

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞKAN YATAKTA FINDIK KAVURMA
İŞLEMİNİN DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Muh. Mükrimin Şevket GÜNEY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.İmdat TAYMAZ

Eylül 2007

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞKAN YATAKTA FINDIK KAVURMA
İŞLEMİNİN DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Mükrimin Şevket GÜNEY

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 20/09/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Recep Yamankaradeniz
Jüri Başkanı

Y.Doç.Dr.İmdat Taymaz
Üye

Prof. Dr. Muhittin Can
Üye

Prof. Dr Ertan Yanıkoğlu
Üye

Prof. Dr Fethi Halıcı
Üye

TEŞEKKÜR

İlk olarak beni bu çalışmaya yönlendiren, tüm tecrübe ve bilgi birikiminden faydalandığım tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Mesut GÜR ve Sayın Y..Doç.Dr İmdat TAYMAZ'a, yine bilgi birikimi ve yardımlarından yararlandığım İTÜ Makine Fakültesi Öğretim Görevlisi Sayın Dr Müh. Osman Akın KUTLAR'a ve Koç Üniversitesi Araş. Gör. Sayın Yük. Müh. Mert GÜR'e, yurtdışında yayınlanmış olan yayınlarını tarafıma ulaştıran Magdeburg Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr Evangelos TSOTSAS'a , çalışmanın devamında bilgi ve desteklerini esirgemeyen Sayın Y. Doç Dr Adnan TOPUZ'a, ve diğer üniversite mensubu arkadaşlarıma, bilgi ve becerisinden faydalandığım Sayın Araş.Gör. Özgür ÇİFTÇİ'ye bu çalışmaya deney tesisatının kurulması, çalıştırılması ve deneylerin yürütülmesinde yapmış olduğu katkılardan dolayı, usta teknisyen Sayın Ensar KURTULMUŞ'a çalışmanın gerçekleştirilmesinde yapmış oldukları maddi ve manevi desteklerden ötürü annem, babam, ağabeyim ve eşime teşekkürlerimi borç bilirim.

Mükrimin Şevket GÜNEY

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	1
1.2. Fındık Hakkında Genel Bilgiler.....	2
1.3. Fındığın Yetiştirme Koşulları.....	3
1.4. Fındığın Mikro Yapısı.....	4
1.5. Fındık ve Diğer Benzer Kuruyemişlerin Kıyaslanması.....	5
1.6. Fındık Çeşitleri ve Yörelere Göre Üretim Miktarları	7
1.7. Fındığın Besin Değerleri... ..	9
1.8. Yiyecekleri Bozan Etkenler.....	14
1.9. Literatür Çalışması	15

BÖLÜM 2.

KAVURMA KURUTMA TEKNİĞİ VE GIDALARA UYGULANMASI.	23
2.1. Kavurma Reaksiyonun Tanımlanması	23
2.2. Kavurma prosesinin Ürüne Etkileri	23
2.3. Kavurma Reaksiyonlarının Sınıflandırılması	24
2.3.1. Piroliz	24

2.3.2. Karamelizasyon	24
2.3.3. Maillard reaksiyonu	25
2.4. Fındık Kavurma Prosesi.....	28
2.4.1. Kavurma işleminin üründe yarattığı değişimle.....	29
2.4.2. Şeker karamelizasyonu ve şekerin gıdalarda bulunma biçimleri.....	30
2.4.3. Kavurma işleminde nem kaybı ve kurutma.....	31
2.5. Fındığın Higroskopik Özellikleri.....	32
2.5.1. Kavurma esnasında fındıktaki renk değişimi.....	36
2.5.2. Kavurma esnasında fındıkta tat değişimi.....	38
2.5.3. Kavurma esnasında ürün yapısındaki değişimler.....	39
2.5.4. Kavurma işlemi esnasında lipid oksidasyonu.....	41
2.6. Kurutmanın Amacı.....	44
2.7. Gıdalardaki Su miktarı ve Yapısal Bulunuş Biçimleri	45
2.7.1. Bileşik halindeki su.....	46
2.7.2. Bağlı su.....	46
2.7.3. Serbest nem.....	46
2.7.4. Absorbe olmuş nem.....	47
2.8. Gıda Kurutma Prosesi ve Temel İlkeleri.....	47
2.9. Gözenekli Ürün İçindeki Nem Hareketi.....	50
2.9.1. Kılcal kuvvetler ve yüzey gerilim kuvvetleri nedeniyle oluşan sıvı hareketi	50
2.9.2. Buhar fazındaki nem hareketi.....	51
2.9.2.1. Moleküler buhar hareketi	51
2.9.2.2. Buhar difüzyonu.....	51
2.9.2.3. Laminer buhar akışı	51
2.9.3. Yoğuşan fazdaki difüzyon.....	52
2.9.4. Migration.....	52
2.10. Termik Kurutma ve Kurutucuların Sınıflandırılması.....	52
2.10.1. Konvektif tip kurutucular.....	52
2.10.2. Kontakt tip kurutucular.....	53
2.10.3. Işınlı kurutucular.....	53
2.10.4. Akışkan yatak tipi kurutucular.....	53

2.11. Kurutma ve Nem Alma Metotları.....	53
2.12. Kurutma Proseslerinin Ürün Üzerine Yapmış Olduğu Etkiler.	54
2.13. Kurutma Tekniğinde Kullanılan Bazı Önemli Kavramlar	54
2.14. Kurutma Şartlarının Ürün Özelliklerine ve Oluşan Değerlere etkisi.....	55
2.15. Denge Nem İzotermi	57
2.16. Histeresiz	61
2.17. Kurutma Mekanizması	61
2.18. Kurutma Prosesi Peryotları	63
2.19. Yiyeceklerin Stabilitesi	64
2.19.1. Su aktivitesi	65
2.19.2. Su aktivitesinin ürüne ve reaksiyonlara etkisi.....	66
2.19.3. Su aktivitesinin ölçülmesi.....	68
2.19.4. Mikrobik üreme yoluyla bozulma.....	70
2.19.5 Enzimatik reaksiyonlar	70
2.19.6. Üründeki fiziksel ve yapısal değişimler.....	70
2.19.7. Üründeki besin değeri aroma ve lezzet azalması.....	71
2.19.8. Nemli katı partikül ve su aktivite ilişkisi	71
2.20. Akışkan Yataklar.....	72
2.20.1. Akışkan yatak tipleri	73
2.20.2. Akışkan yatakların Geldart’a göre sınıflandırılması.....	74
 BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMA.....	76
3.1. Deney Setinin Kurulması.....	76
3.2. Deneylerin Yapılması.....	78
 BÖLÜM 4.	
MATEMATİKSEL MODEL	81
4.1. Matematiksel Modelin Eldesi	81

4.1.1. Gaz fazı	86
4.1.2. Baloncuk fazı.....	92
4.1.3. Katı faz:	95
4.2. Lineer Olmayan Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Nümerik Analizi	102
4.2.1. Gaz fazı.....	103
4.2.2. Baloncuk fazı.....	107
4.2.3. Katı faz (fındık).....	108
4.3. Çözüm Yöntemi	116
 BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE MODEL VERİLERİ KIYASLANMASI.	118
5.1. Akışkan Yatak Havası İçin Deney Sonuçları	118
5.2. Fındık Partikülleri İçin Deney Sonuçları	121
5.3. Deney ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	124
5.4. Deneysel Çalışmanın Hata Analizi	145
 BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149
 KAYNAKLAR	
EKLER	157
ÖZGEÇMİŞ	167

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Yüzey alanı, (m ²)
b	: Buharlaştırma entalpisi, (j/kg)
C	: Özgül ısı sabit basınçta, (j/kgK)
d	: Çap, (m)
D	: Kütle difüzyon katsayısı, (m ² /s)
dt	: Zaman aralığı, (s)
dV	: Kontrol hacmi, (m ³)
dy	: Yatak kontrol hacmi yüksekliği, (m)
E	: Enerji, (joule)
g	: Yerçekimi ivmesi, (m/s ²)
h	: Taşınım ısı geçiş katsayısı, (W/m ² K)
H	: Toplam ısı geçiş katsayısı (1/s)
k	: kütle geçiş katsayısı, (m/s)
K	: Toplam kütle geçiş katsayısı
m	: kütle, (kg)
M	: Nem miktarı (kgbuhar/kgkatı ürün)
q	: Isı geçişi, (W)
Q _b	: Baloncuk debisi, (m ³ /s)
r	: Yarıçap, (m)
T	: Sıcaklık, (K)
t	: zaman, (s)
U	: Hız, (m/s)
V	: Hacim, (m ³)
W	: Yatağın içindeki partikül kütlesi, (kg)
X	: Mutlak nemi, (kg su buharı/kg kuru hava)
X _{py}	: Partikül yüzeyindeki gaz mutlak nemi, (kg su buharı/kg kuru hava)

l : Yatak yüksekliği, (m)

GREK SEMBOLLER

β : Termal genleşme katsayısı, (j/kg)

μ : Dinamik viskozite, (kg/ms)

Δ : Fark

ϵ : Hacım oranı

λ : Isı iletim katsayısı

∂ : Kısmi türev

α : Termal diffüzivite

ρ : Yoğunluk, (m³/s)

ν : Kinematik viskozite, (m²/s)

ALT INDISLER

b : Baloncuk

bu : Buhar

çık : Çıkış

d : Duvar

g : gaz (aradaki)

gb : Gaz-baloncuk

gd : Gaz-duvar

gir : Giriş

gp : Gaz-partikül

h : Hava

kon : taşınım

mb : Minimum baloncuklaşma

mf : Minimum akışkanlaşma

n : Konum düğüm sayısı

0 : Giriş veya başlangıç

p : Partikül

pd	: Partikül-duvar
pg	: partikül-gaz
p0	: Partikül başlangıç
py	: Partikül yüzey
y	: Yüzey

ÜST İNDİSLER

i	: zaman adımı sayısı
m	: konum adım sayısı

BOYUTSUZ SAYILAR

Ar	:Archimides sayısı,	$Ar = \frac{d_p^2 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}$
Bi _{ısı}	: Isı geçişi Biot sayısı	$Bi_{ısı} = \frac{h_{gp} * \Delta r}{\lambda}$
Bi _{kütle}	:Kütle geçişi Biot sayısı	$Bi_{kütle} = \frac{k_{gp} * \Delta r}{D}$
Fo	:Fourier sayısı	$Fo = \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2}$
Nu	: Nusselt sayısı,	$Nu = \frac{h d_p}{\lambda} = \left(2 + \left(0.4 * Re^{1/2} + 0.06 * Re^{2/3} * Pr^{0.4} \right) \right)$
Re _{mf}	: Minimum akışkanlaşmadaki Reynolds sayısı	$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g}$
Re _d	: Partikül çapına bağlı Reynolds sayısı	$Re_d = \frac{d_p * u * \rho_g}{\mu_g}$
Sc	: Schmidt sayısı	$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$
Sh	: Sherwood sayısı	$Sh = \frac{k d_p}{D} = \left(2 + \left(0.4 * Re^{1/2} + 0.06 * Re^{2/3} * Sc^{0.4} \right) \right)$

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Klasik kavurma fırınında partikül sıcaklığı değişimi	32
Şekil 2.2	Negret tipi fındık içlerinin su adsorpsiyonu	33
Şekil 2.3	Fındık içlerinin 20 C de su adsorpsiyonu (Peleg model ile düzeltilmiş)	33
Şekil 2.4	Negret tipi fındıkların 10 C deki denge nem izotermi.....	34
Şekil 2.5	İspanyada yetişen çeşitli fındıkların 10 C deki denge nem izotermi.....	34
Şekil 2.6	İspanyada yetişen çeşitli fındıkların 30 C deki denge nem izotermi	35
Şekil 2.7	Muhtelif su emdirme zamanlarında nem miktarı ve yarıçap değişimi.....	36
Şekil 2.8	Yüksek ve düşük sıcaklıkla kavurmada partikül sıcaklık değişimi	37
Şekil 2.9	Su aktivitesi ve ürün stabilitesi ilişkisi.....	41
Şekil 2.10	Ürün içindeki nemin yapısal farklı bulunuş biçimleri.....	45
Şekil 2.11	Şekil 2.11 Sülfat pulpunun denge su miktarı ve histeresiz etkisi	58
Şekil 2.12	Higroskopitesi farklı ürünlerde denge nem eğrisi değişimleri....	59
Şekil 2.13	Çeşitli kimyevi maddelerin sorpsiyon izotermi.....	60
Şekil 2.14	.Partikül büyüklüğüne göre akışkan yatakların sınıflandırılması	73
Şekil 2.15	Akışkan yatakların partikül hareketine göre sınıflandırılması....	74
Şekil 3.1	Deney tesisat şeması.....	76
Şekil 4.1	Baloncuk çapının yatak yüksekliği ile değişimi.....	82
Şekil 4.2	Akışkan yatak içinde faz dağılımları.....	82
Şekil 4.3	Gaz fazı kütle geçişi için kontrol hacmi ve oluşan kütle ifadeleri	86
Şekil 4.4	Gaz fazı ısı geçişi için kontrol hacmi ve ısı ifadeleri.....	89
Şekil 4.5	Baloncuk fazı kütle ve ısı transferi için tek boyutlu kontrol hacmi ve oluşan ifadeler	92

Şekil 4.6a	Fındık partikülleri kontrol hacmi	96
Şekil 4.6b	İçi boş küresel cisimde kontrol hacim ve düğüm noktaları gösterimi	97
Şekil 4.7	Fındık dış yüzeyinden taşınım ile kütle geçişi.....	98
Şekil 4.8	Partikül iç boşluk yüzeyinde kütle geçişi	99
Şekil 4.9	Katı partikül orta düğümlerdeki kütle geçişi.....	99
Şekil 4.10	Fındık dış yüzeyinden ısı geçişi ve kontrol hacim.....	100
Şekil 4.11	Fındık iç yüzeyinden ısı geçişi ve kontrol hacim.....	101
Şekil 4.12	Fındık orta kısımlarda ısı geçişi ve kontrol hacim.....	102
Şekil 4.13	Yatak içinde düğüm noktaları ve kontrol hacmin seçimi.....	103
Şekil 5.1	Deney hava giriş çıkış sıcaklığı değişimi (deney sıcaklığı 90 C)	118
Şekil 5.2	Deney hava giriş ve çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 110 C)...	119
Şekil 5.3	Deney hava giriş ve çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 130 C)...	120
Şekil 5.4	.Deney hava giriş ve çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 150C)...	121
Şekil 5.5	Deneysel fındık kurutma eğrisi (sıcaklık 90 °C).....	122
Şekil 5.6	Deneysel ındık kurutma eğrişi (sıcaklık 110 C).....	122
Şekil 5.7	Deneysel fındık kurutma eğrişi (sıcaklık 130 C).....	123
Şekil 5.8	Deneysel fındık kurutma eğrişi (sıcaklık 150 C).....	123
Şekil 5.9	Ürün nemi değişimi deney ve model kıyaslama 90 C.....	124
Şekil 5.10	Ürün nemi değişimi deney ve model kıyaslama 110 C.....	124
Şekil 5.11	Ürün nemi değişimi deney ve model kıyaslama 130 C.....	125
Şekil 5.12	Ürün nemi değişimi deney ve model kıyaslama 150 C.....	125
Şekil 5.13	Farklı sıcaklıklarda deney ürün nemleri değişimi.....	126
Şekil 5.14	Farklı sıcaklıklarda model ürün nemleri kıyaslama.....	126
Şekil 5.15	Model çözümde ürün nem eğrileri	127
Şekil 5.16	Deney ve model 90 °C hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi..	127
Şekil 5.17	Deney ve model 110 °C hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi	128
Şekil 5.18	Deney ve model 130 °C hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi	128
Şekil 5.19	Deney ve model 150 °C hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi	129
Şekil 5.20	Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 90 °C.....	130
Şekil 5.21	Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 110 C.....	130
Şekil 5.22	Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 130 C.....	131

Şekil 5.23	Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 150 C.....	131
Şekil 5.24	Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 90 C	132
Şekil 5.25	Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 110 C	132
Şekil 5.26	Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 130 C	133
Şekil 5.27	Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 150 C	133
Şekil 5.28	Fındık hava çıkış nemleri değişimleri 90 C.....	134
Şekil 5.29	Fındık hava çıkış nemleri değişimleri 110 C.....	134
Şekil 5.30	Fındık hava çıkış nemleri değişimleri 130 C.....	135
Şekil 5.31	Fındık hava çıkış nemleri değişimleri 150 C.....	135
Şekil 5.32	Xpy nem değerinin sıcaklık ve zamanla değişimi.....	136
Şekil 5.33	Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 90 C)	137
Şekil 5.34	Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 90 C)	138
Şekil 5.35	Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 110 C)	139
Şekil 5.36	Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 130 C)	140
Şekil 5.37	Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 150 C)	141
Şekil 5.38	Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 90 C)	142
Şekil 5.39	Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 110 C)	143
Şekil 5.40	Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 130 C)	144
Şekil 5.41	Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 150 C)	145
Şekil 5.42	Dikdörtgensel hata yayılımı.....	149

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Akışkan Yatak, Fındık, Kavurma, Kurutma.

Çağımızda gıda sektörü son derece önemli bir sektör olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya toplam ekonomisinin 1/3 ü gıda sektöründen oluşmaktadır. Gıdaların işlenmesi ve işlenmiş gıdalara talepler ise her geçen gün artmaktadır. Gıdalarda lezzet artırmak, raf ömrünü uzatmak ve dolayısıyla toplam ürün kalitesini ve sonucunda müşteri memnuniyetini artırmak önem arz etmektedir. Yılda bir kez Ağustos Eylül döneminde hasadı yapılan fındık, tüketici tarafından tüm yıl boyu talep edilmektedir. Kavurma işlemi hem ürün lezzetini artırmakta ve hem de ürünü kurutmak suretiyle raf ömrünü uzatmaktadır.

Kavurma işlemi genellikle büyük ölçekli yürüyen bantlı konveyörlü fırınlarda uygulanmaktadır. Bu proses ise istenen son ürün nemlerine ulaşmak için kısmen uzun süreler gerektirmektedir. Ayrıca işlem sonunda ürünün beyazlatma yani zar ayırma işlemine tabii tutulması gerekmektedir. Bu ise ilave bir son işlem ve masraf oluşturmaktadır. Yapılan bu çalışmada fındık kavurma işlemi farklı bir reaktör olan akışkan yataklı kavurma fırınında gerçekleştirilmiştir.

Fındık kavurmanın akışkan yatakta yapılması bu çalışmanın temel hedefi olmaktadır. Kavurma işlemi için daha önce güneşte serilmek suretiyle kurutulan Giresun tipi kabuklu tumbul fındıklar kullanılmıştır. Bunlar homojen kuruluk derecelerine gelmeleri için bir sepet içinde 1 ay süreyle bekletilmişlerdir. Çalışmanın amacı kavurma işlemi esnasında husule gelen iç fındık partiküllerinin kuruma özelliklerinin incelenmesi ve diğer sistemlere göre nasıl bir etki gösterdiğinin belirlenmesidir. Kavurma işlemi fındıkta kurutma, renk ve lezzet değişimine sebep olmaktadır. Kavurma işleminin daha kısa sürelerde tamamlanmasının ürün toplam lezzetine de olumlu katkı yapması beklenmektedir.

Bu çalışma kapsamında deneyleri yapmak üzere akışkan yatak deney seti kurulmuştur. Deneyleri yapmak üzere Ordu bölgesinden numuneler temin edilmiştir. Kavurma işlemi ve dolayısıyla kurutma deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma işleminin matematiksel hesabında eksiklikler olduğu bilinmektedir. Deneysel sonuçlarla uygulanan matematiksel model sonuçları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Söz konusu matematiksel model sonlu farklar metoduyla ve implicit yaklaşım yapılarak çözülmüş ve bu amaçla C Shart dilinde bir program yazılmıştır. Deney sonuçları ve matematiksel model sonuçları arasında büyük bir yaklaşım sağlanmıştır

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSES OF HAZELNUT ROASTING PROCESSES IN FLUIDIZED BED DRYER

SUMMARY

Keywords: Fluidized bed, hazelnut, roasting, drying

The main objective of the thesis was experimental analyses and mathematical modeling of drying of hazelnut during roasting in fluidized bed reactor. Roasting of hazelnut is a temperature dependent process and involves a number of changes, as heat and mass transfer, chemical reactions and texture changes etc. These changes are important because they affect flavor, texture and aroma of the end product. The purpose of the hazelnut roasting is to promote flavor and texture and finally increase the overall palatability of the hazelnut. Fluid bed roasting has been chosen for this study because it is expected the same roasting effect in fluidized bed dryer in shorter time and better overall palatability of the product than classical convective dryer.

In this experiment for roasting have been used the tombul variety hazelnut of Giresun kind, harvested in Oedu in year of 2003. The samples as shelled have been dried naturally under sunshine. Hazelnut samples have been left in the same basket for a month for arriving same moisture content. The goal of this study is to determine the drying characteristics of the hazelnut during roasting and comparing with the other roasting systems due to data taken from experiments. It has been given the necessary fundamental information about the roasting mechanism and the drying too. In this study a new method for roasting of hazelnut has been tested.

The roasting time in classical band dryer is relative high. And after roasting in classical conveyor dryer, the samples of hazelnut have to be blanched. The blanching process takes a lot of time and energy and manpower. In fluidized bed dryer, the blanching occurs itself.

A fluid bed dryer of small size have been built in the laboratory. The roasting and finally the drying of hazelnut have been experimentally investigated. It is known the deficiency by the calculating of drying processes. Therefore it has been made some comparison between the experimental and modeling data. The modeling mentioned above have been built due to finite difference method with implicit approaching.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Amacı

Fındık tüm canlılar ve özellikle büyüme çağındaki çocukların sinir sistemleri ve zeka gelişimleri için son derece önemli ve vazgeçilmez bir besin kaynağıdır. Ayrıca çerez ve kuruyemiş özellikleri taşıyan diğer kabuklu yemişlerle kıyaslandığında hiçbirinden daha az besin değerine sahip olmadığı, bilakis birçoğundan daha üstün olduğu anlaşılmaktadır. Fındık tüketiminin artırılmasına yönelik olarak, saklanabilme süresinin de uzatılmasını sağladığından ve en önemlisi ürün toplam lezzetini büyük ölçüde olumlu etkilediğinden, araştırmayı fındık kavurma prosesi üzerine yapmak gerekliliği hasıl olmuştur. Kavurma işlemine tabii tutulmuş ürünlerin fiyatı enerji maliyetleriyle paralel olarak, oldukça hızlı arttığından bu işlemin maliyetinin aşağı çekilebileceği düşünülmüş ve çok daha kısa sürelerde, uygun nem değerlerine inilebileceği göz önünde tutulmuştur.

Kavurma işleminin daha homojen olmasını temin etmek, fındık lezzetini artırmak ve daha kısa sürelerde kavurma işlemini temin etmeye yönelik olarak, akışkan yatak tipi kurutma reaktörü tercih edilmiş ve çalışma bu konuyu incelemeye ayrılmıştır.

