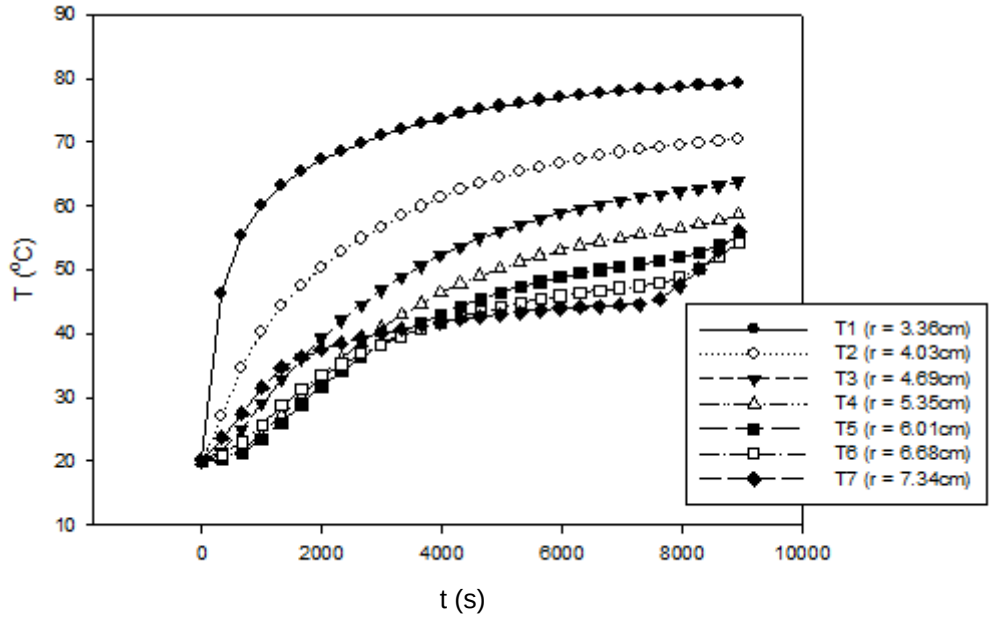
Bobin çok az konik formda olup alınan dış yarıçap değeri ortalama yarıçaptır. Deneysel veriler alınırken aynı şartlar için deneyler, termokupllar farklı açılarda yerleştirilerek birkaç kez tekrarlanmış, sıcaklığın yalnızca radyal doğrultuda değiştiği görüldüğünden analizler bir boyutlu yapılmıştır.



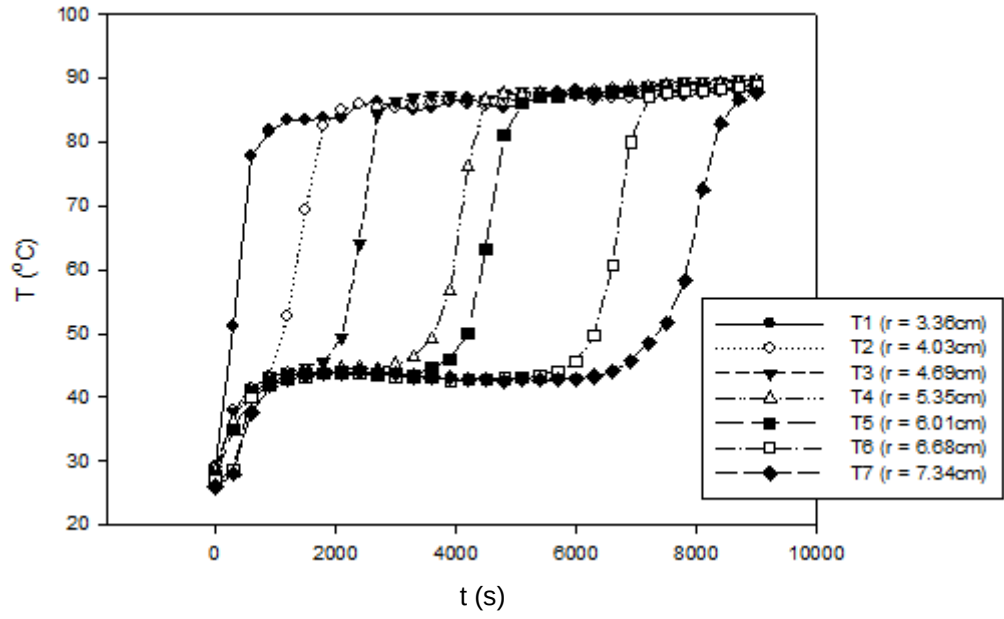
Şekil 7.16 1 bar 80°C için ikinci matematiksel model sonuçları



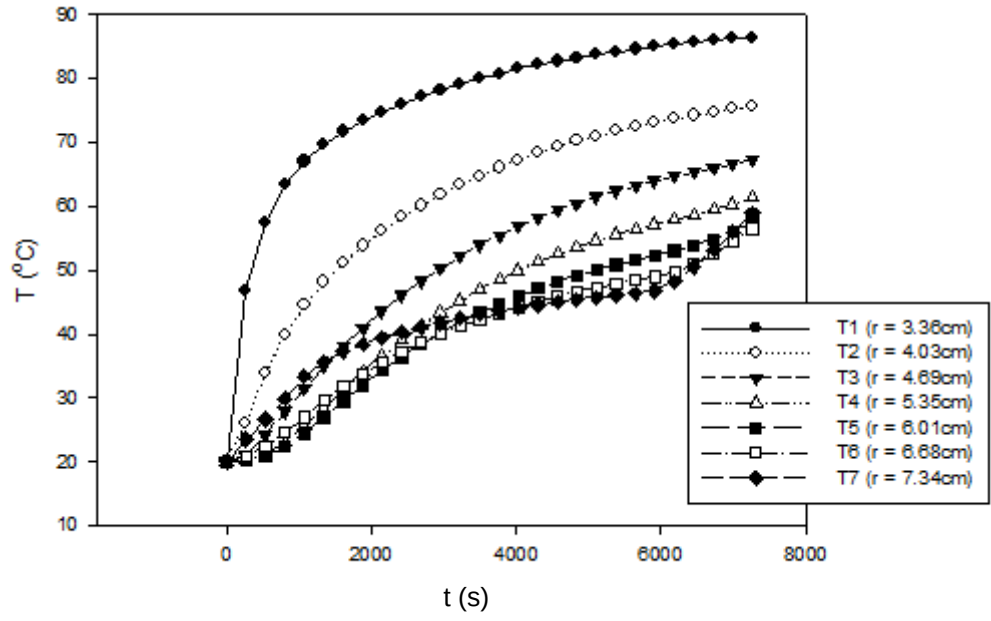
Şekil 7.17 1 bar 80°C için sıcaklığın zamanla değişimi