Endüstride kullanılan fındık kavurma tesisleri, genellikle yürüyen bant sistemine haiz ve çok büyük ölçekli olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ise küçük ölçekli imalatçıların varlığını ve bu sektörde rekabetçi olarak çalışmalarını sürdürmelerini kısıtlamaktadır. Tasarlanan bu sistem hem küçük ölçekli işletmelerin çalışmalarına uygun olması ve bunun yanında ürün toplam lezzetinde diğer tip kavurma fırınlarından çıkan son ürünlerle, kalite açısından rekabet edebilir değerlere haiz olması amaçlanmaktadır.

Bu hedef doğrultusunda, bu çalışmada kavurma prosesi sonucunda oluşan nihai hedeflerin biri olan kurutma işlemi incelenecektir. Öncelikli olarak akışkan yatakta kavurma deneyleri gerçekleştirilecektir. Deneyler alışılmış kavurma sıcaklıkları olan 90 °C 150 °C sıcaklık aralıklarında yapılacaktır. Hava hızları teoride en yüksek ısı transfer katsayılarını verebilecek şekilde seçilecek ve deneyler 25 dakika süreyle uygulanacaktır. Bu esnada alınacak ürün numunelerinden ürün nem değerleri tespit edilecektir. Bunu takiben akışkan yatak kavurma fırınının kurutma karakteristiklerinin bulunmasına yönelik olarak modellenmesi gerçekleştirilecektir. Deneysel değerlerle model çözümleri karşılaştırılacak bunlarla ilgili sonuçlar kıyaslamalı grafikler olarak düzenlenecektir ve birbirlerine uyumları gösterilecektir.

1.2. Fındık Hakkında Genel Bilgiler

Fındık besin grubu olarak sert kabuklu yemişler sınıfından sayılmaktadır (nuts). Günümüzde tüm dünyada yılda yaklaşık 4.000.000 ton fındık, fıstık, ceviz ve badem gibi kabuklu yemişlerden hasat edilmektedir. Bunlarında yaklaşık 700.000 tonu fındık çeşitlerinden oluşmaktadır [1]. Dünya fındık fiyatları, yıldan yıla değişmekle birlikte kabuksuz iç fındık tonu 2000 ile 5000 Dolar arasında oluşmaktadır.

Bu durumdan görülebildiği gibi, yıllık dünya fındık ticareti 1.4 milyar dolar ile 3.5 milyar dolar arasında olmaktadır. Ülkemizin fındık üretimi yıllık 400.000 ile 650.000 ton kabuklu fındık arasında değişmektedir. Yine bu değerlerden görülebileceği gibi dünya fındık üretiminin yaklaşık % 75 i ülkemizde gerçekleşmektedir. Dünyadaki diğer fındık üreticileri miktar büyüklüklerine göre sırasıyla İtalya, ABD ve İspanya dır. Son yıllarda Azerbaycan ve Gürcistan'ında fındık satıcısı ülkeler arasında az miktarlarda da olsa yer aldığı görülmektedir.

Dünya fındık ticareti kabuklu ve iç fındık olmak üzere iki kısımda yapılmaktadır. Gıda endüstrisi büyük ölçüde kabuksuz iç fındık talep etmekte ve işlemektedir. Bu iç fındık taleplerinin yaklaşık % 80 i çikolata fabrikalarınca yapılmaktadır, % 15 i şekerleme bisküvi ve pasta imalat sektöründe sarf edilmektedir. Kalan % 5 ise ikinci bir işleme tabii tutulmaksızın direkt olarak tüketilmektedir [2].

İç fındıklar kullanımdan önce kullanım amaçlarına uygun olarak beyazlatma, şekilli biçimde kesme, lezzet verme amacıyla yüzey tatlandırma, kavurma ve öğütülme (fındık ezmesi ve pralin hammaddesi olarak) gibi işlemlere tabii tutulmaktadır [3].

1.3. Fındığın Yetiştirme Koşulları

Fındık en elverişli yetiştirme iklim koşullarını kuzey 36. ve 41 derece kuzey enlem kuşakları arasında bulmaktadır. Yaygın ismiyle ham fındık olarak tanınan yabani fındık 1250 m yüksekliklere kadar yetiştirmekle birlikte, kaliteli, verimli ve istikrarlı bir üretim 700 - 800 m yi geçmeyen yüksekliklerde olmaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık 13-16 °C ve yıl içindeki maksimum sıcaklıkların 36-37 °C yi aşmadığı ve yıl içi minimum sıcaklık değerlerinin -8 °C den aşağı düşmediği iklim koşulları en uygun ortam koşulları olarak bilinmektedir. Yıllık yağış toplamının 700 mm/m² yi aştığı koşullar da yetiştirme uygunluk şartlarını tamamlamaktadır. Ayrıca fındık tanelerinin gelişim zamanları olan Haziran ve Temmuz aylarında çevre havası bağıl neminin % 60 ın altına düşmemesi gerekmektedir [4].

Fındık ürünü hemen hemen her türlü toprakta yetişmesine rağmen, en iyi yetiştirme ortamını besin maddelerince zengin, derin, kumlu, kireçli ve humuslu özelliklere sahip, taban suyunun bir metrenin üzerine çıkmadığı ve ortalama pH değerini 6-7 arasında olan topraklarda bulmaktadır [5].

Fındık diğer kültür bitki çeşitlerinden farklı olarak kış aylarında çiçek açmakta ve çiçek tozları açıkta iken -5 °C, anterler (kapsül) içinde iken -8 °C den daha düşük sıcaklıklarda zarar görmektedir. Karanfiller ise sıcaklığın -8 C den daha aşağıya düştüğü durumlarda zarar görmeye başlamakta ve -16 C den itibaren de, büyük ölçüde ölmektedir ve nihayet -22 C nin altında ise tamamen ölmektedir. Fındık yıl boyunca 7,2 C nin altında çeşitlerine göre 600-1050 saat arasında bir soğuklanma süresine ihtiyaç duymaktadır. Erkek ve dişi çiçekler üzerinde kuvvetli rüzgar, fazla yağış, kar, don, kuraklık, hava bağıl nemi azlığı ve sis gibi muhtelif etkenler zarar meydana getirerek dökülmelerine neden olurlar. Beslenme noksanlığı gerek çiçek ve gerekse de potak (çotanak) dökümüne neden olmaktadır. Ayrıca besin maddelerinin

noksanlığı çiçek tozu çimlenme oranını düşürmek suretiyle dökülmeyi artırmaktadır [6] .

1.4. Fındığın Mikro Yapısı

Fındıkta diğer kalın kabuklu yemişlerin birçoğu gibi zarımsı, damarlı ve parenkimalı dokulara haiz bir üründür.[7] Korileton dokuların çoğunluğu büyük, yaklaşık olarak izodiyametrik parankima hücrelerinden oluşmaktadır. Bu hücreler protein yapıları, yağ içeren kısımları ve nişasta zerreciklerini içermektedir [3].

Fındığın protein kısımları birçok küçük protein kristalitlerine haizdir. Bunlar globoidler ve kalsiyum oksalatlardan oluşmuş kabul edilen druse kristalleridir. Bu ürün içinde geniş bir biçimde yayılmış bulunan protein kristalloidleri protein kompleks yapıları içine dağınık olarak yerleşmiş biçimdedir [8].

Fındık ve bu sınıftaki kuru yemişler, içerikleri ile ilgili verilerden görülebileceği gibi canlı organizmalarının temel mineral gereksinimlerini karşılayabilecek birçok minerale sahiptir. Bunun yanı sıra hem protein ve hem de kötü kolesterole yol açmayan yağı nedeniyle her zaman tercih edilmektedir. Ayrıca daha önce bahsedildiği gibi büyüme çağındaki çocukların zeka gelişimlerinde gerekli olan folik asit içermesi nedeniyle de vazgeçilmez olmaktadır.

Tüm bu besin değerlerinin yanında kabuklu fındık uygun depolama nem değerlerini sağlamak koşuluyla, bozulmadan yıllarca saklanabilmektedir. Bu ise temel bir gıda maddesi için son derece önem arz etmektedir.

Daha önceki birçok araştırmada görüldüğü gibi fındık tüketimini yeterince ve periyodik olarak yapan kişilerde kronik kalp yetmezliğinden ölümlere oldukça az rastlanmaktadır. Fındık ve diğer bazı kabuklu yemişlerin damar tıkanıklığına karşı önemli ölçüde koruma etkisi yaptığı bilinmektedir [9]. Ayrıca fındık çok kuvvetli antioksidan özelliğe de sahiptir. Fındık tüketiminin kolesterol seviyesine etkilerini araştırmak amacıyla 30 öğrenci arasında yapılan deneyler sonucunda halk arasında iyi kolesterol olarak bilinen HDL seviyesinin arttığı ve kötü kolesterol olarak bilinen

LDL nin azaldığı ve toplam kolesterolünde azaldığı tespit edilmiştir [9]. Bu durum Tablo 1.1 de gösterilmektedir. Bu tabloda TG trigliserit seviyesini, AOP antioksidan potansiyelini ve MDA malondialdehit seviyesini göstermektedir.

Tablo 1.1. Sürekli ve belirli miktarlarda fındık kullanımının deneklerin kolesterol seviyelerinde yaptığı değişimler

Gruplar	T-kolesterol	HDL-Kolest	LDL-Kolest	HDL/LDL	TG	MDA	AOP
Kullanım öncesi	131,8 ± 19,9	40,2 ± 10,2	75,9 ± 19,6	0,57 ± 0,14	76,6 ± 25,4	1,3 ± 0,37	0,09 ± 0,008
Kullanım sonrası	123,8 ± 25,1	43,1 ± 8,6	61,7 ± 24,9	0,78 ± 0,13	95,6 ± 34,1	0,99 ± 0,19	0,11 ± 0,016

Ancak her ne kadar olumlu etkileri nedeniyle son derece önemli bir besin kaynağı olmasına rağmen, bu konudaki bilimsel gıda araştırmalarının henüz devam ettiğinin bilinmesi faydalı olacaktır.

1.5. Fındık ve Diğer Benzer Kuruyemişlerin Kıyaslanması

Muhtelif kuruyemişlerin kompozisyonları Tablo 1.2 de verilmektedir [10]. Bu tablodan görülebileceği gibi tüm bu yemişlerin adeta birer mineral zengini oldukları anlaşılmaktadır. Tüm bunların arasında fındığın en yoğun mineral içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumu lezzetinin diğerlerine göre biraz daha ağır olmasıyla da açıklamak mümkündür.

Ülkemizde yoğun üretiminin olması, fındığa son derece önem verilmesini gerekli kılmaktadır. Besinsel değeri açısından diğer benzer kuruyemişlere (nuts) kıyasla, birçok besin değerinin daha yüksek olduğu Tablo 1.2 den görülmektedir. Dünya serbest ticaret ortamında çok kolay satım değerine haiz olması ve çikolata endüstrisinde pralin hammaddesi olarak, en uygun ve vazgeçilmez ürün olması nedeniyle son derece önem kazanmaktadır Bu olumlu taraflarını destekler biçimde kalitesine göre fiyatı da diğer yemişlere göre daha uygundur. Ayrıca ülkemizde üretilen fındık çeşitleri, çoğunluğu dünya ülkeleri tarafından beğenilip arzu edilen ve pralin hammaddesi olarak lezzeti açısından vazgeçilmez bir üründür. Ülkemizde

yetişen fındıklar çoğunlukla çok iyi kaliteli bir kültüre sahiptir. Diğer ülkelerin ürünlerine göre kıyaslanamayacak üstünlükte lezzete haizdir.

Tablo 1.2. Muhtelif yemişlerin kompozisyonları

	Su	Protein	Yağ	Hidrat	Enerji	Yağasidi	Yağasidi	Vitamin	Vitamin	Na	
				Karbon		Doymuş	Doymamış	Vitamin E	Vitamin B6		
	g	g	g	g	kcal	g	g	mg	mg	g	
Fıstık	6,3	25,6	46,1	12,5	564	8,2	35,4	10,09	0,59	2	
Antepfıstığı	1,1	9,9	30,5	4,6	331	4,1	25	2,28	0	290	
Ceviz	2,8	14,7	68,5	3,3	688	12,4	47,5	3,83	0,67	7	
Badem	4,2	21,1	55,8	6,9	612	4,7	48,6	23,98	0,15	14	
Brezilfıstığı	2,8	14,1	68,2	3,1	682	16,4	48,8	7,18	0,31	3	
Kakao	2,3	5,6	62	6,4	604	59,3	5,5	1,4	0	30	
Fındık	4,6	14,1	63,5	6	650	4,7	55,9	24,98	0,59	6	
	K	Ca	Mg	P	Fe	Cu	Zn	Cl	Mn	Se	I
	g	g	g	g	g	g	g	g	g	mg	mg
Fıstık	670	60	210	430	2,5	1,02	3,5	7	2,1	3	20
Antepfıstığı	570	61	71	230	1,7	0,46	1,2	450	0,5	3	0
Ceviz	450	94	160	380	2,9	1,34	2,7	24	3,4	19	9
Badem	780	240	270	550	3	1	3,2	18	1,7	4	2
brezilfıstığı	660	170	410	590	2,5	1,76	4,2	57	1,2	1530	20
Kakao	650	23	73	170	3,7	0,56	0,9	190	1,8	2	2
Fındık	730	140	160	300	3,2	1,23	2,1	18	4,9	0	17

1.6. Fındık Çeşitleri ve Yörelere Göre Üretim Miktarları

Türkiye de üretilen fındık tipleri ve hangi yörelerde ne miktarlarda üretildikleri Tablo 1.3 de verilmiştir [11]. Buradan görüldüğü gibi, yağlı fındık olarak bilinen Giresun tipi tombul fındık tüketici beğenisine haiz olduğundan Doğu Karadeniz de Giresun dan başka Ordu ve Trabzon illerinde de yoğun olarak ekim alanı bulmuştur.

Tablo 1.3 . Türkiye deki fındık çeşitleri, yöresel olarak bilinen isimleri ve yıllık üretim miktarları

Fındık tipi	Nevi	Bilinen adı	İllere bazında yıllık üretim miktarları ton/yıl				
			Giresun	Ordu	Trabzon	Akçakoca	Toplam
Yuvarlak	Tombul	Yağlı fındık,	80.807	31.030	13.460	2.463	127.760
		Giresun yağlısı					
	Palaz			43.324			43.324
	Mincane	Sarı yağlı, Sarı fındık		1.260	26.092	30.224	57.576
	Foşa	Yomra			2.336	18.149	30.485
	Çakıldak	Delisava, Gökfındık		31.124		11.037	42.161
	Kalinkara		1.484				1.484
	Kara fındık	Kara yağlı					
	Cavcava						
	Uzunmusa	Oskara yağlısı,					
		Enişte fındığı					
	Kan						
	Kargalak						
Sivri	Sivri	Giresun sivrisi	7.644		1.891		9.536
	İncekara			2.520		49.532	52.052
Uzun sivri	Yuvarlak	Değirmendere fındığı					
	badem						
	Yassı	Değirmendere fındığı					
	badem						
		İllerdeki toplam üretim	89.935	117.760	67.300	120.750	

Tablo 1.3 deki değerler 1995 yılı değerlerini vermektedir bu tarihten sonrada özellikle Batı Karadeniz de fındık ekim alanlarının arttığı unutulmamalıdır. Ancak tüketici beğenisi bakımından Batı Karadeniz fındıkları Doğu Karadeniz de üretilenlerin lezzetine ulaşamamıştır.

Burada sınıflandırması yapılan ürün çeşitleri içinde kavrulup yenme lezzeti en üstün olanı halk arasında yağlı fındık olarak bilinen tombul fındıktır. Bu fındık çeşidi şayet iyi kurutulmuş ise, kavrulma işlemine tabii tutulmadan dahi, son derece lezzetli bir ürün tadına haizdir. Kavrulma esnasında zararlı bırakma özelliği % 95 e varan bir oranla en iyi olan yine tombul fındık olarak görünmektedir.

Diğer taraftan , işlenme kolaylığı ve lezzet homojenliği açısından çikolata fabrikaları tarafından tercih edilen ürün çeşidi ise çakıldak fındık olmaktadır. Çakıldak fındık aynı zamanda tane büyüklüğü ve iç fındık yüzdesi yani randımanı bakımından da en yüksek değerlere haiz bir ürün çeşididir. Daha ziyade geç doğum ve çevre koşullarına uygun olması nedeniyle deniz seviyesinden yüksekte, orta yüksekliklerdeki ekim alanlarında tercih edilmektedir. Çeşitli fındık tiplerinin bazı fiziksel özellikleri Tablo 1.4 de verilmektedir [12].

Tablo 1.4. Türk fındık çeşitlerinin fiziksel özellikleri

Nevi	uzunluk/ Genişlik	ağırlık gram	Potak fındık sayısı	boşluk	Kavurma sonu zar ayırma%	Ayrılma oranı	Bezik oranı	İkiz oranı	Boş Oranı	Çürük oranı	Kaliteli miktarı	İçi
	cm			İç		%	%	%	%	%	%	%
Tombul	1,11	1,46	3-4	*	97,7	1,13	13,8	0,82	7,91	0,8	74,58	51,7
Palaz	0,98	1,62	3-4	**	94,5	0,91	15,3	1,67	8,82	2,75	73,5	49,8
Mincane	1,15	1,55	2-3	*	96,6	1,69	17,7	1,36	5,81	0,99	75,65	48,2
Foşa	1,06	1,86	2-3	**	89	0,5	18,5	2,26	4,96	0,67	74,49	48,7
Çakıldak	1,17	1,6	1-2	**	87,8	0	41,7	0,58	6,03	0,73	51,73	48,7
Kalınkara	1,18	1,72	3-4	**	62,3	1,25	24,3	15,9	5,14	0,88	65,93	49,6
Cavcava	1,02	1,06	3-4	**	92,7	1,5	15,3	2,27	6,22	1,77	74,46	52
Uzunmusa	1,15	1,42	4-5	**	94,7	2,75	14,5	1,05	14,2	0,95	71,33	56,7
Sivri	1,36	1,7	3-4	*	72,3	0,17	19	0,37	10,4	0,86	69,55	48,9
Karafındık	1,18	1,42	3-4	*	83,5	2,14	36,3	4,61	7,77	1,11	60,81	49,2
Kargalak	0,86	2,82	1	**	NY	0	NY	0	NY	NY	NY	35
Kan	1,16	1,59	3-4	*	88,5	2	40	0,9	9,65	0,38	49,43	52,3
İncekara	1,29	1,4	2-3	*	76,5	0	41,1	9,32	11,9	0,96	42,63	51,9
Yassı-	1,63	0,94	1-2	**	64,5	2	36,6	1,3	8,12	0,35	54,29	46,1
badem												
Yuvarlak-	1,68	1,76	2-3	**	61,5	0	55,1	0,97	14,2	0	30,07	46,1
badem												

Notlar

* Fındık içi boşluğun az oranda

** Fındık içi boşluğun biraz daha fazla oranda olduğunu belirtmektedir.

NY Numune yok anlamındadır

1.7. Fındığın Besin Değerleri

Ülkemizde birçok değişik türde fındık yetişmektedir. Bunların besin değerleri birbirlerine yakın olmakla birlikte farklılıklarda arz etmektedir. Türk fındık çeşitleri % 55 – 66 yağ ve % 11 – 14 protein içermektedir. Ürünlerin bileşimlerindeki bu farklılıklar hasat zamanlarından, coğrafik konumdan, ürün gelişim şartlarından ve toprak özellikleri gibi etkenlerle değişmektedir. Ayrıca palaz ve tombul fındık dışındaki fındıklar yıldan yıla yağ içeriklerinde de farklılıklar göstermektedir. [13]. Tablo 1.5 - 1.7 de Türk Fındık çeşitlerinin özelliklerini bulmak mümkündür.

Tablo 1.5. Türk fındık çeşitlerinin amino asit içerikleri

	Fındık Nevi								
	Tombul	Palaz	Mincane	Foşa	Çakıldak	Kalınkara	Cavcava	Uzunmusa	Sivri
Amino-asit									
nevi									
mg/100g(db)									
Lisine	491,2	272,2	479,5	487,5	269	431,6	574,5	373,2	532
İsolosin	720,1	516,8	369,6	621,8	488,9	670,1	606,5	529	438
Losin	1336,6	891,2	925,3	1142	923,1	1292,9	1244,8	1003,3	930
Threonin	503,9	356,5	515,8	485,7	420,5	505,5	486,8	461,9	437
Valin	914,7	876,9	646,4	846,4	850,4	860,5	545,1	660	703
Methionin	255,2	144,7	179,6	234	120,6	244,1	171,5	164,4	203
Cistin								213,5	
Methi+cistin	255,2	144,7	179,6	234	120,6	244,1	171,5	377,9	203
Penilalalin	798,7	570,6	746,6	724,7	614,3	731,5	691,9	419,4	635
Tirosin	703,9	401,4	459,1	668,2	446,5	609,7	460,6	440,9	434
Penil+tiro	1502,6	972	1205,7	1393	1060,8	1340,2	1151,5	859,3	1069
Histidin	454,4	648,5	441,8	429,6	774,3	421	355,2	363	338
Arginen	2404,6	1062	2175	2152	1730,3	2117,2	2095,8	1730,3	1930
Aspartikasit	1679,4	1316	1648,4	1679	1387,9	1527,9	1533	1433,8	1452
Serin	784,8	459,3	731,1	782,8	487,2	708	702,3	602,6	614
Glutamikasit	1646	2427	3956,9	3248	1725,2	3649,1	3750,1	3111,6	3396
Prolin	543,3	643,1	709,1	572,9	510	576,1	547,4	487,4	519
Glisin	691,6	441,9	782,7	665,9	481,6	672,2	743,9	629,2	682
Alanin	807,6	581,9	799,9	864	600,5	779,6	732,9	616,9	662

Not.Tritoftan adlı amino asit Türk fındığında rastlanmadığı için tabloda gösterilmemiştir.

Türkiye de yetişen fındık çeşitlerinin cinslerine göre hangi amino asit grubundan ne kadar içerdiğini Tablo 1.5 de görmek mümkündür [12].

Fındık vitamin bakımından da zengin bir içeriğe sahip bir üründür ve özellikle E vitamini açısından son derece zengindir. E vitamininin metabolizma açısından ne kadar önemli olduğu da göz önüne alınmalıdır. Aşağıda Tablo 1.6 da Türk fındık çeşitlerinin vitamin içerikleri verilmiştir.[14] ve [3] .

Tablo 1.6. Türk fıındık çeşitlerinin vitamin içerikleri

	Vitaminler (mg / 100 g kb*)			
	B1	B2	B6	E
Nevi				
Tombul	0,410	0,051	0,180	20,627
Palaz	0,320	0,040	0,230	16,338
Mincane	0,363	0,051	0,330	16,482
Foşa	0,254	0,057	0,190	18,894
akıldak	0,328	0,056	0,310	19,532
Kalınkara	0,339	0,057	0,250	15,223
Cavcava	0,335	0,051	R	17,622
Uzunmusa	0,264	0,047	R	18,218
Sivri	0,322	0,062	0,240	14,003

* kb kuru bazda miktar anlamındadır

Mineraller bakımından da fıındık ürünü oldukça zengin bir içeriğe sahiptir. Özellikle içerdiği çinko bakımından son derece ilgi çekmektedir. Türk fıındık çeşitlerinin mineral içerikleri Tablo 1.7 de verilmektedir [14] ve [15].

Tablo 1.7. Türk fıındık çeşitlerinin mineral içerikleri

	Mineral mg / 100 g kb*							
	Fosfor	Kalsiyum	Magnezyum	Mangan	Potasyum	inko	Demir	Sodyum
Nevi								
Tombul	304	118,7	157	7,32	618,6	5,94	3,32	4,76
Palaz	284	121	151,5	8,56	613,7	6,42	1,9	3,32
Mincane	272	95,8	158,5	5,64	550,7	3,46	2,19	2,42
Foşa	246	99,5	154	7,47	730,2	3,02	2,42	1,53
akıldak	55,07	147,2	181	7,6	875,7	5,28	2,58	3,25
Kalınkara	264	105,7	167,5	8,02	623,5	3,74	2,05	2,93
Cavcava	224	96,9	168	6,43	676,8	8,38	2,86	3,83
Uzunmusa	312	93,2	158,5	7,3	628,1	4,1	2,42	4,21
Sivri	256	100,1	160	8,4	618,6	3,82	1,96	4,21

*kb kuru ürün anlamındadır

Ayrıca Tablo 1.8 de fıındık işleme metotları ve kullanım yerleri verilmektedir [3]. Burada saklanma koşulları bakımından en uygun biçimler, öncelikli olarak uygun

nem koşullarında kabuklu fındık olarak, yada nem içeriği oldukça düşürülmüş ve hava almayan vakumlu veya vakumsuz ambalajlarda kavrulmuş iç fındık olmaktadır.

Tablo 1.8. Fındık işleniş biçimleri ve kullanım alanları

Bulunuş biçimi	Tanımlanması	Kullanım alanı
Doğal	Kabuklu veya kabuksuz	Çerez
Beyazlatılmış	Bütün iç ve zardan arınmış	Gıda endüstrisi hammaddesi
Kavrulmuş	Kavrulmuş bütün iç max % 3	Çerez ve gıda endüstrisi
	nem içerikli	Hammaddesi
Küçük parçalara	Kavrulmuş iç ve 2-10mm arası	Gıda endüstrisi hammaddesi
Bölünmüş	parçalara bölünmüş	
Dilimlenmiş	Dilimlenmiş beyazlatılmış iç	Gıda endüstrisi hammaddesi
Öğütülmüş	Kavrulmuş iç ve max 2mm	Gıda endüstrisi hammaddesi
Püre haline gelmiş	Kavrulmuş ve preslenmiş	Gıda endüstrisi hammaddesi
	ağır şurup	özellikle çikolata endüstrisi
Ezilmiş	Kavrulmuş iç fındık şeker ve	Doğrudan tüketici sarfıyatı
	vanilya ile karışmış durumda	

Aşağıda verilmiş olan Tablo 1.9 da 100 gram fındığın içerdiği besin değerleri gösterilmiştir [16].

Tablo 1.9. 100 gram fındıktaki ortalama besin değerleri

	100 g Üründeki Besin değerleri	
Enerji 2739 kJ (648 kcal)	Vitaminler	Tyr 470 mg
Su 5.2 g	Karotene 30 µg	Val 870 mg
Protein 12.0 g	Vitamin E 25 mg	
Lipidler 61.6 g	Vitamin B1 390 µg	Lipidler
Karbonhidrat 11.4 g	Vitamin B2 210 µg	Palmitik asid 3000 mg
Mineraller 2.4 g	Nicotinamide 1350 µg	Stearik asid 1100 mg
	Pantotenik asid 1150 µg	Oleik asid 47.4 g
Mineraller 2.4 g	Vitamin B6 450 µg	Linolik asid 6300 mg
Sodyum 2 mg	Folik asid 70 µg	Linoleik asid 150 mg
Potasyum 635 mg	Vitamin C 3 mg	
Magnezyum 155 mg		
Kalsiyum 225 mg	Amino Asitler	
Mangan 6 mg	Arg 2030 mg	
Demir 3800 µg	His 280 mg	
Bakır 1280 µg	Ile 770 mg	
Çinko 1870 µg	Leu 890 mg	Diğerleri
Fosfor 335 mg	Lys 380 mg	Salikilik asid 140 µg
Klorit 10 mg	Met 140 mg	Purines 25 mg
Fluorit 17 µg	Phe 510 mg	
Iodine 2 µg	Thr 400 mg	
Selenyum 2 µg	Trp 200 mg	

Ancak mineral içeriklerinin fındığın tipi ve yöresine göre de biraz farklılıklar gösterdiği unutulmamalıdır. Bu durum Türkiye de yetişen farklı fındık çeşitleri için Tablo 1.10 da verilmiştir [14].

Tablo 1.10. Türk fındık çeşitlerinin besin değerleri

Nevi	Su	Karbon hidrat %	Protein %	Mineral %	Yağ %	% Yağ miktarı yüzdesi olarak Yağ Asidi					
	Miktarı %					Pal- mitik	palmit Oleik	Ster- anik	Oleik	Line- oleik	Doymamış /doymuş
Tombul	4,83	15,72	13,78	2,07	64,8	4,5	0,22	1,02	82,6	11,7	17,12
Palaz	4,68	14,21	12,43	2,05	63,3	6,71	0,83	1,67	79,8	11	10,93
Mincane	4,56	12,22	13,29	1,9	63,6	7,88	0,69	2,32	76,9	12,5	8,83
Foşa	4,9	15,35	13,95	2,16	57,7	6,74	0,72	2,15	73,1	17,3	10,25
Çakıldak	5,19	22,32	14,91	2,55	55,1	5,62	0,49	1,12	71,3	21,4	13,82
Kalınkara	4,83	16,61	11,71	1,95	64,7	5,23	0,24	1,15	78,7	14,7	14,68
Cavcava	4,41	15,52	11,54	1,97	62,9	9,27	0,87	2,03	71,8	16	7,84
Uzunmusa	4,55	12,77	12,38	2,12	66,4	BY	BY	BY	BY	BY	BY
Sivri	4,65	10,88	13,55	2,05	66,3	6,61	0,34	1,71	76,2	15,1	11,02

Notlar

BY Bilgi yok anlamındadır

1.8. Yiyecekleri Bozan Etkenler

Dalından koparılan sebze, meyve ve diğer yiyecekler, uygun ortamlarda saklanmadıkları sürece, tüketilinceye kadar birçok değişime uğrar. Besinlerin bileşiminde bulunan su, proteinler, madensel tuzlar, vitaminler, karbonhidratlar (şeker ve nişasta) ve enzimler yiyeceklerin bozulmalarını kolaylaştırırlar. Nemli ve sıcak ortamlar bozulmayı daha da çabuklaştırırlar. Bozulmuş yiyeceklerin besin değerleri kaybolur, yenilmesi sakıncalı olduğu gibi besin zehirlenmelerine dahi neden olabilir. Yiyeceklerin bozulmalarına neden olan faktörler biyolojik, fiziksel ve kimyasal olmak üzere üç gruba ayrılır [17].

Bu etkenlerin önemli bir kısmını doğal metotlarla bertaraf etmek için ya yiyeceklerin nem miktarlarının düşürülmesi gerekecektir, yada yiyecek nevine göre uygun soğuk oda şartlarında muhafaza edilecektir. Bunların içinde yiyeceklerin kurutulması bilinen en eski ve günümüzde en etkili ve ucuz koruma yöntemi olmaktadır. Fındığın

kavrulması ve bununla birlikte oluşan kuruma suretiyle nem azalması bu nedenle son derece önem arz etmektedir.

1.9. Literatür Çalışması

Çalışma konusu olan fındık ürünü, endüstriyel işlenme biçimleri, kavurma işlemi ve bununla ilişkili olarak kurutma prosesi ve akışkan yataklarda benzer uygulamalar birçok araştırmacı tarafından günümüze kadar yapılmıştır. Bunların içinde önemli olabilecek kaynaklar aşağıda çıkarılmıştır.

Ayfer ve arkadaşları bu çalışmada ihraç edilen fındık çeşitlerini araştırmışlar ve kaç değişik fındık ve bunların hangi yörelerde ne miktarlarda üretildiklerini belirlemişlerdir. [12].

Arpacı ve arkadaşları bu çalışmalarında ısı transferini detaylı olarak incelemişler ısı transferi problemlerinin nümerik çözümleri konusunda ayrıntılı bilgi vermişler ve çözüm algoritmalarına örnekler sunmuşlardır [60].

Baş ve arkadaşları bu çalışmalarında miktar olarak önemli ölçülerde üretilmiş olanTürk fındık çeşitlerini belirlemişler ve bunların özellikle ihraç kalitesinde olanlarının içerik analizlerini vermişlerdir. [14].

Bergner ve arkadaşları fındık ürünün yüksek oranda yağ içermesi nedeniyle oksijenle temas etmesi neticesinde husule gelen yağ oksitlenmesi biçimindeki ürün bozulmasını, bunun oluşum mekanizmalarını ortaya koymuşlar ve analizlerini çıkarmışlardır. Bozucu metabolizmanın oluşum hızlarını yavaşlatmak ve engellemek amacıyla kurutma parametrelerini ortaya koymuşlardır [36].

Bobiç ve arkadaşları patates havuç vs. çeşitli sebzelerin akışkan yatakta kurutulması sürecini incelemişler ve kurutma kinetiklerinin nasıl değiştiğini göstermişler aynı zamanda kurutma hızı sıcaklık gibi parametrelerin ürün kalitesine etkilerini araştırmışlardır. Akışkan yatak kurutmasının son derece etkili ve verimli ürün kalitesi açısından ise üstün olduğunu göstermişlerdir [56].

Botta ve arkadaşları bu çalışmada fındık ürününün terkinde bulunan şeker yağ ve yağ asidi gibi maddelerin miktar analizlerini sunmuşlardır. Budinger bu çalışmasında akışkan yatak tiplerini ve akışkanlaşma prensiblerini anlatmıştır. Akışkan yatak reaktörlerinin avantaj ve dezavantajlarını göstermiştir. Akışkan yataktaki basınç düşümlerini çıkarmış, minimum akışkanlaşma hızının bulunuşunu göstermiştir [26].

Bulduk bu çalışmasında gıda teknolojisinin tarihçesi değişen beslenme alışkanlıkları gıda teknolojisinin tanımı gıda muhafaza yöntemleri ve bu yöntemlerdeki teknolojik gelişmelerini sıralamıştır. Yiyeceklerin kurutularak saklanma teknolojilerine ve bunlardaki gelişimlere değinmiştir [24].

Barbosa ve Mercado bu çalışmada yiyeceklerin çeşitli metotlarla kurutulmasını ayrıntılı olarak incelemişler ve bu esnada gelişen olayların oluşum mekanizmalarını kurutma kinetiklerini ve geçerli olan metotları araştırmışlardır. Kurutma ile metabolizma oluşumunun nasıl etkilendiğini göstermişlerdir [22].

Demir ve arkadaşları bu çalışmalarında fındığın 100-180 C arasındaki sıcaklıklarda kavurma prosesi esnasındaki renk değişimini incelemişler ve bu renk değişimi kinetiğini ayrıntılı olarak çözümlemeye çalışmışlardır. İncelemeyi iki kısma ayırmışlar düşük sıcaklık ve yüksesıcaklık olarak bunu da isothermik ve izothermik olmayan süreç olarak düşünüp incelemişlerdir [1].

Demir ve arkadaşları bu çalışmalarında fındık partiküllerinin klasik kavurma fırını içinde kavurma esnasındaki sıcaklık değişimlerini incelemişlerdir. Sürekli olmayan rejim için fındık partiküllerine mahsus bir ısı transfer modeli geliştirip önermişlerdir. Partikül sıcaklık dweğişiminin hem deneysel ve hemde model olarak belirlenmesini ve bunların karşılaştırılmalarını yapmışlardır [25].

Durak bireysel olarak yapmış olduğı bu çalışmada fındığın kolesterol seviyelerine etkisi ve antioksidan potansiyeli üzerine yapılmış olan çalışmaları bunların sonuçları hakkında önemli konulara temas etmiştir [9].

Grosch bireysel olarak bu çalışmasında kavrulmuş fındıkların depolanmaları ve bu depolama koşullarının optimizasyonu üzerine araştırmıştır. Ürün saklama sürelerinin uygun parametrelerle değiştirilebileceğini göstermişlerdir [38].

Hacıbrahimog̃lunun yapmış olduğu bu çalışmada fındığın yetişdiriciliğden son tüketiciye kadar olan aşamasındaki ekonomik ve yetişme koşullarının incelenmesi yapılmış bu değerlere etki eden parametrelerin ne şekilde değişip yönlendirilebileceğİ üzerinde durulmuştur [5].

Hagen bu çalışmasında ısı transferini ayrıntılı olarak incelemiş, ısı transferi problemlerine analitik ve nümerik çözümlenmesiyle ilgili yöntemler vermiştir [60].

Henneberg ve arkadaşları bu çalışmalarında akışkan yatakta kum taneleri vasıtasıyla havanın nemlendirilmelerini incelemişler bu konuda bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde kütle transferi değerlerinin yerine ısı transferi verilerini kullanarak çözüme gidilmesi önerilmiştir. Ayrıca akışkan yatakların modellenmesinde baloncuk fazının aktif olmayan bypass fazı olarak düşünölüp değerlendirilmesini önermişlerdir [53].

Hoffmann bu çalışmasında şeker içeren ürünlerde kurutma ve sıcaklık etkisiyle ve hangi sürelerde uygulanmaları durumunda şekerin ne türde reaksiyona gireceğİ ve şeker karemalizasyonunun oluşum biçimini vermiştir [28].

Holland ve arkadaşları bu çalışmada tüm yiyeceklerin kendi sınıfından ürünlerle ve çeşitli çerez tipi kuru yemişlerin kompozisyonları ve bunların vitaminsel, mineral ve diğİer bakımlardan besinsel içerikleri karşılaştırmıştır [10].

Kneule kurutma için temel kaynak olan bu eserinde kurutma proseslerini tüm yönüyle incelemiş ve özellikle kayda değer olarak kurutma esnasında katı partiköl içindeki nem hareketlerini irdelemiş bu konudaki daha önce önerilmiş olan hareketmekanizmalarını derlemiştir [44].

Labuza bu eserinde ortalama nem içeren yiyeceklerin stabilitesini ve Bozulmalarını çeşitli yönlerden incelemiş ve özellikle yağ oksidasyonunun oluşum ve yiyecek bozulmasına etkilerini sergilemiştir [35].

Lopez ve arkadaşları bu çalışmalarında İspanyada yetişen çeşitli fındıkların su adsorpsiyon davranımlarını incelemişlerdir. Su adsorpsiyonun sıcaklıkla olan ilişkisini belirlemişlerdir. Böylece fındığın higroskopik davranımını çeşitli modeller yardımıyla çıkarmışlardır [30].

Lopez ve arkadaşları bu çalışmada muhtelif kurutma şartlarının fındığın ürün kalitesine olan etkilerini araştırmışlardır [32].

Lopez ve arkadaşları bu çalışmada kurutma şartlarının fındık kalitesine etkilerini ve özellikle yüksek yağ içeren ürün olması nedeniyle lipid oksidasyonunu incelemişlerdir [37].

Lott ve arkadaşı bu çalışmasında çeşitli yemişlerin içeriklerini ve mineral bileşimlerini incelemişlerdir [8].

Navarette ve arkadaşları bu çalışmada fındığın nemlenme esnasındaki şekil Değişimi ve mekanik özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. Fındığın hidrasyon Kinetiğini Fickian yaklaşımı ile çözmüşlerdir. Fındık nem içeriği suya batırma Esnasında %60'a kadar nem içeriğinde hızlı olduğunu bundan sonra katda değer bir nemlenmenin olmadığı veya çok yavaş geliştiğini tespit etmişlerdir [31].

Okos bu kaynak eserinde yiyeceklerin kurutulmasını derinlemesine incelemişgeçerli modellerin analizini yapmış ve buradaki mekanizmaları ve baz alınan formülasyonları vermiştir [46].

Özbek bu eserinde fındık yetiştiriciliği ve tarımını incelemiş hangi yöreleri ve iklim koşullarının fındık yetiştiriciliği için en uygun şartları sağladığını göstermiştir [3].

Özdemir ve arkadaşı bu çalışmada klasik tip kavurma fırınlarında fındık kavurma esnasında ürünün kurutma kinetiğini incelemişlerdir. Fındığın diffüsitivitesi belirlenmiştir. Burada çeşitli modellerin deneysel verilerle uyumu araştırılmış ve bunların arasında Thompson modeli uygun görülmüş ve önerilmiştir [13].

Özdemir ve arkadaşı bu çalışmada kavura işlemi esnasında fındık ürününün renk değişimini incelemişler ve bunun sıcaklık hava hızı gibi parametrelere ne şekilde bağlı olduğunu çıkarmışlardır. Bu çalışmada Tombul fındık cinsi incelenmiştir [33]

Özdemir bu tezinde Giresun tipi tombul fındığın kavrulmasını incelemiş ve bu esnada renk değişiminin kinetiğini çıkarmıştır. Ürünün kimyasal ve yapısal özelliklerinin ne şekilde değiştiğini incelemiştir [11].

Özdemir ve arkadaşı bu çalışmada Tombul fındığın kavrulması esnasında bazı besinsel değerlerin ne şekilde değiştiğini ve bunların hangi parametrelere bağlı olduğunu göstermiştir [2].

Özdemir ve arkadaşları bu çalışmasında kavrulma esnasındaki fındık içlerindeki rkoyulaşma ve renk değişiminin analizini yapmıştır ve çalışmadan görüldüğü gibi bu renk değişimi ürünün şeker içeriğine ve su aktivitesine direkt olarak bağlı olmaktadır. Su aktivitesi ve sukros miktarı artukça koyulaşmada belirgin hale gelmektedir [29].

Pala ve arkadaşları bu çalışmalarında çeşitli fındık tiplerinin besinsel analizlerini vermişler ve insanların beslenmesi açısından bu bileşimlerin önemi üzerinde durmuşlardır [15].

Patangar bu çalışmada ısı transferi problemlerinin nümerik metot ile çözümlenmelerinde kullanılması gereken yöntemleri açıklamıştır [59].

Perren ve arkadaşları bu çalışmasında sıcak hava üflemeli fındık kavurma proseslerinin ürünün oksidasyon yoluyla bozulma stabilitesini artırmaya yönelik

olarak incelemişlerdir. Bu parametrelerin optimizasyonu ile ilgili çalışmalarını geliştirmişlerdir [39].

Saklar yapmış olduğu bu tez çalışmada fındık kavurma prosesi için en uygun şartların belirlenmesine yönelmiştir. Bu parametrelerin renk, kurutma, yapısal ve lezzet değişimlerine etkilerini incelemiş ve bunlarla ilgili öneriler sunmuştur. Bu analizlerin içinde tüketici beğeni yönteminin önemine değinmiştir [3].

Saklar ve arkadaşları bu çalışmasında fındığın kavrulma esnasındaki mikro yapı değişimlerini incelemişlerdir. Bu inceleme esnasında kavurma havası sıcaklığı, hızı ve kavurma süresi kademeli olarak artırılarak mikroyapı değişimleri gözlenmiştir [7]

Scandrett bu çalışmasında kavurma esnasında arpa vb ürünlerdeki aroma ve kavrulmuşluk kokusunun oluşumu ve değişimini incelemiştir. Bu değişimleri etkileyen faktörlere yer vermiştir, ayrıca Maillard reaksiyonunu anlatmıştır ve oluşum için gerekli şartları vermiştir [18].

Schönherr bu yayınında termal kurutma prosesinin temel ilkelerini gelişim aşamalarını sınıflandırılmasını ürünlerin higroskopik açıdan tanımlanmasını ve tüm bu bilgilerin yiyeceklerin kurutulmasına uygulanmalarını vermiştir [43]

Schönherr bu yayınında Teknik anlamda kurutucuların temel özelliklerini sınıflandırılmasını, tiplerine göre kullanım yerlerini, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını vermiştir [45].

Seyhan ve arkadaşları bu çalışmalarında Türk fındık çeşitlerindeki lipas ve peroksidas aktivitelerini incelemişlerdir. Bu esnada ya sıcaklığı sabit alıp pH değerini değiştirmişler yada tam tersi seçilerek konuyu araştırmışlardır. Böylece pH ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak bir enzim aktivite modeli geliştirmişlerdir [20]

Throller and Christian bu eserlerinde su aktivitesinin yiyecekler üzerinde etkileri ve onların bozulmalarına ne şekilde ve hangi oranlar içinde yoğun olarak neden olduğunu göstermiştir [23].

Topuz bu çalışmasında kabuklu fındıkların akışkan yatakta kurutulmasını incelemiş, kurutma karakteristikleri için akışkan yatağın katı gaz ve baloncuk fazından oluştuğunu kabul ederek model geliştirmiştir [40]

Treybal temel kaynak olan bu eserinde tüm kütle transfer operasyonlarını ayrıntılı bir biçimde aktarmıştır. Özellikle kurutma konusuna temel bir yaklaşım vermiş ve konunun temelleri üzerinde durmuştur [42].

Tüter bu eserinde yiyeceklerin çeşitli saklanma yöntemlerini ayrıntılı bir biçimde anlatmıştır. Kurutularak saklamanın etkin bir yöntem olduğunu ve kurutma esnasında nelere dikkat edilmesi gerektiğini belirtmiştir [17].

Whistler ve arkadaşı bu eserlerinde çeşitli gıdalardaki karbon hidrati muhtelif yönleriyle incelemişler ve aktarmışlardır [21]

Yavuz bu çalışmasında Giresun bölgesindeki fındık üretimi ve tarımı ile ilgili verileri toplamış ve aktarmıştır [6].

Yukarıda bahsedilen ve konuyla ilgili diğer çalışmalarında ışığı altında, bu çalışmada öncelikli olarak kimyasal bir işlem olarak kavurma reaksiyonu ve oluşum tarzları gösterilecektir, iç fındıklara uygulanan kavurma reaksiyonunun bir sonucu olarak hasıl olan kurutma işlemi, önce anlatımsal olarak ayrıntılı verilecektir. Kurutma ve kavurma işleminin üründe meydana getireceği değişimler verilerek, oluşacak nihai üründe hasıl olacak gelişimler anlatılacaktır. Ürünün çevreden nem alıp vermesi (absorpsiyon ve desorpsiyon) şartları, denge nemi, su aktivitesi, histeresiz, ve kurutma tekniği ile ilgili diğer önemli kavramlar anlatılacaktır. Kurutma esnasında oluşan ısı ve kütle transferi prosesleri incelenecektir. Akışkan yataklar tanıtılacak, kurutma havası hızlarına, yatak karakteristiklerine ve katı partikül tane büyüklüklerine göre sınıflandırılmaları gösterilecektir. Bunu takiben deneylerin yapılışı anlatılacaktır, akışkan yatakta fındık kavurma prosesinin kurutma tekniğini ilgilendiren ısı ve kütle transferi incelenecek ve proses modelleneyecektir. Akışkan yatağın modellenmesinde baloncuk oluşumları göz önüne alınacak ve gaz katı ve

baloncuk fazlarından oluşan üç fazlı model ile çözüme gidilecektir. Burada Ürün dış yüzeyindeki hava filmindeki nemin azalımı ve belirlenmesi model çözüme dayanak oluşturacaktır. Oluşturulan model çözümleri deneysel verilerle kıyaslanacaktır. Bu çalışmada verilen akışkan yatak kavurma fırını duraklamalı (batch) çalışma prensiplidir. Bu sistemin geliştirilmesi ve sürekli çalışmalı ve endüstriyel kullanıma uygun hale getirilmesine yönelik somut öneriler verilecektir. Bu çalışmadaki esas amaç tekniğin üst düzeyini, rekabet edebilir maliyetlerle, ülkemizin adeta petrolü olan fındığın en önemli işleme prosesi olan kavurmaya uygulanmasını sağlamaktır. Böylelikle endüstrimizde bu konuda yeni bir aşama kaydedileceği beklenmelidir.