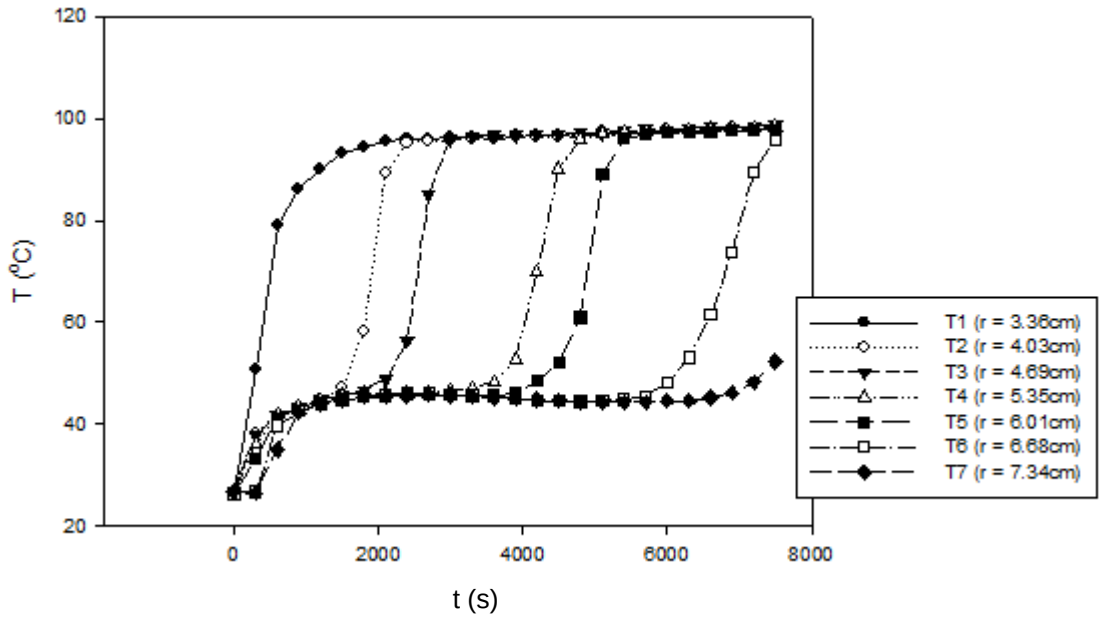
Şekil 7.18 1 bar 90°C için ikinci matematiksel model sonuçları



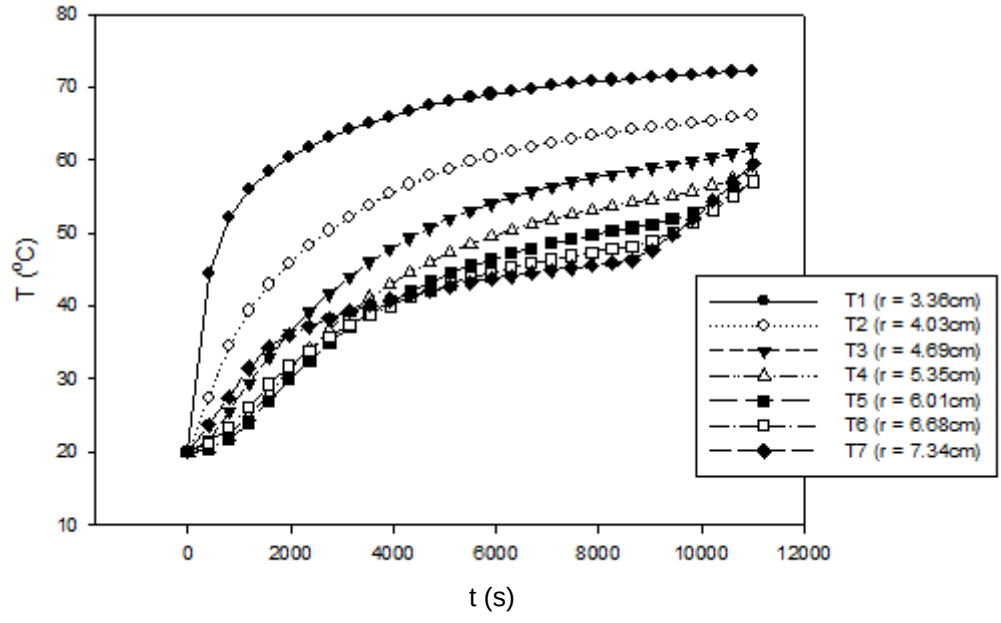
Şekil 7.19 1 bar 90°C için sıcaklığın zamanla değişimi



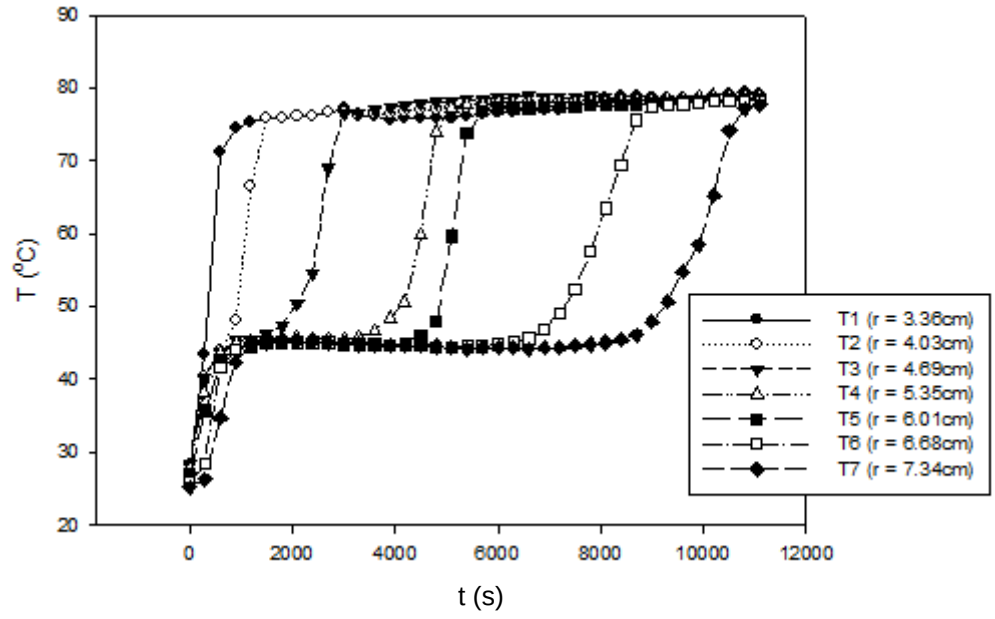
Şekil 7.20 1 bar 100°C için ikinci matematiksel model sonuçları



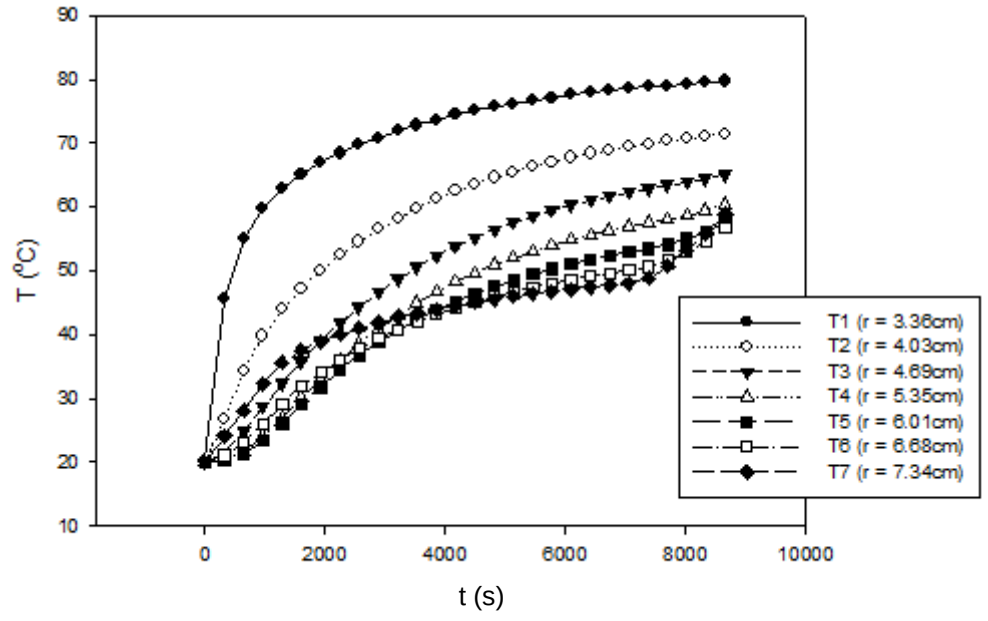
Şekil 7.21 1 bar 100°C için sıcaklığın zamanla değişimi



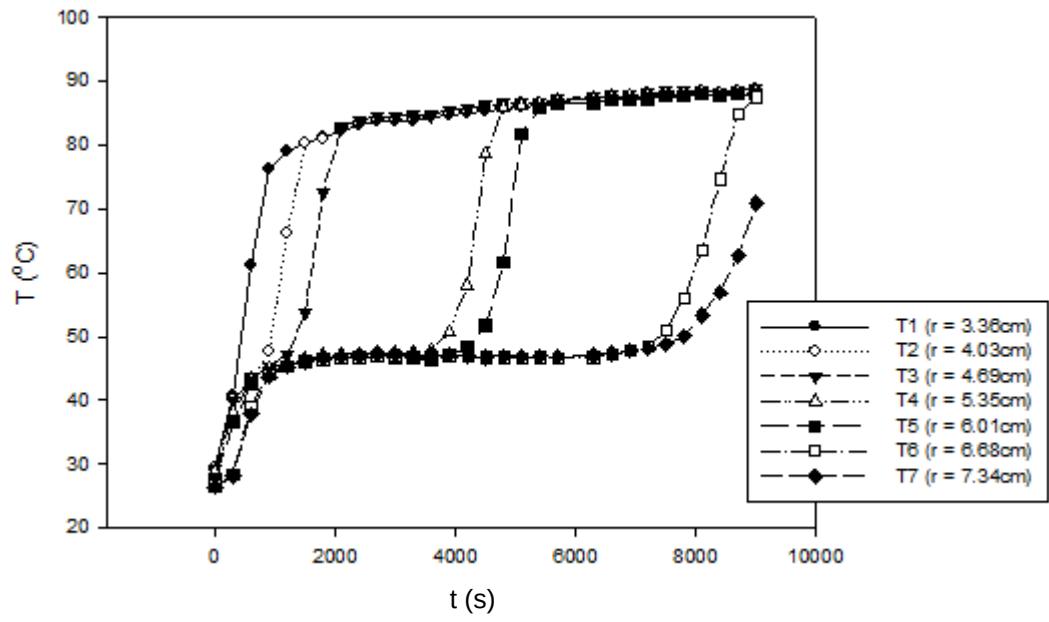
Şekil 7.22 2 bar 80°C için ikinci matematiksel model sonuçları