BÖLÜM 2. KAVURMA, KURUTMA TEKNİĞİ VE GIDALARA UYGULANMASI

2.1 Kavurma Reaksiyonun Tanımlanması

Kavurma işlemini, yüksek sıcaklıklarda ürünün lezzetini artırmaya yönelik bir proses olarak tanımlamak mümkündür. Bu ısı tatbiki esnasında, ürünün kimyasal, fiziksel ve besinsel özelliklerinde değişimler olması kaçınılmaz olmaktadır. Burada önem verilmesi gereken husus, bu parametreleri uygun tarzda denetleyip seçerek ürünün toplam lezzeti, nemi ve rengi gibi özelliklerini isteğe uygun biçimde etkileyip, düzenlemek olacaktır. Fındığın kavrulması, genellikle uygun sıcaklıklarda ve sıcaklığa bağlı olarak değişmek koşuluyla 60 dakikayı aşmayacak sürelerde uygulanmaktadır.

2.2 Kavurma Prosesinin Ürüne Etkileri

Fındık kavurma esnasında oluşacak minimum sıcaklıklar dolayısıyla, yapıda bulunabilecek toksin ve allerjen maddeler yok olacaktır. Depolanmış kuru yemiş türü gıda maddelerinin tümünde depolama şartlarına bağlı olarak küf ve bakteri oluşumuna rastlanmaktadır, yani mikro-toksin oluşumu söz konusu olacaktır. Aflatoksinde bu mikro-toksinler arasında sayılmaktadır. Bu olumsuzlukların tümünü belirli minimum sıcaklıkların üstünde kavurma işlemine tabii tutmakla bertaraf etmek mümkün olmaktadır [1].

Kavurma işlemi ürün neminin azalmasıyla ve hücresel yapı değişimleri nedeniyle, üründe arzu edilen gevrek ve ağızda kolay dağılır lezzetli bir yapı oluşturmaktadır [11].

Bu özelliklerin kazandırılması için fındıkta ürün tipine bağlı olarak değişmek koşuluyla 100 ile 150 °C arasında sıcaklıklarda ve 10 ile 60 dakika arasında sürelerde kavurma şartları önerilmektedir [13].

Kavurma işleminden önce, ürün büyüklüklerine göre sınıflandırma yapmak ürünlerin homojen olarak ve birbirleriyle aynı derecede ve yoğunlukta sıcaklık artışlarına haiz olmalarını sağlayacaktır. Böylece üniform ve arzu edilen lezzette bir kavurma sonrası yapı elde etmek mümkün olacaktır. Ancak yine de endüstride kullanımı yaygın olan yürüyen bant tipi konvektif kurutma fırınlarında, ürünün tam homojen kavrulmasının sağlanmasında bazı güçlükler olabilmektedir.

2.3. Kavrulma Reaksiyonlarının Sınıflandırılması

Enzimatik olmayan kavrulma reaksiyonları ısı tatbiki esnasındaki, sıcaklık, hava hızı ve sürelerine bağlı olarak üç farklı biçimde ürün ortaya çıkarmaktadır, bu farklı kavrulma biçimleri aşağıdaki gibi sınıflanmaktadır [18].

1. Piroliz reaksiyonu
2. Karamelizasyon
3. Maillard reaksiyonu

2.3.1 Piroliz

Yunanca piro ön eki yanma anlamını taşımaktadır. Bu reaksiyon şeker moleküllerindeki suyun tamamen kaybolmasıyla husule gelmektedir. Bunu takiben şeker yapılarındaki karbon-karbon bağlarının kopması oluşmaktadır. Sonuç olarak yanmış ve yenilemeyecek tatlara haiz ürünler, bu reaksiyon sonucunda ortaya çıkmaktadır. Uygun parametrelerle kavrulmuş ürünlerde ortaya çıkmayacaktır.

2.3.2 Karamelizasyon

Isı sevkياتına bağlı olarak, fakirleştirilmiş şekerin konsantre bir eriyiğe dönüştürülmesi anlamına gelmektedir. Bu durumdaki şeker sudan arındırılmış şeker

olarak da adlandırılmaktadır. Bu reaksiyon boyunca şekerler, yapılarındaki su moleküllerini enolizasyon prosesi oluşumu dolayısıyla kaybetmektedir. Bu enolizasyon süreci ürünün pH değerine de bağlı olarak gelişmektedir ve hem karamelizasyon ve hem de Maillard reaksiyonu için sürükleyici bir faktör olmaktadır. Bir çok ara ürün ve pH değerinin 2-7 arasında olmasına bağlı olarak D-fruktozları, Furan, İzomaltol ve Maltol ürünlerine dönüşmektedir. Bu durum üründe kabukumsu yapı, lezzet ve aromaların oluşumu ile fark edilmektedir. Ürün pH değerine bağlı olarak, sıcaklık değeri ve işlem süresi şeker karamelizasyonunu doğrudan etkilemektedir ve arzu edilen renk, lezzet ve aromanın oluşmasında önemli etkenlerin birisi olarak ortaya çıkmaktadır.

2.3.3 Maillard reaksiyonu

Maillard reaksiyonu herhangi bir amino grubunun kondense olması veya azalmış bir ürün bileşeni nedeniyle hasıl olmaktadır. Bu reaksiyon gıdada ve biyolojik sisteminde karmaşık değişimlere neden olmaktadır. Maillard reaksiyonu ilk kez 1912 yılında Louis Maillard tarafından keşfedilmiştir. Prensip olarak ısıtılan ve depolanan gıdalarda oluşmaktadır. Maillard reaksiyonu sonucunda çoğunlukla karamel aroması (kavrulmuşluk kokusu) ve açık kahverengimsi sarıya çalan bir renk oluşumu ortaya çıkmaktadır. Bu özelliklerin her ikisi de üründe genellikle arzu edilen durumlardır. Maillard reaksiyonu esas itibarıyla üç ana peryottan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla aşağıda gösterilmiştir [18].

1.Basit şeker yapıları ile amino asitlerin yoğunlaşması neticesinde birleşmelerinden dolayı oluşan başlangıç reaksiyonudur. Bu esnada şeker, su molekülleri ve aldosiilamine dönüştüğünden su kaybetmektedir.

2.Ara peryot esnasında iki su molekülü kaybıyla oluşan, redüktan ve dehidro-redüktana dönüşen bir ekstra kuruma söz konusu olmaktadır. Bu oluşan ürünler esas itibarıyla karamel ürünleridir ve fakirleştirilmiş durumda iken kuvvetli antioksidan özelliklere haizlerdir. Bu peryot sırasında kısa zincir bağlarına haiz hidrolitik füzyon ürünleri de oluşmaktadır. Bu füzyon ürünleri amino asitler ve aldehitler ile birlikte aldol ürünlerinin yoğunlaşması neticesinde Strecker degradasyonuna uğramaktadır.

Bunun neticesinde üründe aroma verici metil butanol ve benzeri ürünler ortaya çıkmaktadır.

3. Daha önceki iki bölümde anlatıldığı gibi ortaya çıkmış tüm bu ürünlerin amino asitlerle yeniden reaksiyona girdikleri son peryottur. Bu esnada kahverengi pigmentlerin ve melanoid gibi tat ve lezzet veren bileşenlerin oluşumu husule gelmektedir.

Aroma değişim profili, ısıtma zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak gelişmektedir. Renk değişimi, oranına göre hem istenen ve bazen de istenmeyen bir durumdur, ancak sonuçta bir Maillard Reaksiyonu tepkimesi olarak ortaya çıkmaktadır ve kavurma işlemi sonucunda kaçınılmaz bir biçimde az veya çok oluşacaktır.

Maillard Reaksiyonu oluşum hızını, su aktivitesi a_w nin değeri de büyük ölçüde etkilemektedir. Bu reaksiyon a_w değerinin 0,5 – 0,8 arasında değiştiği ortalama su aktivitesi değerlerinde en hızlı bir biçimde vuku bulmaktadır. Ayrıca bu reaksiyona ürünün pH değeri de kuvvetli bir biçimde tesir etmektedir. Azalan pH değerlerinde renk değişimi de azalmaktadır [19] .

Ürün açısından bakıldığında lipasların ve peroksidasların aktivitesi, depolama ve proses şartlarının optimizasyonunda veri olarak kullanılabilir. Bu aktivizasyonlarda pH değeri de etkin bir rol üstlenmektedir [20].

Strecker degradasyonu da Maillard reaksiyonuna benzemektedir. Her iki reaksiyonunda olabilmesi için, ürünün cüzi veya azaltılmış şeker içeriğine sahip olması, amino asitler içermesi ve reaksiyon maddesi olarak az miktarda da olsa su ihtiva etmesi gerekmektedir [3].

Maillard ve Strecker reaksiyonları ile bir rekabet içinde şeker karamelizasyonu da oluşmaktadır. Termal nem azaltma ve ürün yapısındaki muhtelif şekerli maddelerinin parçalanması kahverengimsi renk pigmentleri oluşumuna, organik asitler, muhtelif aldehitler ve ketonların oluşumuna yol açmaktadır [3].

Maillard reaksiyonu basit şeker yapılarını, amino asitleri ve basit peptit yapıları birbirine karıştırıp birleştirmektedir. Bu reaksiyon şeker karamelizasyonuna kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve daha yüksek nem içeriği hallerinde başlayarak vuku bulmaktadır. Sıcaklığın 10 C artması bu reaksiyonun oluşum hızını 2-3 kat artırmaktadır [18].

Ürünlerin depolarda uzun süreli bekletilmeleri de bu reaksiyonun oda sıcaklıklarında dahi vuku bulmasına yol açmaktadır. Yani Maillard reaksiyonu hem yüksek sıcaklıklarda kavurma fırınlarında ve hem de uzun süreli bekletilme durumuna bağlı olarak, oda sıcaklıklarında oluşmaktadır. Bu ikinci olarak bahsedilen oluşum şartları koyu renkli ve eskitilmiş malt üretimi yapılan yerlerde vb. çok daha yüksek besin değerli ürünler elde edilebilmesini sağlamaktadır [18]ve[19]. Bu aynı koyu renklilik ve lezzeti artmış yapı özelliği, uygun koşullarda saklanmış eski ürün fındıklarda da gözlenmektedir.

Enzimatik olmayan kavrulma reaksiyonları renk, aroma ve lezzet değişimleri nedeniyle duruma göre hem istenen ve hem de istenmeyen reaksiyonlar olabilmektedirler. Ayrıca birçok durumda kavrulma reaksiyonlarının engellenmesi amino asitler gibi birçok besin değeri yüksek grupların korunmasını sağlamaktadır [20].

Karamelizasyon ise şeker ve şeker grupları gibi karbonhidrat maddelerinin direkt olarak ısıya maruz kalmaları sonucunda oluşmaktadır. Bu ısı tatbiki karbonhidratlı yapılarda anomerik değişimlere ve hücrel halkaların büyüklüklerinde farklılaşmalara, glikozidik bağların kopmasına ve yeni bağların oluşumuna yol açmaktadır [21].

Hücrel şeker halkaları içindeki bu çift halka oluşumu halkalar arasındaki doymamış bağ ringleri oluşumuna neden olacak, bunlar ise ısı ve ışığı absorbe ederek renk değişimine sebebiyet verecektir. Enzimatik olmayan kavrulma reaksiyonlarını etkileyen diğer faktörler pH değeri, oksijenin mevcutiyeti, metaller, fosfatlar ve sülfür dioksit olmaktadır [22].

Maillard reaksiyonu fakirleştirilmiş şeker, amino asitler ve proteinler arasındaki birbiri ardı sıra gelişen birçok komplike reaksiyonun oluşması ile vuku bulmaktadır. Bu reaksiyon ürünlerde besin değeri azalmasına kahverengimsi renk pigmentleri oluşumuna ve tat değişimlerine neden olmaktadır. Maillard reaksiyonu meyve gibi yemişlerde su aktivitesinin 0.65 ile 0.75 değerleri arasındaki bölgede maximum gelişim hızına sahiptir [23].

2.4. Fındık Kavurma Prosesi

Her üründe olduğu gibi fındıkta da saklama koşulları çok önemlidir. İyi kurutulmuş veya kavrulmuş fındığın hava almayan ambalajlarda 6 ay, vakumlu ambalajlarda ise 1 yıl süreyle besin özelliklerinden hiçbir şey kaybetmeden saklanabildiği bilinmektedir [24].

Kavurma hem sıcaklık ve hem de zaman parametrelerine bağlı bir işlem olduğundan, ürün yapısında ısı transferine dayalı olarak ortaya çıkan kurumanın yanı sıra kimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkmaktadır (3).

Bu değişimler üründe lezzet, aroma ve yapısal gelişimlere neden olacağından son derece önem arz etmektedir. İç fındıklar kurutulmuş olarak ve oldukça düşük nem oranlarıyla kavurma işlemine geldiklerinden kavurma esnasında ürün nemi değişimi, yaş ürünün kurutma işlemine nazaran çok daha az olmaktadır (3).

Kavurma işlemi öncesinde ürün nemi % 4-6 seviyelerinde olup, işlem sonunda % 1-3 seviyelerine inmektedir [25]. Diğer parametrelere bağlı olarak değişmekle birlikte, ürün nemi ne kadar azaltılırsa ürün lezzeti de çoğunlukla o denli artmaktadır.

Fındığın kavrulmasındaki esas neden tat ve yapısal değişim oluşturmak suretiyle ürün lezzetinin artırılmasını temin etmektir [66]. Kavurma işlemi uygun parametrelerle yapılmak koşuluyla, ürün toplam lezzetini artıran bir işlemdir [59]. Kavrulmuş ürün kolayca çiğnenir, ağızda dağılır, çtır ve gevrek olma bakımından çerez özelliklerine sahip, dolayısıyla ham ürüne kıyasla çok daha fazla yenme

çekiciliğine haizdir. Fındık ürünü için kavurma sık kullanılan ve vazgeçilemez bir işlemdir [11].

Belirli bir sıcaklığın üstünde yapılan kurutma veya kavurma işlemlerinde ürün yapısında hem kurutma ve hem de kimyasal değişimler olmaktadır. Bu sıcaklığı genel olarak 100 °C nin üzerinde sıcaklıklar olarak tanımlamak mümkündür. Bu kimyasal değişimler sırasıyla tat, aroma, ürün yapı değişimi, renk değişimi ve lipid oksidasyonu olarak verilebilir. Ayrıca başlangıç nem miktarına, kavurma havası hızına, ısı transfer hızına bağlı olarak ürün yapısındaki proteinler içinde de fizyokimyasal değişimler olmaktadır.

Bahsedilen tüm bu değişimler, ürün yapısında mevcut olan karbonhidratlarda, proteinlerde, yağlarda, vitamin ve amino asit gibi aktif elemanlarda, ürünün sıcaklık ve zaman parametreleriyle işleniş biçimine göre, farklı oluşumlara neden olacaktır [2].

Protein, amino asitler ve ayrılabilen yağlar, ya ayrışacak veya oksidize olacaktır. Bunların diğer ürün kısımları tarafından bloke edilip tutulması da mümkün olmaktadır. Oligosakaridler hidrolitik olarak ayrışacak veya karamelize olacaktır. Sukrozlar ise fruktoz ve glukoz dönüşeceklerdir.

Tüm bu kimyasal reaksiyonlar ham ürün yapısında renk, tat, koku, besin değerleri ve raf ömürleri bakımından değişimlere sebebiyet verecektir. Kavurma işlemi sonunda kaliteli bir ürün elde etmek için bu değişimlerin tümünün iyi anlaşılması ve hangi parametrelerle ne şekilde değiştiği bilinmelidir.

2.4.1. Kavurma işleminin üründe yarattığı değişimler

Kavurma işleminde hakim olan kimyasal reaksiyon enzimatik olmayan kavurma (non-enzimatik browning) olmaktadır. Bu reaksiyon esas itibarıyla üründe birincil olarak renk değişimi ortaya çıkarmaktadır. Fındığın kavrulması esnasında vuku bulan bu reaksiyon üç kademeli bir reaksiyon olarak düşünülebilmektedir. Bunlar sırasıyla

Maillard Reaksiyonu, Strecker Degradasyonu ve Şeker Karamelizasyonu olmaktadır. [3].

2.4.2. Şeker karamelizasyonu ve şekerin gıdalarda bulunma biçimleri

Genellikle ABD nde yetişen Oregon tipi ve İtalya da yetiştirilen fındık çeşitleri araştırılmıştır ve içerik analizlerinden görüldüğü gibi, fındık içleri kuru bazda % 2,8 ile 5,6 arasında şeker ihtiva etmektedir. Buda genel ortalama olarak % 4 lük bir miktara karşılık gelmektedir. Bu miktarın % 90 ını sukros, % 6 sını stakyos ve % 3 ünü rafinoz şekerleri oluşturmaktadır. Glukoz fruktoz ve myo-inositol şekerleri ise 40-400 miligram/100gram mertebelerinde kalmaktadır [26] .

Teknik anlamda şekerin bir çok farklı biçimi mevcuttur. Bunların arasında en çok tanınanı sukroslardır. Sukroslar şeker kamışı ve şeker pancarında bulunan şekerlerin büyük bir kısmını teşkil etmektedir. Aslında içeriğinde şeker bulunan meyve ve bitkilerin tamamında, belirli ölçülerde sukros bulunmaktadır. Marketlerde satışı yapılan mutfak kullanımı için hazırlanmış şekerlerde, aynı şekilde sukroslardan oluşmaktadır. Sık rastlanan diğer bir tip şeker ise olgunlaşmış meyvelerde bulunan fruktozlardır. Bir diğer çeşidi ise süt içeriğinde bulunan laktozlar olmaktadır. Bilindiği gibi şekerlerin tümü tatlımsı bir yapıya haizdir , ancak bunların arasında fruktozlar diğerlerinden daha da tatlıdır. Vücudumuzda nişasta ve şekerler daha ziyade glukozlara dönüştürülmekte ve direkt olarak kan dolaşım sistemimize alınmaktadır, sonuç olarak vücudumuzun ana enerji kaynağını oluşturmaktadır [27].

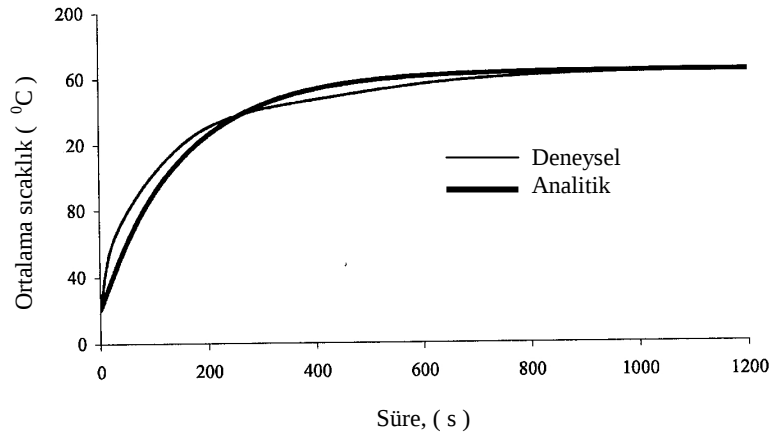
Şayet şeker (sukros) sıcak hava ile kademeli olarak ısıtılırsa belirli bir anda saf bir likit haline gelmeye başlayacaktır. Bunu takiben ilgili sıcaklığa ulaşılmasıyla sukros molekülleri ayrışmaya başlayacaktır. Bu durum birincil olarak nem alınması, yani ürünlerdeki su kaybı ile başlayacak ve bunu takiben karbon atomları arasındaki kimyasal bağların kopması ile devam edecektir. Bu prosesin bütünü oldukça karmaşık kimyasal olaylardan husule gelmektedir Bu proses hem kısmen oksidatif ve hem de yapı fakirleştirici (degradatif) bir süreçtir. Bu şekilde oluşan fakirleştirilmiş (degradatif) ürünler de, oluşan ara bileşenlerin çeşitleri bakımından aynı biçimde karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır. Bu andan itibaren

karamelizasyon husule gelmektedir. Bu tip moleküler yapılar çözünmüş yapılara dönüşmekte ve erimiş şekerler tarafından eritilerek tutulmaktadır. Bu süreç sonunda ısıtılmanın yoğunluğuna ve süresine bağlı olarak, önce lezzetli ve hafif kahverengimsi bir şurup, ısıtılma daha fazla sürdürülürse istenmeyen acımsı bir tat veren materyallere dönüşüm olabilecektir. Isıtma daha da artırılarak bir maksimum seviyeye getirildiğinde ise zengin karbonlardan oluşan kristalleşmiş bir son ürün ortaya çıkacaktır. Oksijenin çok az veya olmadığı ortamlarda yapılan ısıtılarda şeker yapıları, karbon ve su içinde ayrışacaktır. Bu ise ayrışma sonu ürünlerde çözünme çizgileri gibi katmanlar oluşturabilecektir [28] .

2.4.3. Kavurma işleminde nem kaybı ve kurutma

Kavurma işlemi esnasında vuku bulan proseslerden biri de kurutmadır. Kurutma işlemi de üründe kimyasal değişimlere neden olmaktadır. Daha önce değinildiği gibi kavurma prosesi boyunca ürün neminde azalma olmaktadır, böylelikle işlemin tamamının bir kurutma prosesi olarak düşünülüp incelenmesi mümkün olabilmektedir [11]. Kavurma işlemi sırasında üründeki nem, işlem sıcaklığı, süresi, hava hızı, ürün karakteristiklerine bağlı olarak değişecektir, bu veriler ise reaktör özelliklerini belirleyecektir.

Kavurma işlemi sırasındaki ürün sıcaklığının değişimini [Demir 2002] incelemiştir. Burada başlangıçta 20 °C olan ürün sıcaklığı, asimtotik olarak fırın sıcaklığına gelmiş ve son değer olarak 163,5 °C ye kadar çıkmıştır. İlk 5 dakikalık süre zarfında ürün sıcaklığı hızla 140 °C ye kadar çıkabilmiştir. Araştırmacı buradaki deneylerinde elektrik resistanslı üfleme küçük bir fırın kullanmıştır. Şekil 2.1 de grafiksel olarak değişimi görmek mümkündür [1].