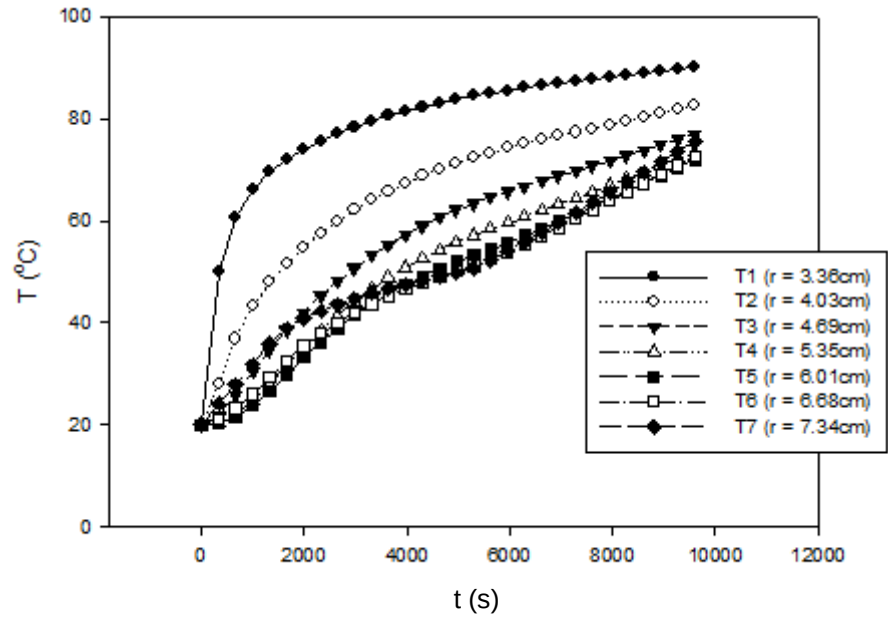
Şekil 7.23 2 bar 80°C için sıcaklığın zamanla değişimi



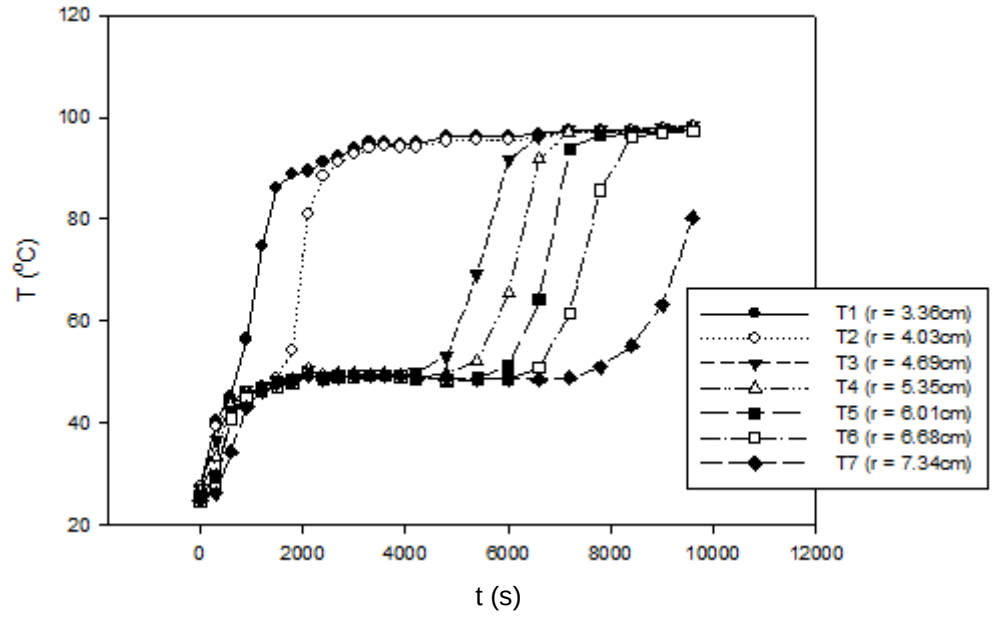
Şekil 7.24 2 bar 90°C için ikinci matematiksel model sonuçları



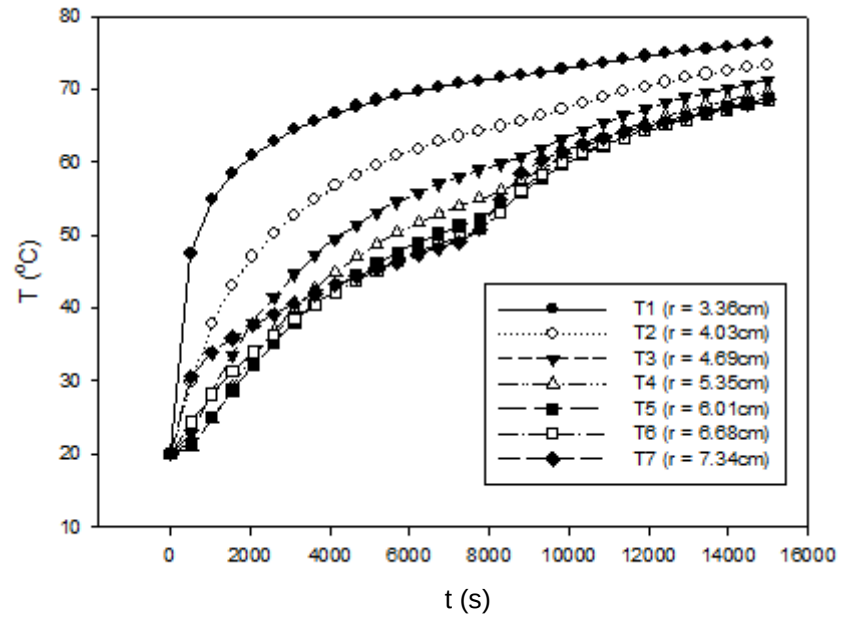
Şekil 7.25 2 bar 90°C için sıcaklığın zamanla değişimi



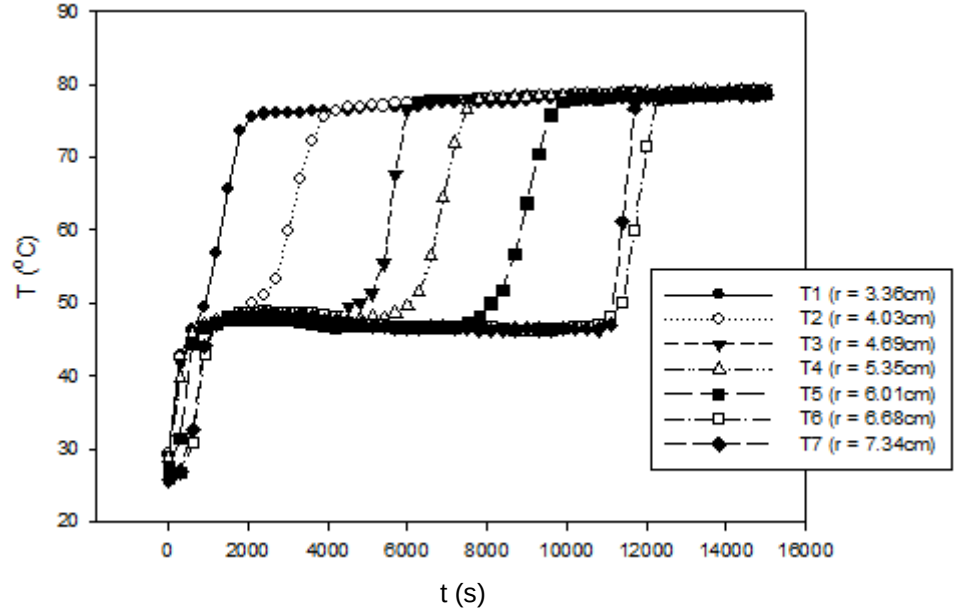
Şekil 7.26 2 bar 100°C için ikinci matematiksel model sonuçları



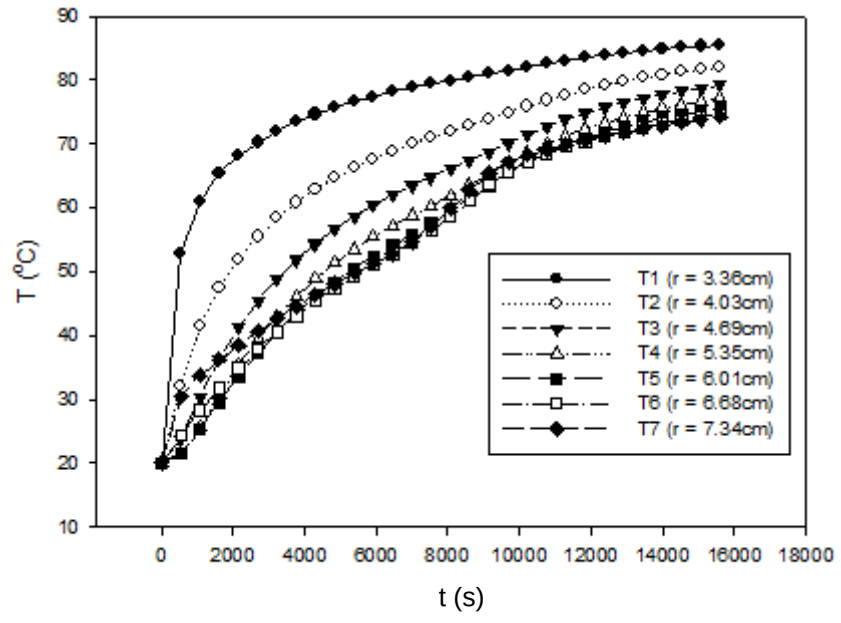
Şekil 7.27 2 bar 100°C için sıcaklığın zamanla değişimi



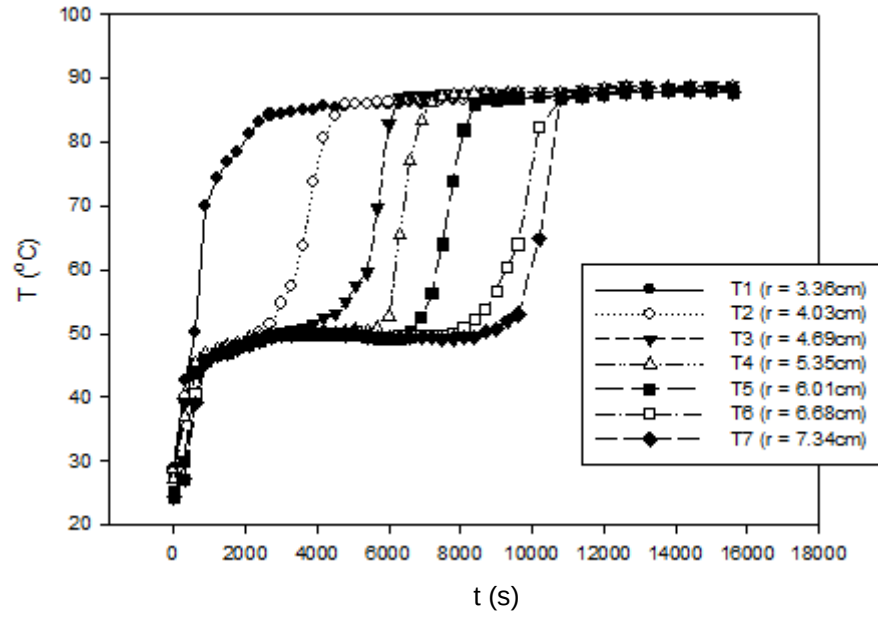
Şekil 7.28 3 bar 80°C için ikinci matematiksel model sonuçları