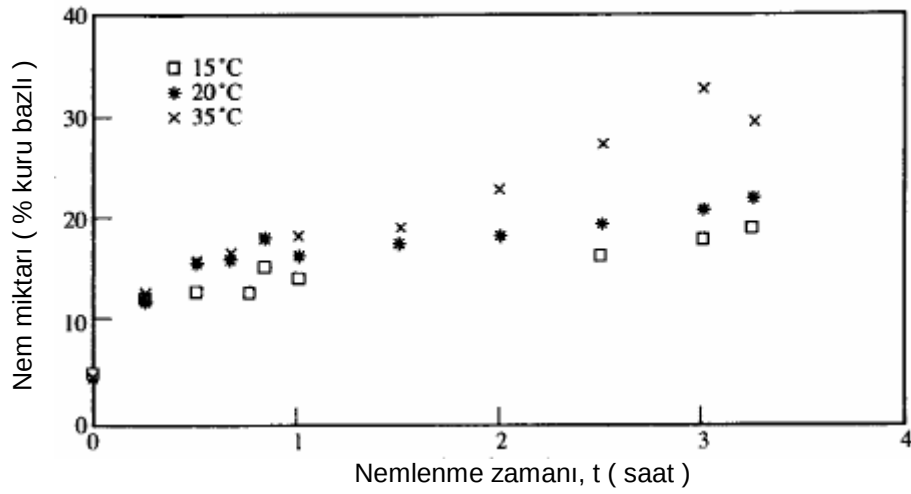
Şekil 2.1. Klasik kavurma fırınında partikül sıcaklığı değişimi

Ürünlerdeki kavurma ve kurutma karakteristikleri, kurutulan ürünün ısı ve kütle transferi karakteristiklerine, kurutma havası özelliklerine ve kurutma reaktörünün yapısına bağlı olarak değişecektir.

Nem miktarı renk ile birlikte ürünün kavurma prosesinin en önemli iki göstergesinden biridir. Nem miktarının proses esnasında hesaplanıp bulunması matematik modelleme yapılmasını gerektirmektedir ve bu konuda yeterince çalışma yapıp henüz bilimin emrine sunulmamıştır [29].

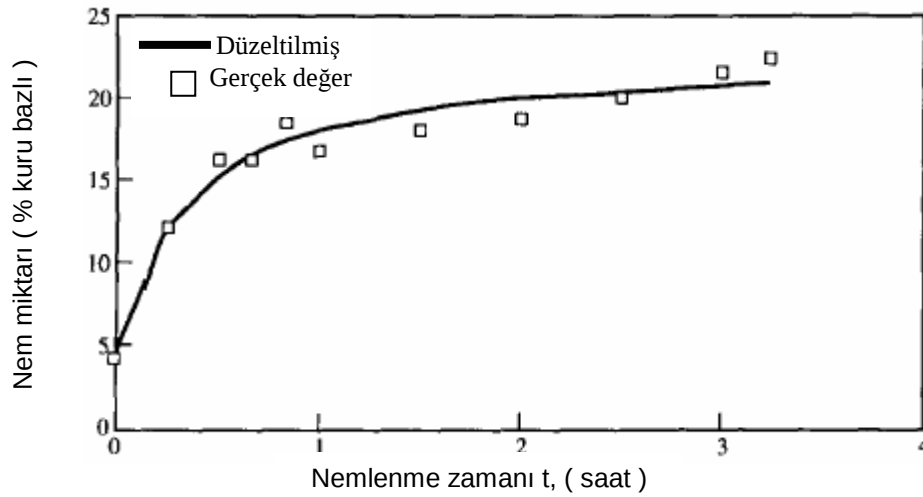
2.5. Fındığın Higroskopik Özellikleri.

Su adsorpsiyonu iç fındıkta kabuklu fındığa göre çok daha hızlı olmaktadır Bu durum iç fındık için Şekil 2.2 ayrı ayrı verilen adsorpsiyon eğrilerinde görülmektedir. Her iki durum için sıcaklık etkisi de gösterilmiştir, sonuç olarak daha yüksek sıcaklıklarda su adsorpsiyonu değerleri de daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun sıcaklıkla yükselen nem diffüzyon değerlerine bağlı olduğu anlaşılmaktadır [30].



Şekil 2.2. Negret tipi fındık içlerinin su adsorpsiyonu

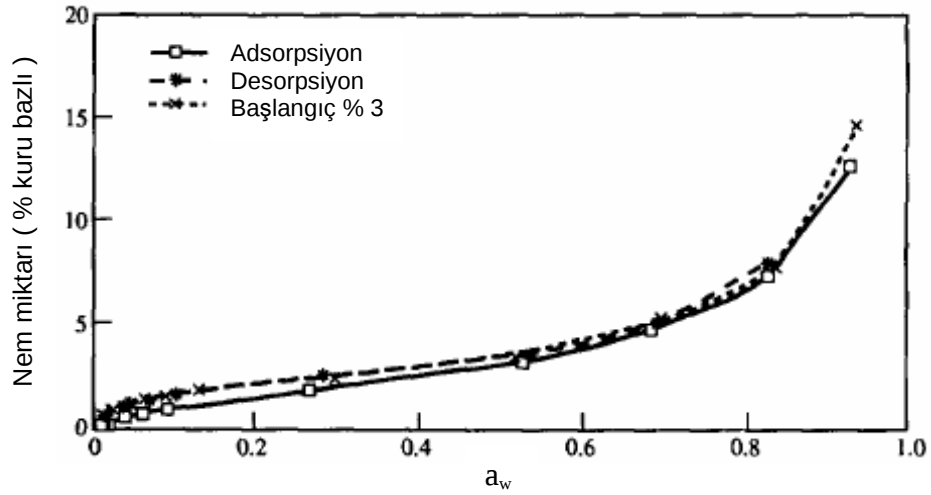
Şekil 2.3 de ise İspanyada yetişen Negret tipi iç fındıktaki 20 C sıcaklığa ait olan adsorpsiyon eğrileri gösterilmiştir,



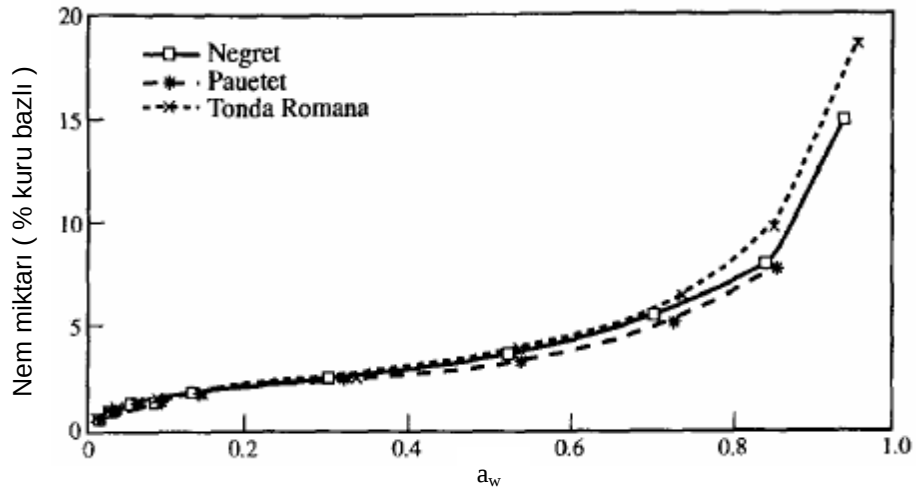
Şekil 2.3. Fındık içlerinin 20 C deki su adsorpsiyonu (Peleg modeli ile düzeltilmiş)

Şekil 2.4 de 10 °C deki fındıkların adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermeleri gösterilmektedir [30]. Bu eğrilerden anlaşıldığı gibi adsorpsiyon ve desorpsiyon arasındaki histerize farkları çok küçük ve ihmal edilebilir büyüklüklerde olmaktadır. Su aktivitesinin % 0,8 değerini aştığı durumlarda denge nemini oluşturabilmek mümkün görünmemektedir Bu durum denge oluşumundan önce küf oluşmasından

dolayı kaynaklanmaktadır. Burada görülen eğrilerin tamamı S biçiminde sigmoidal bir yapıya haizdir. Bu ise fındığın diğer birçok katı gıdalarda olduğu gibi erimeyen higroskopik bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir [30].



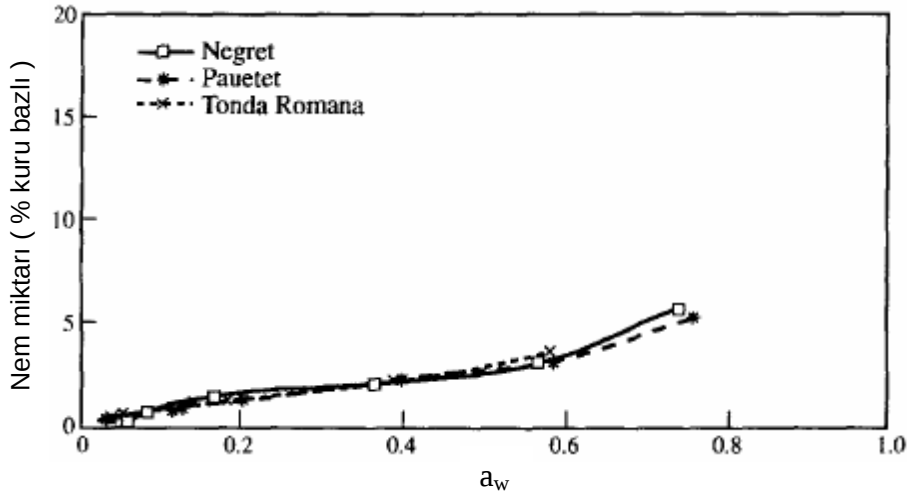
Şekil 2.4. Negret tipi fındıkların 10 C deki denge nem izotermi



Şekil 2.5. İspanyada yetişen çeşitli fındıkların 10 C deki denge nem izotermi

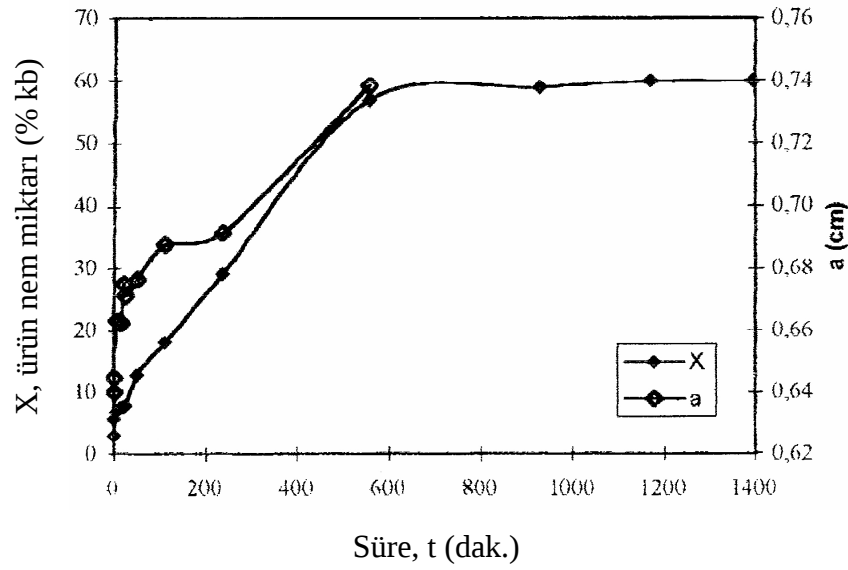
Şekil 2.5 de ise İspanyada yetişen muhtelif fındıkların denge nem izotermi görülmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi yalnızca su aktivitesinin 0,4 den daha büyük olduğu değerlerde farklı türler için denge nem izoterminde farklılıklar gözlemlenmektedir. Diğer tüm durumlarda denge nem izotermi sıcaklığın

artması ile azalma tespit edilmektedir. Bu durum Şekil 2.6 da gösterilen 30 °C deki değerlerle 10 °C için verilmiş olan değerler arasındaki farklılıktan teyit edilmektedir.



Şekil 2.6 İspanyada yetişen çeşitli fındıkların 30 C deki denge nem izotermi

Ürün içindeki su mevcudiyeti sıcaklık, pH değeri ve oksijen konsantrasyonu ürünün bozulması, ve içlerinde mikro organizmaların üremesiyle ilgili en önemli kontrol parametrelerini oluşturmaktadır. Nem miktarı, su aktivitesi ve sıcaklık ürün içindeki faz geçişlerini belirlemektedir, bu ise büyük ölçüde ürünün fiziksel özellikleri ve fizyokimyasal değişimleri etkilemektedir [31]. Şekil 2.7 de nem absorpsiyonu ve buna bağlı ürün çapındaki bu değişimi görmek mümkün olmaktadır.



Şekil 2.7 Muhtelif su emdirme zamanlarında nem miktarı ve yarıçap değişimi

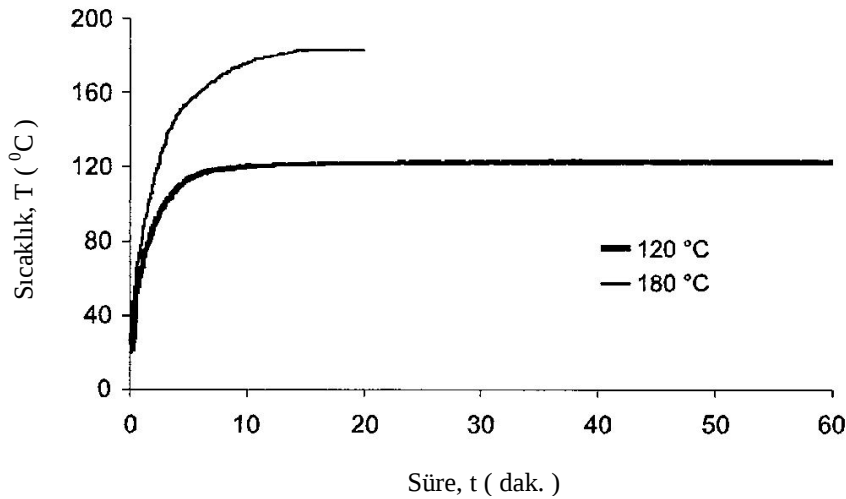
Düşük nem içeriğine sahip ürünlerde belirli bir kritik nem miktarının aşılmasıyla ürün yapısında gevreklik ve ağızda dağılıbilirlik husule gelmektedir. Bu açıdan incelendiğinde, fındık tipik bir düşük nem oranlı ürün sınıfına girmektedir, ayrıca bu tip ürünlerde, ürün stabilitesi artan nem miktarları ile azalma göstermektedir. Fındığın nem alması (hidration) esnasında su miktarı artışı % 60 a kadar hızlı bir biçimde olmaktadır, bundan sonra ise kayda değer bir artış tespit edilememektedir. [31].

2.5.1. Kavurma esnasında fındıktaki renk değişimi

Fındık kavurma amaçlarından biri de ürün yüzeyinde isteğe uygun bir renk oluşumuna vesile olmaktır. Bunlar koyuluk sırasıyla beyazlatma, altın sarısı renk, koyu kavrulmuş renk ve çok koyu kavrulmuş renk olarak sınıflandırılmaktadır [29].

Kavurma esnasındaki renk değişimi de sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonudur. Fındık kavurma parametrelerinin iki ekstrem durumu, yani 120 °C ve 180 °C sıcaklık için incelenmiştir[22]. Düşük sıcaklıktaki kavurma işlemi, toplam işlem süresinin büyük bir kısmında ürün sıcaklığı, kavurma havası sıcaklığına eşit olduğundan bir izotermik işlem olarak ele alınmaktadır. Bu tarzdaki bir kavurma işleminde, ürünün kalite ve renk değişimi de dolayısıyla izotermal bir süreçte hasıl olmaktadır. Diğer

yandan ekstrem yüksek sıcaklıktaki kavurma işlemi uygulama zamanı kısa olursa, kurutma havası sıcaklığı proses boyunca ürün sıcaklığından çok daha yüksek olmaktadır. Bu durumu şekil 2.8 den gözlemlemek mümkündür [25].



Şekil 2.8. Yüksek ve düşük sıcaklıkta kavurmada partikül sıcaklık değişimi

Farklı sıcaklıklardaki kavurma esnasında, ürün içinde sıcaklık farklılaşması vuku bulmaktadır [25]. Böylelikle her farklı proses boyunca aynı türden fındıklarda farklı tonlarda renk oluşumu kaçınılmaz olmaktadır.

Fındığın kavrulması esnasında oluşan renk değişimi esas itibarıyla enzimatik olmayan kavrulma (non-enzimatik browning) reaksiyonu ile ilişkili olarak gelişmektedir. Bu karmaşık reaksiyonlar zincirinin oluşumu, şeker karemalizasyonu, Maillard reaksiyonu ve absorbik asitlerin oksidasyonundan husule gelmektedir [1]..

Buradaki Maillard reaksiyonu inceltilmiş şekerlerin karbonil grupları ile amino asit veya proteinlerin serbest ve yüklenmemiş amino grupları arasında 1 mol suyun sarfolmasıyla oluşmaktadır [32]..

Enzimatik olmayan kavrulma (Non enzimatik browning) önemli miktarda amino asit kaybına yol açmaktadır ve protein hacimlerinin azalması nedeniyle, hücresel değerler üzerinde önemli bir etkinliğe sahiptir [33].

Kuru iç fındıkların kavrulma prosesi sıfırıncı dereceden kinetik prosesi olarak tanımlanmaktadır, reaksiyon sonucu ortaya çıkan değerler reaksiyon tekniğinde iyi bilinen Arrhenius tipi eşitlikle takip edilebilmektedir [33].

Kavurma işlemi sırasında fındıklardaki renk değişimi birincil olarak kavurma sıcaklığına bağlı olarak gelişmektedir. [33]. Sonuç olarak hem kavurma sıcaklığı ve hem de süresi ürün renk değişimine etki etmektedir ve yapılan incelemeler bu iki parametre üzerine kurulmaktadır.

Renk değişiminin kısa sürelerde olmasının istendiği durumlarda sabit yatak reaktörleri için 140 C den daha yüksek kavurma sıcaklıkları seçilmelidir. 120 C ve daha altındaki sıcaklıklarda yapılan kavurma işleminde, kavurma süresinin renk değişimine etkisi oldukça sınırlı olmaktadır [25].

2.5.2. Kavurma esnasında fındıkta tat değişimi

Ürünü ısıtma işlemi tabii tutmanın asıl amacı, ürünün tat değişimini geliştirerek istenilen özellikleri almasını sağlamak ve nihai olarak ürün toplam lezzetini artırmaktır. [3]. Bu amaçla fındık, fıstık, kahve ve kakao gibi birçok ürün kavurma işlemine tabii tutulmaktadır.

Üründeki başlıca lezzet oluşturan maddeler, serbest amino asitler ve mono sakaritler olmaktadır. Serbest amino asitler ve mono sakaritler ise polipeptitler ve kompleks karbonhidratların yapı bloklarını oluşturmaktadırlar. Amino asitler ve mono sakaritler, bu ayırık yapıdaki makro moleküllerden henüz net tanımı yapılmamış bir biçimde her bir kavurma prosesi özgün şartlarına bağlı olarak, hidroliz oluşumlarının bir neticesi olarak serbest kalmaktadırlar [3].

Amino asitler arasında aspartik asit, glutamik asit, glutamin, histidin, asparagin ve penilalaninler tipik birer tat verici işaretler olarak ortaya çıkmaktadırlar. Bu esnada sukrozlarda, glukoz ve fruktoza dönüşerek kavurma işlemi esnasındaki tat oluşumlarına iştirak etmektedirler [3].

Yüksek sıcaklığa maruz düşük nemli ürünlerdeki Maillard reaksiyonu sonucu oluşan çıktı ürünler arasında, özellikle pirazinler buharlaşmak suretiyle üründeki aroma ve kavrulmuşluk kokusunu veren etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır [2]. Bunlar daha ziyade yağ içinde absorbe olmuş durumdadır.

Aroma verici ürünlerin Maillard ve Strecker reaksiyonu sonucu ortaya çıkan birçok grubu bulunmaktadır ve bunlar karmaşık yapılara sahiptir. Bunlar aldehitler, pirazinler, şeker fragmanları vb olarak sayılabilirler. Çoğunlukla ürün içindeki amino asit kompozisyonlarına bağlanmış durumdadırlar [11] .

Üründeki kavurma esnasında amino asit miktarlarındaki değişimler, kendiliğinden, ısı etkisi altında, iç sıcaklık etkileriyle ve ürün içindeki nem miktarı etkisiyle hasıl olmaktadır [11].

Asparagine glutamine ve belirli poptidlerde, tat oluşumu reaksiyonlarına katılmaktadırlar, ancak 6 aylık depolama zamanlarından sonra kaybolmaktadırlar. [11].

2.5.3. Kavurma esnasında ürün yapısındaki değişimler

Fındıkta kavurma işlemi sonucunda vuku bulan yapısal değişimler hem ürün gevrekliğine ve hem de çıtır lezzete sahip olmasına vesile olmaktadır. Bu ise büyük ölçüde ürün mikro yapısındaki değişimlerle hasıl olmaktadır [7].

Ürün hücre duvarları hücrelerin şeklini ve dokuların yapısını belirlemektedir. Bu hücreler üç kısımdan oluşmaktadır. Sırasıyla selülöz, yarı selülöz özlü primer ve sekonder hücre duvarları ile her iki duvar arasında bulunan orta lamel veya iç selüler cisimlerden oluşmuşlardır. Bu orta lamel büyük ölçüde pektik bileşenden oluşmuştur ve hücreleri birleştirmektedir [34].

Hücreler bu orta lamel vasıtasıyla birbirlerine bağlı tutulmaktadır. Şayet bu hücreler dış bir kuvvetin tesiri altında kalırsa, hem hücreler orta lamel boyunca birbirinden

ayrılacak ve hem de orta lamelin sağlamlığına bağlı olarak hücreler kırılabilir. Ayrıca bazı protein maddeleri kavurma işlemine maruz kalmış hücrelerde toplanacaktır, bazıları da yağ ile bileşik oluşturacaklardır [7].

125 °C sıcaklık 1 m/s hız parametreleriyle yapılan 15 dakikalık kavurma süresi sonunda ürünün mikro yapısında, kavrulmamış fındığa nazaran çok az farklılık husule gelmektedir. Burada şişerek büyümüş protein maddelerinin dışında diğer tüm maddeler başlangıçtaki durumlarını korumaktadırlar. Bahsedilen protein maddelerinin büyümesi de hücre yapılarında bulunan su kütlelerinin absorpsiyonu nedeniyle ortaya çıkmaktadır.[3]. Yukarıda bahsedilen kavurma parametreleriyle ürüne tam kavurma özelliklerini vermeye yeterli bir termal şartları sağlayamadığı anlaşılmaktadır. Bu işlem sonundaki nem miktarıda % 3 e çok yakın bir değerde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca gevreklik ve çıtır lezzet özellikleri de son derece düşük olmaktadır [7].