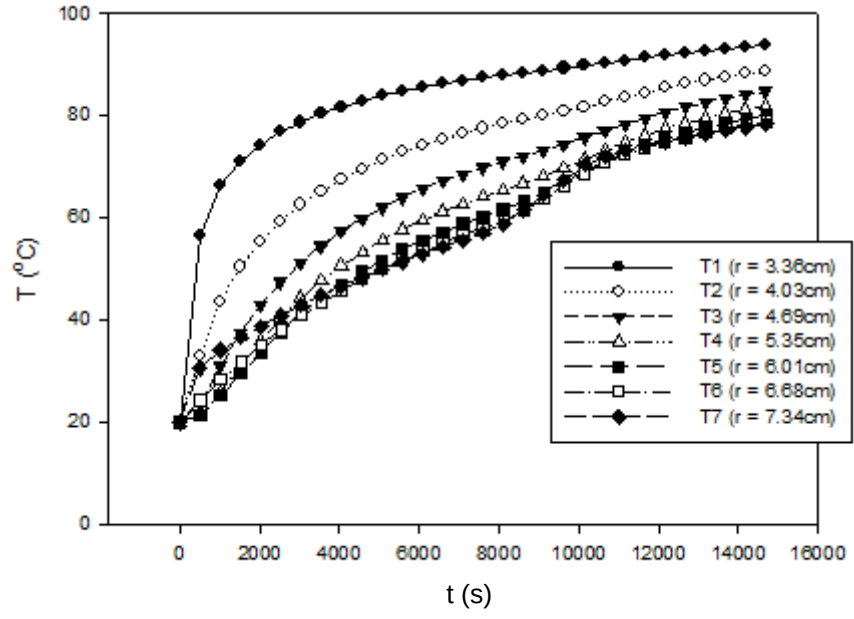
Şekil 7.29 3 bar 80°C için sıcaklığın zamanla değişimi



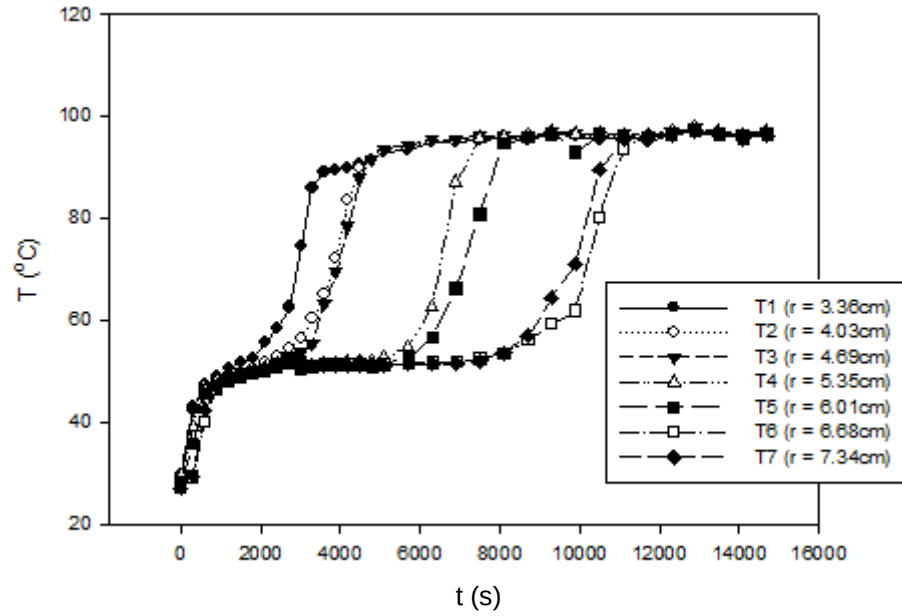
Şekil 7.30 3 bar 90°C için ikinci matematiksel model sonuçları



Şekil 7.31 3 bar 90°C için sıcaklığın zamanla değişimi



Şekil 7.32 3 bar 100°C için ikinci matematiksel model sonuçları



Şekil 7.33 3 bar 100°C için sıcaklığın zamanla değişimi

Efektif özelliklerin geliştirilen yeni bağıntılarla ifade edildiği gözenekli bir ortam olan bobinin kuruması sırasında bobin içi sıcaklık dağılımının tahminine yönelik

bu model yalnızca bobin için değil, aynı zamanda tüm gözenekli ortamlara uyarlanabilecek nitelikte bir model olup, bilime ışık tutmaktadır.

Tezde yararlanılan programların kullanımıyla ilgili detaylı bilgiye [47], [48] ve [49] referanslarından ulaşılabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kamil KAHVECİ, Ahmet CİHAN, ***Drying of Food Materials: Transport Phenomena*** (Nova Science, New York, 2008).
- [2] Luiza Helena Costa Dutra SOUSA, Nehemias Curvelo PEREIRA, Oswaldo Curty da Motta LIMA, Erica Vagetti FONCESA, ***Equilibrium moisture isotherms of textiles materials***, Acta Scientiarum, Maringá, Vol.23, No.6, 1363-1368, (2001).
- [3] A. K. HAGHİ, ***Factors effecting water-vapor transport through fibers (a brief review)***, Theoret. Appl. Mech., Vol.30, No.4, 277-309, (2003).
- [4] M. KAVIANY, ***Principles of Heat Transfer in Porous Media*** (Mechanical Engineering Series, Second Edition, New York, USA, 1995).
- [5] Uğur AKYOL, ***İplik Bobinlerinin Kurutulmasının Teorik İncelenmesi***, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, Türkiye, (2007).
- [6] Arun S. MUJUMDAR, ***Handbook of Industrial Drying, Part I Fundamental Aspects, 1 Principles, Classification, and Selection of Dryers*** (Taylor & Francis Group, LLC., 2006).
- [7] <http://www.temyad.com/app/kullanici-dosyalari/TERB%C4%B0YE%20KONUSUNDA%20B%C4%B0L%C4%B0NMES%C4%B0%20GEREKENLER.pdf>
- [8] R. Tuğrul OĞULATA, Füsün Doba KADEM, Erdem KOÇ, ***Tekstilde Kurutma Yöntem ve Makinaları***, IV Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, tmmob makina mühendisleri odası, II.Cilt, 229/2, 803-810, (1999).
- [9] <http://www.prosesmakina.com/?urun=58&tur=urun>
- [10] <http://www.dilmenler.com.tr/turkce/dms14.html>