145 C sıcaklık ve 2 m/s hava hızı ile yapılan 20 dakikalık kavurma işlemi sonunda ürün mikro yapısında öncekine göre daha fazla olmakla birlikte, yine de önemli değişiklikler hasıl olmamaktadır. Mevcut bu şartlar; orta kuvvette kavurma şartları olarak tanımlanmaktadır. Bu orta kuvvette kavurma esnasında hafif kavurma şartlarına göre, hücre içi yapıların hacimlerinde az miktarda bir büyüme gözlenmektedir. Ulaşılan son nem değerleri de % 1.5 mertebesinde olmaktadır. Ürün gevreklik ve çıtır lezzetinde orta düzeyde bir iyileşme elde edilebilmektedir [7].

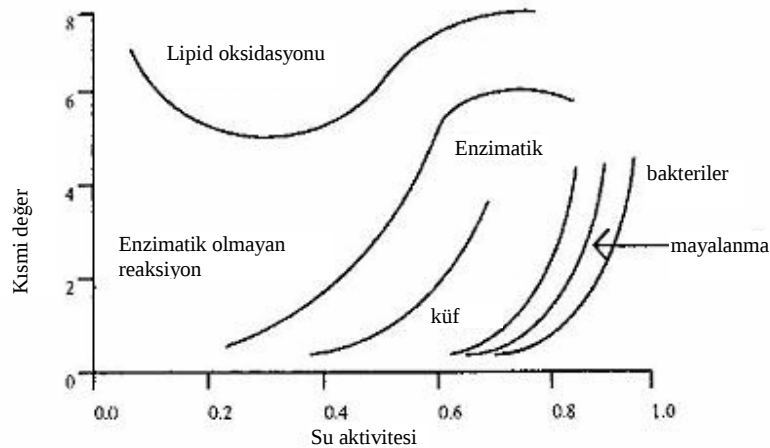
165 °C sıcaklık 1 m/s hava hızı parametreleriyle 25 dakikalık sürede yapılan kavurma işlemi sonucunda oldukça beğenilen bir ürün lezzetine ulaşılmaktadır. Ürün mikro yapılarında muntazam olmayan hücre yapılarının çoğaldığı, hücre yapılarının birbirine göre farklılaştığı, genişleyip uzatılmış ve sıkıştırılmış yapıların ortaya çıktığı gözlenmiştir. Burada orta lamel boyunca duvarların ayrılması da söz konusudur. Hücre içi yapılarında belirgin bir büyüme söz konusudur. Protein kısımları parçacıklı bir yapı arz etmektedir. Hücre içi yapılardaki bu hacimsel artışlardan dolayı ürünün gevrek ve çıtır lezzeti artmaktadır. Hücre duvar ayrışmaları da, ürünün mukavemetini azaltarak, ürünün ağızda kırılıp ezilmesini kolaylaştırmaktadır [7].

Ürün tadı lezzet yapısı nihai olarak hissi algılama vasıtasıyla tüketiciler tarafından tayin edilmektedir [11].

2.5.4. Kavurma işleminde lipid oksidasyonu

Yiyeceklerdeki oksidasyon reaksiyonu, üründe var olan metal mevcudiyetine bağlı olarak gelişmektedir. Bu metaller serbest radikaller için katalizör görevi yapmaktadır.

Muhtelif reaksiyonların hangi su aktivite değerlerinde oluştuğu ve gelişim eğrisi Lapuza [43] tarafından verilmiştir. Bu durum Şekil 2.9 da görülmektedir. Buradan anlaşıldığı gibi reaksiyon hızları su aktivitesine bağlı olarak değişmektedir. Düşük su aktivitesi değerlerinde serbest radikallerin mevcudiyeti ve hareket kabiliyeti sınırlı olduğundan lipid oksidasyonu oldukça yavaş hızlarla gelişmektedir [22].



Şekil 2.9. Su aktivitesi ve ürün stabilitesi ilişkisi

Yüksek su aktivite değerlerinde serbest radikal oluşumuna yol açan metal iyonlarının çözünmesi nedeniyle reaksiyon değerleri yükselmektedir. Lipid oksidasyonu reaksiyonunun önlenmesi için farklı metotlar önerilmektedir [23]. Bunlar sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.

1. Oksijen miktarının ve diffüzyonunun azaltılması
2. Muhtelif anti-oksidanların kullanımı
3. Sitrik asit ve fosforik asit gibi birlikte çalışan unsurların kullanımı
4. Malik asit ve sitrik asit gibi nem tutucu unsurların kullanımı

Kavurma işlemi çoğunlukla yüksek sıcaklıkta bir ısı işlem gerektirmektedir, bu ise ürünün yağ stabilitesini azaltmaktadır. Fındık diğer kalın kabuklu yemişlerin birçoğunda olduğu gibi % 50 den fazla yağ içermektedir. Türk fındığındaki yağ içeriğinin % 55- 66 arasında değiştiği bilinmektedir. Ayrıca bu ürünler doymamış yağ asitleride içerdiğinden lipid oksidasyonu nedeniyle, yağ küflenmesine çok hassastır. Bu ise beraberinde kötü tat ve kokunun ve fizyolojik aktif bileşenlerin veya toksiklerin oluşumuna yol açmaktadır. Fındık % 80–90 arasında doymamış yağ asidi içeriğine sahiptir. Fındık yağının % 80 ini oleik asit oluşturmaktadır. Linoleik asit ise % 10 unu oluşturmaktadır. Bu nedenlerle diğer kabuklu yemişler gibi fındıkta lipid oksidasyonuna hassas olmaktadır [11] .

Küflenmeyi serbest radikallerin varlığı, diğer bazı etkenlere de bağlı olarak, doğurmaktadır. Küflenme oksidatif ve hidrolitik küflenme ile başlamaktadır. Bu durum ise yağ asitleri hiper oksitlerinin oluşumuna yol açmaktadır. Oksidatif küflenme oksijenin mevcut olduğu ortamlarda oluşmaktadır, bunlar ya metal iyonları katalizleri veya enzim başlangıçlı oksidatif fakirleştirme yoluyla vuku bulmaktadır. [29].

Fındık içindeki birçok küf maddelerinin oluşumu oleik asit ve linoleik asit oto oksidasyonu yoluyla hasıl olmaktadır [12]. Ürün yapısında bulunan lipaslar, enteraslar, lipoksijenler ve peroksidalar, enzim katalitik lipid oksidasyon reaksiyonuna ihtiyaç duymaktadırlar. Lipaslar ve erteraslar lipidlerdeki yağ asitlerinden ayrılmakta ve serbest yağ asitlerini oluşturmaktadırlar. Bu oluşan serbest yağ asitleri de etkilenmek suretiyle, oksidasyon reaksiyonlarının bir neticesi biçiminde mayalanarak küflenebilmektedirler [37].

Lipaslar ve esteraslar oksijen bağımlı enzimlerdir. Ancak bunlardan lipid aktivitesi ürün ve bulunduğu ortamdaki nem miktarına bağlıdır. İç fındıkların olgunlukları ve depolanma esnasındaki bekleme süresi, ortamın klima koşullarıyla birlikte ürünlerdeki lipid miktarına etki etmektedir. Esteraslar ısıya duyarsızdır ve kavurma işleminden sonrada aktif olmaktadır.[60]. Kavurma işlemi lipid aktivitesini azaltırken peroksidasyonunu kolaylaştırmaktadır [38] .

Oksidasyonla oluşan hidroperoksit olarak adlandırılan ürünler aktif oksidan ürünlerdir. Oda sıcaklığındaki depolanma esnasında diğer bileşenlerle reaksiyona girme eğilimindedirler. Bu şekilde oluşabilen ara bileşenler ürüne küfe benzer bir tat verebilmektedirler [2] .

Fakirleştirilmiş reaksiyon ürünleri ve peroksit ile lipid içermeyen radikaller, vitaminler, amino asitler ve proteinler reaksiyona girmektedirler. Bu ise ürün tadında bozulmalara yol açmaktadır ve benzer biçimde ürünün besin değerini de düşürmektedir. Isı ve sıcaklık artışı proteinlerin doğal yapısını da bozmaktadır. Ancak bunun yanında lipid, protein bileşimlerinin ayrışmalarına da yol açmaktadır. Bu nedenle düzgün bir biçimde paketlenmemiş kavrulmuş fındıklar lipid peroksidasyonuna maruz kalmaktadırlar [37].

Sıcaklık, su aktivitesi, oksijen miktarı, bağıl nem, metal mevcudiyeti, anti oksidanların varlığı ve enzimatik aktivite değeri lipid oksidasyonu miktarını etkilemektedir [37].

Lipid oksidasyonunun aktivasyon enerjisi, kavurma işlemindeki en etkin reaksiyon olan enzimatik olmayan kavrulmaya (non enzimatik browning) göre daha düşük olduğundan işlem esnasında aktive olamamaktadır. Ancak değişecek olan ortam koşullarında çok hızlı bir biçimde aktive olabilmesi de mümkün olmaktadır. Su aktivitesi kuru gıdalardaki lipid oksidasyonunun en önemli nedenlerinden biridir. Yüksek yağ içeren ürünlerde çok düşük nem oranlarında dahi ortaya çıkmaktadır [32].

Serbest yağ aktivitesi ürün tadı bakımından bulunması istenmeyen maddelerdendir. Bu değer % 0.5 –0.7 nin üzerinde ise ürün bozulmuş olarak değerlendirilmektedir. [37].

Su aktivite değerlerinin 0.3 ün altında ve 0.5 in üzerinde olduğu durumlarda lipid oksidasyonu değerleri yüksek çıkmaktadır. Üründeki peroksit değeri de iyi ürün kalitesi için bir gösterge olmaktadır. Muhtelif ürünler için değişmekle birlikte 1,4mg/kg lık değer in altındaki ürünler kaliteli ürün olarak nitelendirilmektedir. [11]

Kavurma sıcaklığı, zamanı ve kavurma fırınından fındığın çıkış sıcaklığı paketlenme ve depolanma şartları ile birlikte ürünün raf ömrünü etkilemektedir. Kavurma sıcaklığının 150 °C yi aşmaması ve fındığın kavurma ortamından çıkıştaki ortam sıcaklığının 20 °C civarında olması önerilmektedir [39].

2.6. Kurutmanın Amacı

Yiyeceklerde mevcut bulunan nemin büyük bir kısmının, ürüne ısı uygulanması suretiyle ve buharlaştırma yoluyla üründen uzaklaştırılmasına kurutma denir. Teknik anlamda ise bir katının bünyesinde bulunan nemin, bir gaz akımı içinde buharlaştırılarak gaza geçirilmek suretiyle alınmasına kurutma denir.[40].

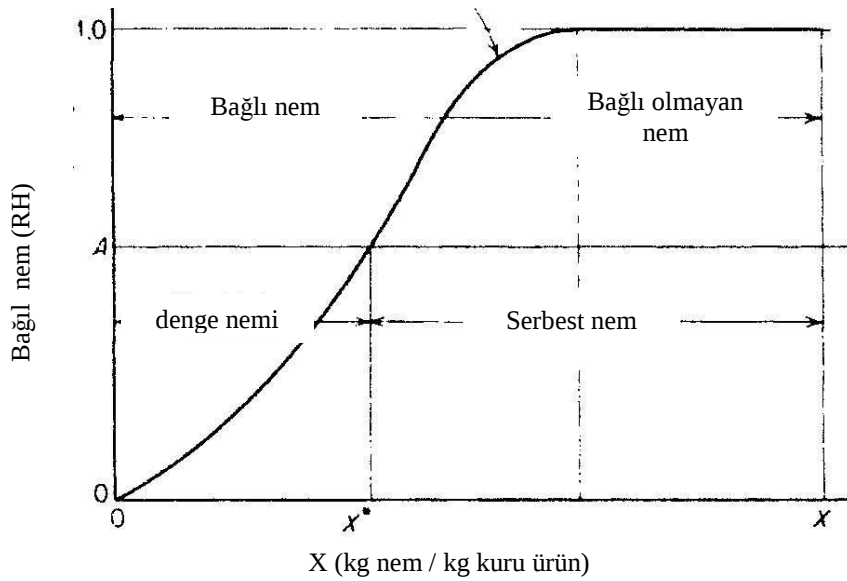
Gıda maddelerine uygulanan kurutmanın birçok amacı vardır. Bunların arasında en belirleyici olanı uzun sürecek depolama ihtiyaçlarında, ürünün bozulmasını önlemektir. Yani ürünün raf ömrünü uzatmaktır. Kurutma işlemi bu amacı, ürünün nemini, ürün içindeki mikrobiyotik gelişmeyi ve/veya diğer bozucu reaksiyonları arzu edilen süre boyunca sınırlamaya yetecek kadar düşürmek suretiyle sağlamaktadır. Bu esnada aroma, ürün lezzeti ve besin değeri gibi öğelerin korunması da kısmen sağlanmaktadır. Kurutma işleminin diğer bir amacı ise gıda maddelerinin taşınması ve depolanmasında ağırlık ve hacim düşmesi nedeniyle, maliyetlerin azaltılması ve verimliliğin artırılması olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu duruma örnek olarak Brezilya daki çok geniş portakal bahçelerinde hasat edilen ürünlerin, yalnızca pulp kısımlarının vakumlu kurutma suretiyle alınması gösterilebilir, böylece su içeriği kısmının alınmayarak Batı Avrupa ülkelerine

nakliyesinde çok büyük avantajlar sağladığı bilinmektedir. Diğer amaçlara nazaran daha az karşılaşılmakla birlikte kullanımı kolay bir ürün elde edilmesine yönelik de kurutma yapılmaktadır.[22].

Aynı zamanda kurutulmuş gıdaların işlenilebilme özellikleri, taze ve kurutulmamış gıdalara göre daha yüksektir [41].

2.7. Gıdalardaki Su Miktarı ve Yapısal Bulunuş Biçimleri

Gıda maddelerinin kurutulmasında en önemli konulardan birisi gıda maddesi içindeki suyun rolüdür. Gıda maddesi içindeki nemin yapısal bağ türlerine göre bulunuş biçimleri Şekil 3.1 de görülmektedir [42].



Şekil 2.10. Ürün içindeki nemin yapısal farklı bulunuş biçimleri

Su aktivitesinin değerine göre suyun ürün içindeki bulunuş biçimleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır [22].

- 1.Çok kuvvetli bağlı nem (Su aktivitesi < 0.3)
- 2.Normal ölçülerde bağlı nem (0.3 < Su aktivitesi < 0.7)

3.Gevşek bağlı nem (Su aktivitesi > 0.7)

4.Serbest nem (Su aktivitesi $= 1$)

Organik ve kimyasal olarak tesirsiz maddelerdeki nem adsorpsiyonu henüz tamamen anlaşılamamış komplike bir konudur. Bu karmaşıklık biyolojik materyaller için içine girdiğinde daha da artmaktadır. Bu karmaşıklık üründe bulunan suyun yapısal olarak farklı bulunuş biçimlerinden kaynaklanmaktadır, bu bulunuş biçimleri aşağıda sınıflandırılmıştır [22].

2.7.1. Bileşik halindeki su

Bu biçimdeki su ürün bileşenlerine kimyasal olarak bağlı durumdadır. Çoğu durumlarda nem miktarı belirlemelerinde göz önüne alınmamaktadır. Ürünün bütünleyici bir parçası olarak görülmektedir.

2.7.2. Bağlı su

Bu biçimdeki su herhangi bir şekilde ürüne bağlı değildir. Saf suyun buhar basıncından daha düşük bir buhar basıncına sahiptir. Kapillar etkiler ve hidrojen köprüleri vasıtasıyla ve Van der Waals kuvvetleri, iyonik ve polar bağlar tarafından erimiş maddelere bağlı olarak bulunabilirler. Bu yapı tarzındaki su, yüzeye bağlanmış su moleküllerinin birinci tabakası olarak düşünülmektedir.

2.7.3. Serbest nem

Saf suyun buhar basıncına eşit buhar basıncına sahip küçük kuvvetler vasıtasıyla ürün yapısına bağlı olan nem anlaşılmaktadır. Bu biçimdeki nem serbest su olarak, oyuklar ve geniş kılcal damarlar içinde bulunabilir. Bu tipteki nem ikinci ve daha sonra gelen yüzeye yapışmış bir nem tabakası olarak düşünülebilir.

2.7.4.. Adsorbe olmuş nem

Bu biçimdeki nem hücre duvarlarının içine girmiş ve hücre duvarlarının cylo plasmasına yerleşmiş ve yapışmış durumdadır. Bu formdaki su sorpsiyon ve desorpsiyon denge nem miktarı izotermi arasındaki histeresis farklılıkları olarak anlaşılmaktadır.

2.8. Gıda Kurutma Prosesi ve Temel İlkeleri

Termik kurutma prosesinde üründen uzaklaştırılan nemin hem kaynama sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda ve hem de kaynama sıcaklıklarında buharlaşması söz konusudur. Bu proses yüksek bir enerji sarfiyatını da beraberinde getireceğinden oldukça dikkatli incelenip, hassas uygulama koşulları geliştirmek gerekli olmaktadır. Termik kurutma prosesleri üç ana alt prosesten oluşmaktadır [43].

- 1.Nemli ürünün çevresinden ürüne yapılan ısı transferi
- 2.Ürün içindeki sıvı halde bulunan nemin faz değişimiyle buhar haline gelmesi
- 3.Buhar haline gelerek ürünü terk eden nemin üründen sürüklenerek uzaklaştırılması

Isı transferi şekline göre kurutucular konvektif(taşınımlı), ısıtıcı ile direkt yüzey temaslı (iletimli) ve ışınlı kurutucular olarak sınıflandırılmaktadırlar. Kurutma proseslerinin birçoğunda ısı transferinin birden fazla çeşidi etkin olmaktadır. Bu durumda hesaplamaların toplam ısı transferi üzerinden yapılması gerekecektir. Ürünü buhar haline gelerek terk eden nemin uzaklaştırılması, çoğunlukla çevre havasına diffüzyon yoluyla veya vakumlu kurutmada olduğu gibi buhar akışı şeklinde gerçekleşmektedir. [43].

Kurutma prosesini belirleyen fiziksel olguların tümü, birbirine bağlantılı olarak vuku bulmaktadır. Bu alt prosesleri iki farklı kısımda sınıflandırmak mümkündür.

- 1.Ürün içindeki transfer prosesleri
- 2.Kurutma prosesinin dış sınır şartları

Kurutma için gerekli olan enerji, ürün yüzeyinden ürün içine doğru ısı iletimi yoluyla verilecektir. Katı ürünün ısı iletkenliği burada önemli olmaktadır. Katı ürünlerin ısı iletkenlikleri nemliliklerine orantılı olarak değişmektedir ve nem azaldıkça ısı iletkenlikte azalmaktadır. Ürün içindeki ısı iletim potansiyeli, katı ürün içindeki sıcaklık farklılığı olmaktadır.

Ürünün içinden, ürün yüzeyine doğru oluşan sıvı haldeki nem hareketi nem iletimi yoluyla olmaktadır. Ürünün nem iletkenliği de aynı şekilde ürün nem içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Nem iletkenliği de nem miktarının azalması ile kötüleşmektedir. Ayrıca katı maddenin yapısal özellikleri de nem iletkenliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Katı içindeki nem transferine yol ačan faktör akışkan içindeki kılcal basınçlar olmaktadır. Kılcal basınçlar azalan gözenek çapları ve azalan ürün nem miktarı ile kuvvetli bir biçimde artma eğilimi göstermektedir.

Buhar fazındaki nemin transferi buhar diffüzyonu yoluyla olmaktadır. Bu buhar diffüzyonunu etkileyen unsur hava içindeki su buharının ikil (binaere) diffüzyon katsayısı ve katı maddenin diffüzyon direnci olmaktadır. Katı ürünün diffüzyon katsayısı nem miktarına bağlı olarak değişmekte ve çoğunlukla azalan nem miktarıyla oldukça kuvvetli bir biçimde düşmektedir. Buhar diffüzyonu için gerekli oluşum potansiyeli kısmi buhar basınçları farkıyla oluşmaktadır.

Kurutma prosesini etkileyen dış şartların biri, kurutma havasından veya gazından, kurutulan maddeye olan ısı transferinin biçimi olmaktadır. Bu daha önce söz edildiği gibi taşınımlı, iletimli, ışınlı veya bunların kombinasyonları biçiminde hasıl olabilmektedir. Dış şartların diğeri ise üründen çevreye olan kütle transferidir. Bu kütle transferi ya inert gaz içindeki diffüzyon yoluyla yada basınç farklarından dolayı oluşan kütle akımı yoluyla olmaktadır.

Konvektif kurutma şartları için düşünülürse kurutma prosesini belirleyen etkenler Nusselt sayısı ve Sherwood sayısı, dolayısıyla toplam ısı transfer katsayısı ve toplam kütle transfer katsayısı olmaktadır [43].

Kurutma işlemi esnasında kurutucu gazdan ısı transferi yoluyla gelen ısı, katı ürünün gözeneklerindeki nemin buharlaşmasına harcanmaktadır. Bu yöntem kısaca ısı kurutma olarak adlandırılmaktadır. Bunu gerçekleştirme amacına yönelik olarak sistem dizayn edebilmek için, bu karmaşık ısı ve kütle transferi olaylarının iyi anlaşılması gerekmektedir.

Isıtıcı ortam ve metadan ürün nemi buharlaşmasının olduğu noktalara ısı transferi söz konusudur. Bu transfer olan ısı üründe bulunan nemin buharlaşmasına neden olacaktır. Aynı zamanda bu nem, ürün dokusundaki yolları geçerek ürün yüzeyine ve buradan da ürünün bulunduğu ortama yani çoğunlukla olduğu gibi kurutucu havaya nakledilecektir. Yani kurutma işlemi akışkanlar mekaniği konusunu da kapsamaktadır. Bazı durumlarda sıvı haldeki ürün neminin de ürün dokusu içinde taşınması gerekecektir. Gıda maddelerinin değişik ve kompleks yapılarından dolayı, incelenen her gıda maddesine özgün koşullar iyi bilinmeli ve proses bunlara göre, uygun bir biçimde tatbik edilmelidir.

Kurutucu meta yani çoğunlukla havadan gelen ısı, katı ürünün gözeneklerinde bulunan nemin buharlaşmasına yol açtığından ve buharlaşan bu nemin de kurutma havası yoluyla alınıp atılması söz konusu olduğundan, kurutma proseslerinde ısı ve kütle transferi birlikte gerçekleşmektedir.

Söz konusu ısı ve kütle transferleri incelenirken, ürün yapısındaki nemin katı yüzeyine gelmesi sürecinde, hem kılcallık ve iç diffüzyon gibi iç koşullar ve hem de kurutucu gaz olan havanın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış koşullar ele alınmaktadır. [40].

Ürün nemini azaltmak suretiyle su aktivitesi düşürülmektedir, böylece ürün içinde bakteri hareketliliği ve büyümesinin önüne geçilmektedir. Ancak bu işlemin uygun parametrelerle yapılmaması durumunda, ürün tadı ve besin değerinde istenmeyen değişimlere yol açılabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle kurutma tekniği ile uğraşan bilim adamları ve teknik elemanların ürün besin değeri ve lezzetinde olumsuz değişimlere yol açmayacak parametreleri ve şartları tespit edip uygulamak, en önemli uğraşlarından biri olmuştur.