- [11] M. G. VIZCARRA-MENDOZA, C. MARTINEZ-VERA, R. S. RUIZ-MARTINEZ, ***Drying of a Pollen in a Fluidized Bed: Experiment and Simulation***, 15th International Drying Symposium (IDS 2006) Drying 2006, Volume A, Budapest, Hungary, 504-507, (2006).
- [12] P. KESHAVARZ, A. H. JAHANMIRI, J. FATHIKALAJAHI, ***Modified Lumped Model for Transient Dehydration of Solids, a Polynomial Approximation Approach***, 15th International Drying Symposium (IDS 2006) Drying 2006, Volume A, Budapest, Hungary, 343-349, (2006).
- [13] B. VALDOVINOS – TIJERINO, B. HEYD, B. BROYART, J. A. HERNANDEZ – PEREZ, G. TYRSTRAM, ***Heat and Mass Transfer Modeling of the Coffee Drying and Roasting On-line Quality Optimization***, 15th International Drying Symposium (IDS 2006) Drying 2006 Volume A, Budapest, Hungary, 539-543, (2006).
- [14] T. TSURUTA, T. HAYASHI, ***Internal Resistance of Sea Food in Warm-Air Drying and Microwave–Vacuum Drying***, 15th International Drying Symposium (IDS 2006) Drying 2006 Volume C, Budapest, Hungary, 1273-1278, (2006).
- [15] J. RIBERIO, J. M. P. VENTURA, ***Evaluation of Textile Bobbins Drying Processes: Experimental and Modelling Studies***, Drying Technology, 13, (1&2), 239-265, (1995).
- [16] Christian DIETL, Edgar R. F. WINTER, Raymond VISKANTA, ***An Efficient Simulation of the Heat and Mass Transfer Processes During Drying of Capillary Porous, Hygroscopic Materials***, International Journal of Heat and Mass Transfer, 41, 3611-3625, (1998).
- [17] H. Stephen LEE, Wallance W. CARR, Haskel W. BECKHAM, Johannes LEISEN, ***A Model of Through-Air Drying of Tufted Textile Materials***, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 357-366, (2002).
- [18] Ugur AKYOL, Kamil KAHVECİ, Ahmet CİHAN and Dinçer AKAL, ***Simulation of Drying Behavior of Cotton Bobbins by a Simultaneous Heat and Mass Transfer Model***, Defect and Diffusion Forum Trans Tech Publications Switzerland, Vols. 312-315, 854-859, (2011).

- [19] J. F. NASTAJ, *A Mathematical Model for the Continuous Vacuum Drying of Highly Viscous Foodstuffs*, Drying Technology, 7, (1), 47-58, (1989).
- [20] Dinçer AKAL, Çiğdem SUSANTEZ, Kamil KAHVECİ, Uğur AKYOL, *Simulation of Drying of a Wool Yarn*, Termotecnica, 1, 66-70, (2013).
- [21] Diego F. GARCIA, *A New Proposed Moisture Diffusion Coefficient for Transformer Paper*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 56, 469–474, (2013).
- [22] Mitchell MELANIE, *An Introduction to Genetic Algorithms* (The MIT Press, London, England, 1999).
- [23] Özlem TABAK, *Genetik Algoritma ile Kapasiteli Servis Güzergahı Belirlenmesi ve Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, (2008).
- [24] S. N. SIVANANDAM, S. N. DEEPA, *Introduction to Genetic Algorithms* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2008).
- [25] Elisaveta G. SHOPOVA, Natasha G. VAKLIEVA-BANCHEVA, *BASIC—A genetic algorithm for engineering problems solution*, Computers and Chemical Engineering, 30, 1293-1309, (2006).
- [26] Muhannad HARRIM, *Genetic Algorithms*, (2013)
(<https://www.cs.wmich.edu/elise/courses/cs6800/Genetic-Algorithms.ppt>).
- [27] Bora UĞURLU, *BM-307 Mikroişlemciler ve Mikrobilgisayarlar Ders Notları Bölüm1 Sayı Sistemleri*, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
(http://members.comu.edu.tr/boraugurlu/courses/bm307/content/week1/slayt1_a.pdf).
- [28] David A COLEY, *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers* (Word Scientific, Singapore, 1999).
- [29] Prof. Dr. Osman F. GENÇELİ (İTÜ Makina Fakültesi), *Çözümlü Isı İletimi Problemleri* (Birsan Yayınevi, İstanbul, 2000).
- [30] <http://www.goodfellow.com/E/Polymethylmethacrylate.html>

- [31] T. LU, S. Q. SHEN, *Numerical and Experimental Investigation of Paper Drying: Heat and Mass Transfer with Phase Change in Porous Media*, Applied Thermal Engineering, 27, 1248–1258, (2007).
- [32] Fethi HALICI, Mehmet GÜNDÜZ, *Örneklerle Isı Geçişi Isı Transferi, Genişletilmiş 3. Baskı* (Birsen Yayınevi, İstanbul, 2007).
- [33] Mattias WAHDE, David SANDBERG, and Ola BENDERİUS, *An elementary introduction to Matlab programming for stochastic optimization*, 9 Eylül (2014) (<http://www.me.chalmers.se/~mwahde/courses/soa/2014/matlabintro.pdf>).
- [34] Vítor CARVALHO, Michael BELSLEY, Rosa M. VASCONCELOS, Filomena O. SOARES, *Yarn hairiness and diameter characterization using a CMOS line array*, Measurement, 41, 1077–1092, (2008).
- [35] G. WU, T. Y. BONG, *Overall efficiency of a straight fin with combined heat and mass transfer*, ASHRAE Transactions, 100, 367–374, (1994).
- [36] M. HATANI, D. D. GANJI, *Investigation of Refrigeration Efficiency For Fully Wet Circular Porous Fins with Variable Sections by Combined Heat and Mass Transfer Analysis*, International Journal of Refrigeration, 40, 140-151, (2014).
- [37] Ahmet CİHAN, Kamil KAHVECİ, Uğur AKYOL, Dinçer AKAL, *Optimum Operating Conditions in Drying of Polyester Based Yarn Bobbins with a Pressurized Hot Air Dryer*, Proceedings of the 9th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'11), Florance, Italy, 176-179, (2011).
- [38] Yi LI, Qingyong ZHU, *Simultaneous Heat and Moisture Transfer with Moisture Sorption, Condensation, and Capillary Liquid Diffusion in Porous Textiles*, Textile Research Journal, 73, (6), 515-524, (2003).
- [39] *Teknik Bilgiler, Özgül Isılar ve Ağırlıkları : Çeşitli Katılar*, Spirax Sarco Intervalf The Steam Centre of Energy Saving (<http://www2.spiraxsarco.com/tr/downloads/resources/Specific%20Heats%20and%20Weights%20Various%20Solid,%20Luquids,%20Gas%20and%20Vapours.pdf>).

- [40] tr.wikipedia.org/wiki/İplik_numaralandırma_sistemi
- [41] A BASU, I. DORAISWAMY, R. L. GOTIPAMUL, ***Measurement of Yarn Diameter and Twist by Image Analysis***, The Journal of The Textile Institute, India, (2009).
- [42] ***Standard Test Method for Linear Density of Yarn (Yarn Number) by the Skein Method***, ASTM International, Designation: D 1907 – 01, United States, (2006).
- [43] Frank P. INCROPERA, David P. DEWITT, ***Fundamentals of Heat and Mass Transfer Second Edition*** (John Wiley & Sons, Singapore, 1985).
- [44] Ugur AKYOL, Ahmet Erhan AKAN, Ahmet DURAK, ***Simulation and thermodynamic analysis of a hot-air textile drying process***, The Journal of The Textile Institute, (2014).
- [45] www.me.metu.edu.tr/courses/me582/files/PDE_Introduction_by_Hoffman.pdf
- [46] www.mathworks.com/help/matlab/math/partial-differential-equations.html
- [47] <http://www.comsol.com>
- [48] <http://www.mathworks.com>
- [49] <http://www.sigmaplot.com>

ÖZGEÇMİŞ

18 Kasım 1982 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini Tekirdağ Malkara'da Hüseyin Köse İlkokulunda, orta öğrenimini Malkara Anadolu Lisesinde, lise öğrenimini Tekirdağ Anadolu Lisesinde tamamladı. 2002 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı, 2007 yılında fakülte birincisi olarak lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. 2009 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitime başladı. Halen Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

- Çiğdem SUSANTEZ, Ahmet CİHAN, Kamil KAHVECİ, *Sıcak Hava ile Kurutulan Yün İplik Bobinlerinin Kuruma Davranışının Simülasyonu*, ULIBTK'13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Samsun, 302-310, (2013).

SCI, SSCI ve AHCI dışındaki indeks ve özlere tarafından taranan dergilerde yayımlanan makaleler:

- Dinçer AKAL, Çiğdem SUSANTEZ, Kamil KAHVECİ, Uğur AKYOL, *Simulation of Drying of a Wool Yarn*, Termotecnica, 1, 66-70, (2013).
- Dinçer AKAL, Çiğdem SUSANTEZ, Kamil KAHVECİ, Uğur AKYOL, *Simulation of Drying of a Wool Fabric*, Termotecnica, 1, 71-74, (2013).

Termotecnica dergisinde yayınlanan bu yayınlar aynı zamanda, 2013 yılında Romanya'da düzenlenen “5th International Conference on Thermal Engines and Environmental Engineering” konferansında sunulmuştur.

EK-A

BU ÇALIŞMADA GELİŞTİRİLEN GENETİK ALGORİTMA PROGRAMI

Kurutma havasının farklı değerleri için incelenen durumlarda programda yalnızca kurutma havası sıcaklığı ve buna bağlı olarak termofiziksel özellikler değiştiğinden, bu bölümde kurutma havasının 1 bar 80°C değeri için yazılan program verilmiştir.


```

populationSize = 30;
numberOfGenes = 60;
crossoverProbability = 0.8;
mutationProbability = 0.025;
tournamentSelectionParameter = 1;
variableRange1 = 12.;
variableRange2 = 4.;
variableRange3 = 200.;

numberOfGenerations=20;
population=evalin('base','population');

for iGeneration=1:numberOfGenerations
    fitness = zeros(populationSize,1);
    maximumFitness = 0.0;

    for i = 1:populationSize
        chromosome = population(i,:);

        nGenes=size(chromosome,2);
        oneThird=fix(nGenes/3);
        Do=0.0;
        D1=0.0;
        D2=0.0;

        for j=1:oneThird
            Do=Do+chromosome(j)*2^(-j);
            D1=D1+chromosome(j+oneThird)*2^(-j);
            D2=D2+chromosome(j+oneThird+oneThird)*2^(-j);

        end
        Do=variableRange1*Do/(1-2.^(-oneThird));
        D1=variableRange2*D1/(1-2.^(-oneThird));
        D2=variableRange3*D2/(1-2.^(-oneThird));

        Do,D1,D2

        BE3NEW (Do,D1,D2);

        model=ans;
        Xave=mpghglobal(model,'Xave2');

        F=0.0;
        n=0.0;
        for k=1:40
            X(k);
            Xave(k);
            F=(X(k)-Xave(k))^2.;
            n=n+F;

        Eucledia=sqrt(n);
        end
        i;
        Eucledia;

        fitness(i)=(1/Eucledia)
        if (fitness(i)>maximumFitness)
            maximumFitness=fitness(i);
            bestIndividualIndex=i;
            DoBest=Do;
            D1Best=D1;

```

```

D2Best=D2;
XaveBest=Xave;
end
end
iGeneration
maximumFitness
DoBest;
D1Best;
D2Best;

tempPopulation=population;

for i=1:2:populationSize
    i1=TournamentSelectD(fitness, tournamentSelectionParameter);
    i2=TournamentSelectD(fitness, tournamentSelectionParameter);

    chromosome1=population(i1,:);
    chromosome2=population(i2,:);

    r=rand;
    if (r<crossoverProbability)
        newChromosomePair=Cross3D(chromosome1,chromosome2);
        tempPopulation(i,:)=newChromosomePair(1,:);
        tempPopulation(i+1,:)=newChromosomePair(2,:);
    else
        tempPopulation(i,:)=chromosome1;
        tempPopulation(i+1,:)=chromosome2;
    end
end

for i=1:populationSize
    originalChromosome=tempPopulation(i,:);
    mutatedChromosome=MutateD(originalChromosome,mutationProbability);
    tempPopulation(i,:)=mutatedChromosome;
end

tempPopulation(1,:)=population(bestIndividualIndex,:);
population=tempPopulation;
plot (XaveBest)
hold on
plot (X)

pause
end
maximumFitness
DoBest;
D1Best;
D2Best;

Xave;

```