Endüstride yoğun olarak kurutma işlemine tabii tutulan ürünler şeker, kahve, süt, kabuklu yemişler, patates, fasulye, bezelye ve mısır olarak sıralanmaktadır [41] .

2.9. Gözenekli Ürün İçindeki Nem Hareketi

Gıdalarda ve kurutulan ürünlerdeki nem hareketi üç farklı biçimde cereyan etmektedir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır [44].

- 1.Kılcal ve yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle olan sıvı hareketi
- 2.Hava ile dolu ürün gözeneklerinde kısmi buhar basıncı farkıyla oluşan buhar hareketi
- 3.Yoğuşan fazdaki diffüzyon

2.9.1. Kılcal kuvvetler ve yüzey gerilim kuvvetleri nedeniyle oluşan sıvı hareketi

Ürünün kılcal damarları içindeki su, cidar çekim kuvvetleri ve yüzey gerilim kuvvetlerinden ötürü iç bükey ve yaklaşık yarı küre formunda bir şekle haiz olacaktır. Bu çekim kuvvetleri nedeniyle su ürün içinde kılcal damarlarda yükselecektir. . Kneule' [40] ye göre bir üründe kılcal boşluk yarıçapı aynı olması durumunda her bir kılcal damarlar içinde aynı yükseklikte su seviyesi oluşması gerekecektir. Ancak gözenekli ve nemli bir ürün farklı çap veya genişlikte kılcal boşluklara sahip olduğundan, kılcal çekim kuvvetleri de kılcal boşluk genişliklerine bağlı olarak değişecektir. Bu boşluk yarıçapı azaldıkça kılcal çekim kuvvetleri artacaktır ve daha dar kılcal boşlukta su seviyesi geniş olanlara nazaran daha yüksek olacaktır. Ürünün tamamı düşünüldüğünde bu kılcal boşluklar birbiri ile bağlantılı olmaktadır. Dolayısıyla dar olan boşluklar daha geniş olan boşluklardan su emeceklerdir. Kılcal boşluklar arası nem hareketi de böylece kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle kılcal boşluklardaki kılcal kuvvetler nedeniyle oluşan vakum basıncının bir kısmı suyun hareketi esnasında cidar sürtünmeleri nedeniyle kaybolacaktır

Farklı kılcal yarıçaptaki boşluklara haiz gözenekli bir üründe bu kılcal boşluklar karşılıklı olarak birbirini etkileyeceğinden hesapsal olarak belirlenebilen bir

maksimum su yükseltisinden artık söz edilemeyecektir. Ayrıca kılcal boşluklar tam silindirik kesite haiz olmadığından ve damar boyunca kesitleri de değiştiğinden formülasyon ile belirlemek son derece zor olmaktadır.

Bundan başka kağıt gibi çok ince gözeneklere haiz ürünlerde, nem gözenek yüzeylerinde adsorbe olmuş durumdadır. Bu tip ürünlerde yüzey gerilimlerinden kaynaklanan diffüzyon da hasıl olmaktadır.

2.9.2. Buhar fazındaki nem hareketi

Gözenekli bir ürünlerdeki buhar fazındaki nem hareketi de üç farklı biçimde cereyan etmektedir [40]. Bunlar aşağıda gösterilecektir. Bu buhar hareketlerinin tümü için borularda akış prensibi geçerli olmaktadır.

2.9.2.1. Moleküler buhar hareketi

Şayet ürün içindeki gözenek yarıçapları nem moleküllerinin kat edeceği yol uzunluğuna kıyasla küçük kalıyorsa, bu tip durumlarda Knudsen moleküler hareketi söz konusu olmaktadır.

2.9.2.2. Buhar diffüzyonu

Gözenekli ürünlerdeki gözenek genişlikleri buhar moleküllerinin ürün içinde kat edeceği yol uzunluğundan büyük olursa Stefan'ın buhar diffüzyonu kanunları geçerli olmaktadır [44] .

2.9.2.3 Laminer buhar akışı

Akışkanın ilgili basınçtaki kaynama noktasına yakın sıcaklıklara haiz ürünlerde ise diffüzyon, laminer buhar akışı biçimine dönüşmektedir. Bu durumda Hagen-Poiseuille kanunları geçerli olmaktadır.

2.9.3 Yoğuşan fazdaki diffüzyon

Şayet nem katı ürün içinde moleküler bazda dağılmışsa katı kısım ile nem arasındaki makroskopik sınır yüzeyleri ortadan kalkacaktır. Böylece toplam sistem bir eriyik (çözelti) karakterine haiz olacaktır. Sistemin higroskopik davranımı homojen karışımların termodinamiği vasıtasıyla tanımlanabilecektir [44]. Bu tip yoğuşan fazlı diffüzyon prosesleri plastik türü maddelerin kurutulmasında da ortaya çıkmaktadır. Burada Ficks'in diffüzyon kanunları geçerli olmaktadır.

2.9.4. Migration

Ürünü oluşturan maddelerin ürün içinde yer değişimi (migrasyon): kılcal gözenekli ürünlerin kurutulmasında, başlangıçta ürün içinde muntazam olarak dağılmış bazı maddelerin kurutma süreci esnasında, yer değişimi ve bazı noktalara yığılma suretiyle muntazam dağılımlarının bozularak; homojen olmayan bir ürün içi dağılımına dönüşmesi olarak tanımlanmaktadır [44]. Bu durum yalnızca sıvı fazda mümkün olmaktadır ve gıdalarda bazı bölgelerde renk yığılması ve renk homojensizliği gibi istenmeyen oluşumlara neden olabilmektedir.

2.10. Termik Kurutma ve Kurutucuların Sınıflandırılması

Kurutucuların komple bir sınıflandırılması yapılmak istenirse, yapım tarzı farklılıklarına göre 500 ün üzerinde bir kurutucu tipi karşımıza çıkmaktadır. Ancak ısı transfer tarzlarına göre bir sıralama aşağıda yapılmıştır [45].

2.10.1.Konvektif tip kurutucular

Bu tip kurutucularda kurutma için gerekli enerjinin büyük bir kısmı sıcak bir gaz ile, kurutulacak ürünün teması neticesinde, ısı sıcak gazdan ürüne verilmektedir. Akışkan yatak tipi kurutucularda bu sınıfa dahil olmaktadır.

2.10.2.Kontakt tip kurutucular

Kontakt tip kurutucular da, üründen nem alınması için gerekli olan ısı sevkiyatı, ürünün sıcak ısıtma yüzeyleri ile teması yoluyla ve ısı iletimi biçiminde olmaktadır.

2.10.3 Işınımlı kurutucular

Bu tip kurutucularda ürünün kurutulması için gerekli olan enerji büyük ölçüde, tanımlanmış belirli bir frekansa, yani infrarot, yüksek frekanslı ,mikrodalga vb. muhtelif frekans ve dalga boyundaki ışıma, ürünün maruz bırakılması ile verilmektedir.

2.10.4.Akışkan yatak tipi kurutucular

Akışkan yatak tipi kurutucularda, nemli ürün, dikey olarak yukarıya yönlendirilmiş sıcak hava ile turbülans oluşacak biçimde karıştırılmakta ve bu esnada yüksek ısı ve kütle transfer katsayılarına ulaşmak suretiyle kurutulmaktadır. Bu esnada gerekli olan gaz hızı önemli ölçüde ürünün partikül büyüklüğü ve yoğunluğuyla bağlı olarak değişmektedir. Akışkan yataklarda, delikli perfore sac veya benzer materyallerle ızgara biçimine getirilmiş, ürünün aşağı düşmesini engelleyen ve sıcak havanın ürün üstüne üflenmesine müsaade eden bir sistem oluşturulmaktadır. Akışkan yataklarda ısı transferi, ya yoğunlukla olduğu gibi yalnızca kurutucu gaz, yani hava vasıtasıyla veya da kurutucu gazın yanı sıra yatak cidarında boru demeti veya ısıtıcı plate vasıtasıyla yapılabilmektedir. Endüstride akışkan yatak tipi kurutucular hem sürekli (continuous) tip ve hem de duraklamalı (batch) tipi olarak çalıştırılmaktadır. Büyük tip kurutucular yatak ayırma duvarları ile bölünmüş olarak kullanılabilmektedir, böylece bir bölümde ürün soğutulup boşaltılırken diğer kısımda sistem durmaksızın çalışabilme, mümkün olmaktadır [45].

2.11. Kurutma ve Nem Alma Metotları

Nem alma proseslerinin tümünde ürünlerde fiziksel ve yapısal değişimler ortaya çıkmaktadır. Kurutma prosesinin tarzı bu özellik değişimlerinde farklı etkiler ortaya

çıkarmaktadır. Bu nedenle ürüne uygun kurutma metodu seçmek son derece önemli olmaktadır. Kurutma metotları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- 1.Konveksiyonlu kurutma
- 2.Dondurarak kurutma
- 3.Püskürtmeli kurutma /Spray Drying)
- 4.Akışkan yatak ile kurutma
- 5.Güneş ışınlardan faydalanarak kurutma
- 6.Döner tamburlarda kurutma
- 7.Vakumlu kurutma
- 8.Osmotik kurutma

2.12. Kurutma Proseslerinin Ürün Üzerine Yapmış Olduğu Etkiler

Kurutma prosesinin ürün üzerinde yapmış olduğu en önemli değişimler aşağıda sıralanmıştır.

- 1.Ürün hücre yapılarının büzülmesi
- 2.Ürünün yeniden nem alabilme yeteneğinin azalması
- 3.Ürünün ıslanabilme yani su tutma özelliğinin kötüleşmesi
- 4.Katı kısımların migrasyonu
- 5.Ürün yüzeyindeki sertleşmeler
- 6.Ürüne aroma veren bileşenlerin kaybolması

2.13. Kurutma Tekniğinde Kullanılan Bazı Önemli Kavramlar

Nemli ürün kütlesini baz alarak bulunan nem miktarı, ıslak bazlı nem miktarı olarak adlandırılmaktadır. Kuru ürün kütlesini baz alarak bulunan nem miktarı ise kuru bazlı nem miktarı olarak tanımlanmaktadır. Ürün ile bulunduğu ortam arasında nem dengesi oluşmuş ise ürün içindeki nem miktarı denge nemi olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir ürünlerdeki bağlı nem ise aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncından daha az bir denge buhar basıncına haiz olması durumunu tanımlamaktadır. Bağlı olmayan nem ise herhangi bir üründe oluşan denge buhar basıncının aynı sıcaklıktaki

saf suyun buhar basıncına eşit olması durumu için tanımlanmaktadır. Herhangi bir ürünlerdeki serbest nem ise denge neminden daha fazla olan nem kısmı olarak tanımlanmaktadır.

Gıda maddeleri içindeki serbest veya bağlı olmayan nem yiyecek içinde saf su gibi davranıma haizdir. Bağlı olmayan nem, şayet ürün yapısının kurutma prosesi üzerine önemli bir etkisi yok ise, sabit kuruma hızına haiz birinci kurutma peryodunda üründen rahatlıkla çekilebilmektedir [22].

Bağlı su, saf suya kıyasla daha düşük buhar basıncına haiz ve daha düşük hareket kabiliyeti olan ve büyük ölçüde azaltılmış donma noktasına sahip olan su olarak tanımlanmaktadır [46] .

Bağlı su molekülleri genel olarak saf su moleküllerine kıyasla daha farklı termodinamik ve kinetik özellikler göstermektedir [22] .

Gıda maddesi içindeki nem ile diğer kimyasal bileşenler arasında yapısal ilişkiler mevcuttur. Bunlar ise ürünün sorpsiyon özelliklerine yansımaktadır. Bu yapısal ilişkileri Van den Berg [47] aşağıdaki gibi göstermiştir.

- 1.London – Van der Waals dispersiyon ilişkileri
- 2.Hidrojen bağları
- 3.Su iyonları ve ayrık gruplar arasındaki Kolomp kuvvetleri
- 4.Sterik etkiler
- 5.Dissolüsyon etkileri
- 6.Polimer segmentlerin hareket kabiliyeti değişimleri
- 7.Kapillar kuvvetler

2.14. Kurutma Şartlarının Ürün Özelliklerine ve Oluşan Değerlere Etkisi

Kurutucu havanın debisi, sıcaklığı ve bağıl nemi kurutma hızını direkt olarak etkilemektedir. Genel olarak söylemek gerekirse daha yüksek hava hızları, sıcaklığı ve daha düşük hava bağıl nemi kurutma hızını artırıcı etkiye sahiptir. Kurutma havası

sıcaklığının artışı havanın nem taşıma kapasitesini artırmakta ve psikometrik diyagramdan görülebileceği gibi bağıl nemini azaltmaktadır. Genel bilinen bir kural olarak söylemek gerekirse hava sıcaklığını 20°C arttırmak havanın nem taşıma kabiliyetini iki katına çıkarırken bağıl nemini yarıya indirmektedir [48].

Kurutma değerleri aynı zamanda kurutucu hava ile kurutulan ürün arasındaki nem miktarları farkına direkt olarak bağlıdır. Doğal olarak yüksek nemli ürünle düşük nemli hava arasında nem hareketi ve kütle transferi daha hızlı olacaktır. Diğer taraftan az nemli ürün ile nemli hava arasındaki nem hareketi çok daha yavaş olacak veya hiç vuku bulmayacaktır. Hatta ürünün havadan nem alarak nemlenmesi dahi söz konusu olabilecektir.

Kurutma havası debisi ve hava hızı kurutma değerlerini etkilemektedir. Kurutma havası üründen nemi almakta ve sürükleyerek taşımak suretiyle uzaklaştırmaktadır, dolayısıyla daha yüksek hava debileri, daha yüksek kurutma değerlerini sağlayabilmektedir. Kurutma reaktöründeki ürün derinliği arttıkça ürün içinden geçerken havanın kaybettiği statik basınç artacaktır. Bu ise değişmeyen fan şartlarında üflenmesi durumunda hava hızlarını düşürecektir.

Ürünlerin arasından hava sevk edildiğinde, hava üründen bir miktar nem alacak ve bu nem alışı havayı hafifçe soğutacaktır. Daha derin yüklenmiş ürün arasına hava gönderildiğinde hava sıcaklığı kademeli olarak düşecektir. Bunu takiben ürün ile hava arasında denge nemi oluşuncaya kadar hava sıcaklığı azalacaktır. Denge nemine ulaşıldıktan sonra hava ürün arasından herhangi bir kurutma etkisi yaratmadan geçecektir. Bu denge neminden daha yüksek nemli hava gönderilirse ürün havadan nem alacaktır [49].

Ayrıca ürün bozucu bir çok reaksiyon, su aktivitesinden etkilenmektedir. Belirli bazı eriyebilen maddelerin ürüne eklenilmesi suretiyle su aktivitesini azaltmakta mümkün olabilmektedir. Bu azaltımın miktarı Roalt kanunlarının kullanımı ile belirlemek mümkündür. Roalt yasası bir komponentin kısmi basıncının, bu komponentin buhar basıncıyla aynı komponentin mol miktarının çarpımına eşit olduğunu söylemektedir.

Ancak ürün sistematiikleri maalesef ideal olmadığından ve çoğu zaman çok konsantre ve iç içe olduklarından, su aktivitesinin azalım ve değişimini deneysel olarak bulmak gerekmektedir [41].

Su aktivitesini azaltan erir maddeler, Humektant lar olarak bilinmektedir. Buna örnek olarak tuz, şeker, gliserol ve sorbitol gibi polihidrik alkoller gösterilebilir. Ayrıca ürün bileşenleri, kısmi buhar basınçları ürün nem miktarı ile değişen higroskopik bileşenler ve kısmi buhar basıncı ürün nem miktarı ile değişmeyen higroskopik olmayan bileşenler olarak ikiye ayrılmaktadır.

Nem üründen uzaklaştırıldıkça ürün kuruyacak ve su aktivitesi de azalacaktır. Su aktivitesinin azalması sonucunda oksidasyon ve serbest yağ asitleri oluşumu gibi kimyasal reaksiyonlarda azalacak veya yavaşlayacaktır [41].

Maillard reaksiyonu gibi birçok kimyasal reaksiyonlar için su aktivitesinin 0.4 ile 0.8 arasındaki değerlerinde reaksiyon değerleri azalmaya başlamadan önce bir miktar artacaktır,. Otooksidasyon ve benzeri diğer bazı reaksiyonların değerleri ise su aktivitesinin 0.2 değerine kadar azalmasıyla artacaktır. Bu esnada nem miktarları azalırken belirli bileşenlerin konsentrasyonları artacaktır. Bu durum ise kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonların artışına yol açabilecektir, bu ise ürün kalitesinde bir kötüleşmeye neden olabilecektir.

2.15. Denge Nem İzotermi

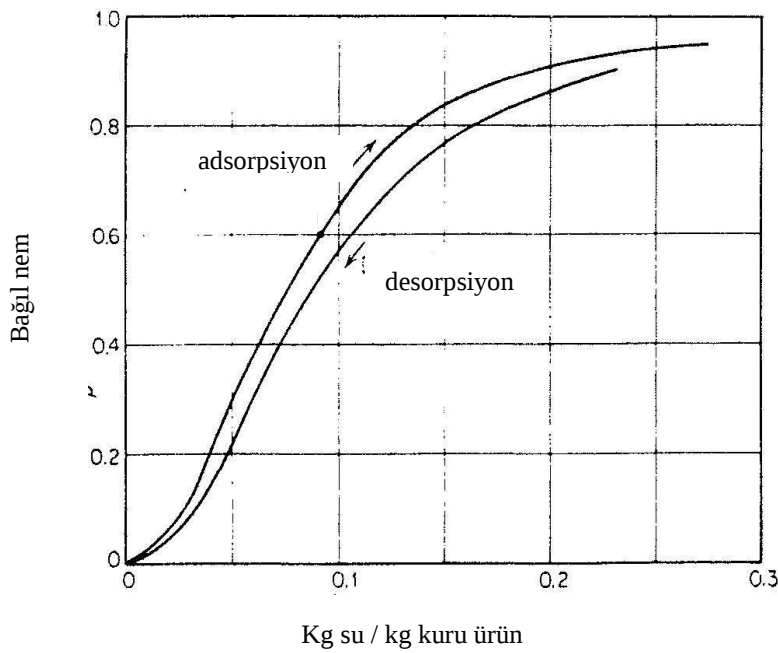
Sorpsiyon izotermi su aktivitesi veya ürünü çevreleyen havanın bağıl nemi ile sabit sıcaklıkta ve dengedeki ürünün nem miktarı arasındaki ilişki olarak ele alınmaktadır. Su aktivite değerlerinin 0.3 e kadar olduğu durumlarda, suyun kısmen daha yüksek enerjili polar uçlar tarafından tutulu olduğu varsayılmaktadır. Bu ise tek katmanlı su olarak adlandırılmaktadır [50].

Su aktivitesi (a_w) değeriinin 0.3 ile 0.7 arasında olduğu durumlarda çok katmanlı sudan bahsedilmektedir. Bu su katmanları birincil katmanda hidrojen bağları vasıtasıyla adsorbe olmuş durumdadır.(çok katmanlı bölge) Su aktivitesinin 0.7 den

daha büyük olduğu durumlarda üründe bulunan suyun kondense olmuş su durumuna ulaştığı kabul edilmektedir. Bu biçimdeki su kısmen serbesttir ve izotermi ise eriyik durumuna karşılık gelmektedir, aynı zamanda yüzey kılcal etkileri söz konusudur [50].

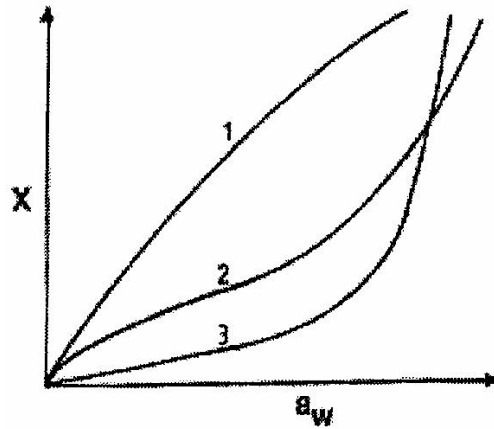
Ürünlerin desorpsiyon izotermi nemli numunelerin çevre havasıyla teması sonucunda, üründe nem azalması ve nihai olarak kafi süreler beklenilmesi durumunda kendisini çevreleyen havayla denge durumuna gelmesi ile elde edilmektedir. Aynı şekilde dengelenme prosesi kuru ürünle başlayıp ürünün çevresinden nem almasıyla sürecektir ve nihai olarak çevre havasıyla dengeye gelmesi neticesinde adsorpsiyon izotermi elde edilecektir. Prosesin adsorpsiyonmu desorpsiyonmu olmasına bağlı olarak, herhangi belirli bir su aktivite değerinde ürünün içerdiği nem miktarı farklı olacaktır.

Ürün nem miktarındaki adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri arasındaki bu farklılığa histeresiz adı verilmektedir. Şekil 4.1 de sülfite pulpu için bu durumu gözlemek mümkündür [42].



Şekil 2.11. Sülfite pulpunun denge su miktarı ve histeresiz etkisi

Histeresiz çoğu higroskopik ürünlerde gözlenmektedir. [52] Histeresiz etkisinin gıdalarda artan sıcaklıklar ile azalma eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır. [6] Şekil 4.2 de sorpsiyon izoterminin yüksek higroskopik (1 nolu eğri), orta higroskopik (2 nolu eğri) ve düşük higroskopik(3 nolu eğri) üç farklı ürün grubu için gelişim eğrisini görmek mümkündür [50].



Şekil 2.12. Higroskopitesi farklı ürünlerde denge nem eğrisi değişimleri

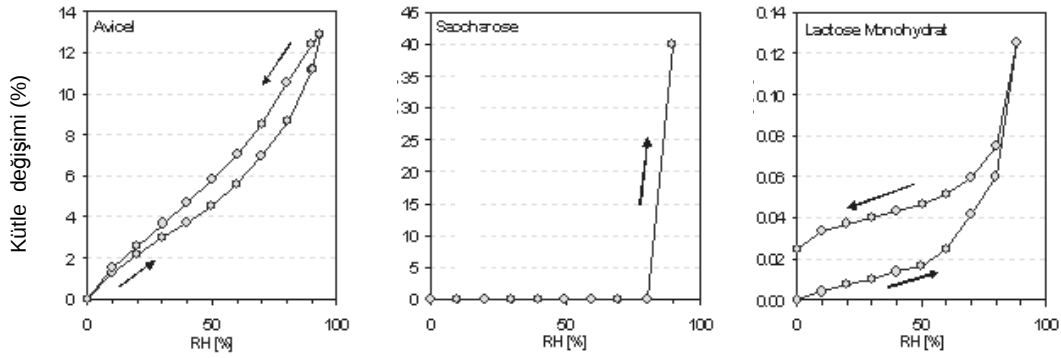
Kurutma prosesinde ulaşılabilecek en düşük nem ürünle kurutma havası arasındaki sorptif denge değeri ile belirlenmektedir.

Şayet bir ürün sabit sıcaklık ve bağıl nemdeki bir ortama konulursa ürün bu bulunduğu ortamla kafi uzunlukta bir süre sonunda dengeye gelecektir. Şayet ürün orijinal tazeliğinde ve dolayısıyla nemli ise atmosfere nem verecektir (ürünün solması). Diğer taraftan kurutulmuş ürün söz konusu ise bir süre sonra nem kazanacak ve yumuşayacaktır (ürünün nemlenip ıslanması). Bu durum ürün yeterince nem kazanıp içinde bakteri üreyecek konuma gelinceye kadar sürecektir.

Bu verilen bilgiler vasıtasıyla denge nem miktarının tanımlanması mümkün olmaktadır. Denge nem miktarı tanımlanmış bir zaman periyodu sonunda ve belirlenmiş çevre koşullarına maruz bırakılan bir materyalin nem miktarı olarak tanımlanmaktadır. Yani bu durumda ürün çevresi ile denge durumuna ulaşmıştır.

Toplam nem miktarı ve buna karşılık gelen sabit bir sıcaklıktaki değerler dizisi boyunca ürün ve su aktivitesi arasındaki ilişki grafiksel olarak belirtilirse o ürün için nem sorpsiyon izotermi elde edilmiş olacaktır.

Nem sorpsiyon izotermi 5 farklı tipte sınıflanmışlardır. Bunlar Tip I Longmair tipi, Tip II Sigmoid veya S formu adsorpsiyon izotermi olarak adlandırılmışlardır. Diğer tipler ayrı özel bir isim verilmemiştir. Tip II ve III Tip IV ve TipV ile yakın olarak ilişkilidir [22].



Şekil 2.13. Çeşitli kimyevi maddelerin sorpsiyon izotermi

Şekil 2.13 de muhtelif kimya sektöründe kullanılan maddelerin sorpsiyon izotermi gösterilmektedir. Buradan görülebileceği gibi sorpsiyon izotermi maddenin cinsine göre çok geniş oranlarda farklılaşım içerir [51].

Çoğu ürünün nem sorpsiyon izotermi lineer olmayan eğri biçimindedir. Genel olarak sigmoidal şekiller de hasıl olmakta ve Tip II izotermi sınıfına girmektedirler. Eriyebilen komponentler açısından zengin olan şeker gibi ürünler, Tip III davranımı göstermektedir. Bir başka genel gözleme göre ise adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri arasındaki farklı yollar izlendiği tespit edilmiştir ve bunun sonucunda histeresis ortaya çıkmaktadır [42].

Desorpsiyon izotermi adsorpsiyon izoterminden eğri üzerinde daha yukarıda noktalardan geçmektedir. Bu nedenle desorpsiyon prosesinde, adsorpsiyon prosesine kıyasla verilmiş bir bağıl nem değeri için üründe daha fazla nem bulunacaktır.

Sorpsiyon izotermi doğal olarak tipik bir sigmoid (S) biçimindedir. Kolaylık amacıyla bunlar üç bölgeden oluşmuş olarak düşünülebilir. Bağıl nem (RH) değeri % 0-20 arasında iken nem yapıya sımsıkı bağlı ve reaksiyonlar için elverişsiz durumdadır. RH değeri % 20-80 arasında ise nem yapıya gevşek bağlıdır. RH değerinin % 80 den büyük olduğu durumlarda ise nem kılcal yapı boşlukları içinde ve reaksiyonlar için elverişli durumda bulunmaktadır.

2.16. Histeresiz

Sorpsiyon izotermi belirlenmesinde ürünün kuru ve yaş olmasına bağlı olarak farklı sonuçlar ortaya çıkabilecektir. Başlangıç materyali kuru bir ürün ise ve nem alıyorsa diyagram adsorpsiyon izotermi gösterecektir. Başlangıçta ürün taze ve yaş ise ürün nem kaybına uğrayacaktır ve diyagram desorpsiyon izotermi gösterecektir. Çoğu gıda ürünlerinde belirli bir su aktivite değerine a_w ulaşıldığında desorpsiyonla ulaşılan ürün nem miktarı adsorpsiyonla ulaşıldığından daha yüksek olacaktır. Yani eğerde desorpsiyon izotermi adsorpsiyon izoteminden daha yüksek olacaktır.

2.17. Kurutma Mekanizması

Kurutma esnasında ürün yüzeyinden ve ürün iç bölgelerinden serbest nemin uzaklaştırılması söz konusudur. Nemli ve yaş bir ürün hava akımına maruz bırakıldığında, havadan ürün yüzeyine ısı geçecek ve ürün içindeki nem buharlaşarak üründen uzaklaşacaktır. Su buharı hava sınır tabakası içine yayılacak ve hareketli hava hüzmesi vasıtasıyla sürüklenmek suretiyle uzaklaştırılacaktır. Böylelikle nemli ürün iç kısımlarıyla kuru hava arasında bir su buhar basınç gradyanı oluşacaktır. Bu basınç gradyanı üründen nemin uzaklaştırılması için tahrik kuvveti oluşturacaktır. Suyun ürün içinden yüzeyine doğru hareketi aşağıda zikredilen biçimlerde hasıl olmaktadır [41].

- 1.Kapillar kuvvetler vasıtasıyla likit hareketi
- 2.Ürünün farklı bölgeleri içindeki erir madde konsantrasyonlarındaki farklılıklar nedeniyle oluşan likit diffüzyonu
- 3.Ürünün katı bileşenlerinin yüzeylerindeki tabakalarda adsorbe olmuş likit diffüzyonu
- 4.Buhar basınç gradyanı nedeniyle ürün içinde oluşan hava boşluklarından su buhar diffüzyonu

Farklı ürünlerin kuruma eğrileri geniş bir yelpazede değişecektir. Herhangi bir ürün kurutucu reaktör içine konulduğunda, ilk yerleşim peryodunda ürün yüzeyi yaş termometre sıcaklığına kadar ısınacaktır. Buradan itibaren kuruma başlayacaktır, yüzeyden buharlaşan miktar kadar su ürün içinden hareket ederek ürün yüzeyine ulaşabilecektir ve ürün yüzeyi ıslak kalacaktır. Bu peryoda sabit kurutma hızlı peryot denilmektedir. Sabit kurutma hızlı peryot belirli bir kritik nem miktarına düşünceye kadar devam edecektir.

Mamafih ürün sistemleri ürün yüzeylerindeki farklı alanlardan dolayı farklı kuruma değerleriyle kuruma gibi problemlerde göstermektedir. Aslında sabit kurutma hızlı peryotta kuruma miktarları kademe kademe azalacaktır. Bazı durumlarda sabit kurutma hızlı peryodun olmadığı da düşünülmektedir [52].

Sabit kurutma hızlı peryot ile azalan kurutma hızlı peryotu ayıran kritik nemin olduğu nokta kesin olarak belirli ve sabit değildir. Verilmiş bir ürün için ürünün miktarına ve kurutma değerlerine bağlı olacaktır [53].

Başarılı bir kurutma yapılabilmesi için sabit kurutma hızlı peryotta havanın üç karakteristik özelliği olmalıdır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır [41].

- 1.Optimum ve uygun yükseklikte bir kuru termometre sıcaklığı
- 2.Düşük bağıl nem
- 3.Yüksek hava debisi

Ürünü çevreleyen sınır tabaka filmi kurutma esnasındaki ısı ve nem transferine engel teşkil etmektedir. Bu film tabakasının kalınlığı öncelikli olarak hava hızı vasıtasıyla belirlenmektedir. Bu tabaka çok ince ise su buharı ürün yüzeyini kolay terk edecek ve dolayısıyla çevre havasının nemi artacaktır. Bu ise su buharı basınç gradyanında azalmaya neden olacak ve kurutma değerlerini düşürecektir [41].

2.18. Kurutma Prosesi Peryotları

Kurutma periyotları sabit kurutma hızlı ve azalan kurutma hızlı periyot olarak sınıflandırılmaktadır. Kurutma periyodu esnasında kurutulan materyalin doymuş yüzeyinden, su buharının difüzyon yoluyla ve durgun hava filmi içinden, hava hüzmesine geçtiği kabul edilir. Azalan kurutma hızlı periyodun higroskopik ürünler için aslında iki ayrı azalan hızlı periyot gibi sınıflandırılması yapılmaktadır. Yani, azalan kurutma hızlı periyodun higroskopik olmayan ürünlerde tek azalan değerli periyota, higroskopik ürünlerde ise iki farklı ve birbirini takip eden azalan kurutma değerli periyota sahip oldukları gözlenmektedir [52].

Sabit kurutma hızlı periyotta ürün yüzeyinin içeriden gelen nem ile tamamen kaplı olduğu, yüzey sıcaklığının sabit olduğu ve kurutma debisinin de değişmediği kabul edilmektedir. Bu periyot daha öncede bahsedildiği gibi ürün belirli bir kritik neme düşene kadar devam edecektir.

Birinci azalan kurutma hızlı periyodun tipik özelliği ise yüzeyin artık kendisiyle temas halindeki havayı doyurmaya yetecek kadar serbest nem verememesidir. Bu periyottaki kurutma değerleri çoğunlukla ürünün içinden yüzeye geçen nemin nasıl bir mekanizma ile geçtiğine bağlı olacaktır. Ekseriyetle bu periyot kurutma periyotlarının zamansal olarak en uzunudur. Hatta hububat tohumları gibi başlangıç neminin kritik nemden daha düşük olduğu durumlarda kurutma eğrisi tamamen bu periyottan da oluşabilecektir.

İkinci azalan kurutma değerli periyot ise birinci azalan kurutma hızlı periyodun sona ermesi ile başlamaktadır bu esnada artık yüzeyin kuru olduğu kabul edilmekte ve ayrışma düzlemi katı ürün içine doğru hareket etmektedir. Böylelikle buharın yüzeye

hareketi moleküler diffüzyon yoluyla ürün içinden yol kat ederek olmaktadır [52] ve [44].

Buhar diffüzyonunu kontrol eden kuvvetler son kurutma neticelerini tayin edecek ve bunlar büyük ölçüde ürün dışı şartlardan bağımsız olacaktır. Azalan kurutma değerli peryotun başlangıç sürelerinde, kurutma değerlerindeki değişimler sabit değerli peryotdakine benzer faktörler olmaktadır [41].

Tüm kurutma prosesi göz önüne alındığında, zamanla kademe kademe kütle transferi daha belirleyici hale gelmekte ve prosesi kontrol edici faktör olmaktadır. Bu kütle transferi daha ziyade ürün kalınlığına bağlı olmaktadır. Bu değerler artık havanın bağıl nemi ve hızından etkilenmemektedir. Bu nedenle azalan kurutma hızlı peryotta daha ziyade hava sıcaklığı kontrol edilmektedir. Buna karşın sabit kurutma değerli peryotta hem hava hızı ve hem de sıcaklığı önemli olmaktadır.

Pratikte ürünler bu bahsedilen ideal kurutma eğrisinden büzülme, sıcaklıktaki dalgalanmalar, ürünün farklı bölgelerindeki muhtelif nem diffüzyon değerleri, kurutma havasının sıcaklık ve nemindeki değişimler nedeniyle biraz daha farklı gelişmektedir.

Ürünün yüzey sıcaklığı sabit kurutma hızlı peryotun sonuna kadar kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına, buharlaşan suyun soğutma etkisinden dolayı yakın kalacaktır. Azalan kurutma hızlı peryot esnasında yüzeyden buharlaşan su miktarı kademe kademe azalacak, diğer taraftan kurutma havası değerleri değişmeyecek ve ürün yüzey sıcaklığı kurutma havasını kuru termometre sıcaklığına kadar artacaktır. Bu nedenle ürünlerin besin ve lezzetinde oluşabilecek olumsuzluklar azalan kurutma hızlı peryotta olduğu kabul edilmektedir.

2.19. Yiyeceklerin Stabilesi

Yiyeceklerin mikrobik üreme ile bozulması ve kimyasal olarak kötüleşmesi genel olarak su aktivitesi ile yakın ilişkilidir [35]. Ürün stabilesini etkileyen bu

reaksiyonlar ve değişimler konunun devamında sınıflandırılmak suretiyle verilecektir.

2.19.1 Su aktivitesi

Su veya nem çoğunlukla yiyeceklerin en büyük kısımlarından birini teşkil etmektedir. Kısmen oldukça kuru olan ekmek ve peynir gibi yiyeceklerde dahi %35' e kadar su bulunmaktadır [54] .

Su taze, donmuş ve kurutulmuş gıdaların stabilitesinde önemli bir rol oynamaktadır. Su burada kimyasal, mikrobiyolojik ve enzimatik reaksiyonlar için solvent görevi yapmaktadır. Su aktivitesi, bu tip reaksiyonlara katılabilir su mevcutiyetinin bir ölçüsü olmaktadır. Su aktivitesini kısıtlamak, yiyecek içindeki zararlı mikro organizmaların oluşup gelişimini önlemek için, en etkili yoldur. Nem oranlarının düşük olduğu birçok ortamlarda kuru tahıl ve sebze gibi ürünlerin tohumlarının uzun yıllar bozulmadığı bilinmektedir. Bunun nedeni düşük nemli ortamlarda bulunan gıdalarda bakteriyel bozulma, küf gibi oluşumların olamaması veya çok cüzi ölçülerde sınırlı kalmasıdır. Ayrıca diğer taraftan yaşamın idamesi ve kurulan medeniyetlerin devamı ve büyüyüp gelişmesi tahıl, tohum ve yiyeceklerin düşük nem oranlı ortamlarda ve düşük su içeriği ile saklanmasına bağlı olmuştur.

Yiyeceklerin muhafazası ve bozulmaması için su aktivitesi yoğun olarak incelenmiş ve son derece önemli bir gösterge olduğu konusunda bilim adamları tarafından fikir birliğine varılmıştır. Ayrıca su aktivitesinin ürünün nem miktarına kıyasla daha etkin ve önemli olduğu da anlaşılmaktadır [54] .

Su aktivitesi ürünün nem miktarı ile aynı anlamda değildir. Su aktivitesi ürün içindeki bağlı olmayan suyun bir ölçüsünü ifade etmektedir. Bu bağlı olmayan suyun ise mikrobik ve diğer ürün bozucu organizmaları barındırması ve gelişimleri için uygun ortamı sağlamaları bakımından, önemi büyük olmaktadır. Yiyeceklerin su aktivite değerleri tam kuru ürün durumundan (yani su aktivitesi 0), saf su durumuna kadar (yani su aktivitesi 1) bir yelpazede değişimi söz konusudur. Su aktivitesi bakımından yiyecekler tam kuru durumda olmalarına rağmen bir miktar daha nem

içeriğine sahiptirler. Bu nem içeriğine rağmen saklanma koşulları açısından stabil ve uygun olabilmektedirler.

Su aktivitesi ürünün bulunduğu ortamın (havanın) denge bağıl nemiyle aynı değeri ifade etmektedir. Ancak bağıl nem yüzde oranı olarak verilmekte, su aktivitesi ise ondalık kesir biçiminde verilmektedir. Yani su aktivitesi 0.75 olan bir ürünün denge bağıl nemi de % 75 olmaktadır. Herhangi bir üründe su aktivitesi denge nemi arttıkça artmaktadır. Nem sorpsiyon izotermi bu ilişkinin grafiksel olarak ifade edilmiş biçimidir.

Gıdalardaki su aktivite değerinin 0.91 den daha düşük olduğu durumlarda patojenler içeren klostridyum botulinum gibi birçok bakteriler üreyememektedir. Ancak staphylococcus aureus gibi bakteriler üreyebilmektedir, bu son bahsedilen bakterinin üremesinin engellenmesi, ancak su aktivite değerinin 0.86 dan daha aşağı çekilmesi ile mümkün olmaktadır. Su aktivitesinin 0.8 in altına inmesi durumunda çoğu küf bakterileri üreyememekte ve bu değerin 0.6 nın altında olduğu durumlarda mikrobiyolojik hiçbir gelişim mümkün olmamaktadır.

Su aktivitesinin 0.6 ile 0.8 arasında olduğu durumlarda ürün bozucu mikrobik bakterilerin ancak çok cüzi sınırlı bir kısmı üreyebilmektedir. Su aktivite değerinin 0.6 dan daha düşük olması durumunda dahi, bu değerin yine de tam olarak bilinebilmesi, ürünün raf ömrünün tam olarak belirlenebilmesi açısından önemlidir. Su aktivitesi oksidasyon, hidroliz ve enzimatik kavrulma gibi reaksiyonların oluşumunu ve oluşum hızlarını etkilediği için, değerinin bilinmesi son derece faydalıdır. Ancak ölçülebilmesinde çeşitli zorluklar mevcuttur [54].

2.19.2. Su aktivitesinin ürüne ve reaksiyonlara etkisi

Kurutulmuş ürünlerin gevreklik ve keyif verici özellikleri, su aktivitesinin birer fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Tadımsal ve hissel açıdan bir ürün kabul edilemez ve istenmeyen bir tada haiz ise, o ürün için bu bahsedilen şartlar kritik su aktivite değerini veya bu değerin aşılmış olduğunu ifade etmektedir. Kurutma ve depolama esnasında mümkün olduğunca üründeki başlangıç özelliklerini muhafaza

etmek önemli olmaktadır. Bu nedenle kimyasal ve biyokimyasal reaktivite ve stabilitenin, mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir. Su aktivitesi üründe aşğıdaki reaksiyon ve oluşumları etkilemektedir [41].

- 1.Enzimatik olmayan kavrulma
- 2.Lipid oksidasyonu
- 3.Vitamin bozulması
- 4.Enzimatik reaksiyonlar
- 5.Protein başkalaşımı

Enzimatik olmayan kavrulma reaksiyonunun hasıl olma şansı su aktivite değeriyle önce yükselmektedir. Su aktivitesi a_w nin 0.6 ile 0.7 arasında olduğu değerlerde maksimuma ulaşmaktadır. Su aktivitesinin daha fazla artığı durumlarda enzimatik olmayan kavrulma reaksiyonları oluşumu zorlaşacak ve belki de oluşmayabilecektir.

Lipid oksidasyonu ise ortalama su aktivite değerlerinde minimum oluşum hızları göstermektedir. Bu değerlerin altında ve üstünde ise lipid oksidasyonu reaksiyonu oluşum hızları artmaktadır. Bu tip reaksiyon sonucu bozulmalar yağda çözünebilen vitaminlerin kayboluşuna, istenmeyen yoğunlukta lezzet ve koku oluşumuna neden olabilmektedir. Fındık vb yemişlerde yüksek yağ oranlarında dolayı oluşumlarına sıkça rastlanmaktadır.

Suda çözünebilen vitaminlerin bozulma eğilimleri ise artan su aktivite değeri ile artmaktadır. Enzim ve protein stabilitesi de su aktivite değeri ile doğrudan etkilenmektedir. Çoğu enzimatik reaksiyonlar 0.8 in altındaki su aktivite değerlerinde yavaşlamaktadır. Mamafih enzimatik reaksiyonların az bir kısmı ise çok düşük su aktivite değerlerinde dahi vuku bulabilmektedir. Bu nedenle, her bir ürün için kritik olan su aktivite değerinin bilinmesi ve en az bu değer kurutma esnasında oluşturulması, önem arz etmektedir. Su aktivitesi ürünlerdeki mikrobik gelişimleri de etkilemektedir. Çeşitli bakterilerin hangi su aktivite değerlerinde oluşabildikleri Tablo 5.1 de verilmiştir [41].

Tablo 2.1. Yiyeceklerde su aktivitesi miktarlarına göre mikroorganizma üremesi

a _w değeri	Bu değerler arasında üreyebilen	Genel olarak bu gruptaki gıdalar
	Mikroorganizmalar	
1.00 - 0.95	Pseudomonas, Escherichia, Proteus, Shigella	Taze yiyecekler, meyve, sebze, et, balık,
	Klebsiella, Bacillus, Clostridium perfringens	süt
	ve bazı yeast grubu	
0.95 - 0.91	Salmonella, Vibrio parahaemolyticus, C.	Bazı peynir türleri, konserve veya
	botulinum, Serratia, Lactobacillus, Pedi-	kurutulmuş et
	Coccus bazı, bazı mold grubu, Rhodotorula	
	Piccia	
0.91 - 0.87	Candida, Torulopsis, Hansenula,	Sosis, salam, bazı kek türleri, kuru peynir
	Micrococcus	ve margarin
0.87 - 0.80	Mycotoxinogenic penicillia, Staphylococcus	Meyve suyu konsantreleri, tatlandırılmış
	aureus, Saccharomyces, Debaryomyces	süt, şuruplar
0.80 - 0.75	Halophilic bacteria, mycotoxinogenic	Reçel ve marmelat
	Aspergilli	
0.75 - 0.65	Xerophilic molds, Saccharomyces bisporus	İşlenmemiş şeker, bazı kuru meyveler
		ve fındık gibi kabuklu yemişler
0.65 - 0.60	Osmophilic yeasts, Aspergillus ochraceus,	% 10- 15 nem içeren kuru meyveler,
	Monascus bisporus	şekerleme ürünleri
< 0.60	Mikrobik üremeye rastlanmamaktadır	

Su aktivitesi ürünün fiziksel özelliklerini de etkilemektedir. Özellikle çok komponentli ürünlerde, ürün içindeki su yer değişimi için en önemli kontrol faktörü olmaktadır. Ayrıca su aktivitesi ürünün raf ömrünü de etkilemektedir. Ürün raf ömrünün en uzun olduğu su aktivite değerleri, tek katmanlı su miktarı değerinin olduğu seviyeler olarak ortaya çıkmaktadır.

2.19.3 Su aktivitesinin ölçülmesi

Ürün içindeki nemin belirli bir buhar basıncı olduğu bilinmektedir. Bu buhar basıncının büyüklüğü mevcut su miktarına, sıcaklığa ve ürünün bileşimine bağlı olmaktadır. Farklı ürün bileşenleri su buhar basıncını farklı ölçülerde değiştirecektir.

Tuz ve şeker içerikleri buhar basıncını daha büyük molekülü nişasta ve protein içeriğine kıyasla daha etkin bir biçimde değiştirebilecektir. Buradan görüldüğü gibi eşit nem miktarına haiz herhangi iki farklı ürün eşit su aktivite değerine sahip olmak zorunda değildir. Su aktivitesi formüsel olarak ürün içindeki nemin kısmi buhar basıncının, aynı sıcaklıktaki suyun doymuş buhar basıncına oranı olarak verilmektedir.

Su aktivitesi a_w nin belirlenmesi için en kolay yöntem, ürünü kapalı bir hücre içine koyarak ürün ile hava arasında denge oluştuğunda havanın bağıl nemini ölçmek suretiyle yapılan uygulamadır. Buradan görüldüğü gibi sorpsiyon izotermi, su aktivitesi ve nem miktarı arasındaki ilişkiyi verdiği için son derece önemli olmaktadır.

Böylelikle sıcaklık, bağıl nem ve kurutulan ürünün su aktivitesi değerleriyle belirlenmiş olan şartlarda, mümkün olan en düşük ulaşılabilir nem miktarını tespit edebilmek mümkün olmaktadır.

Kullanılan çoğu metot kapalı ortamdaki ürünün çevresindeki nemin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu tip ölçüm yapan cihazların bazı temel karakteristikleri aşağıda sıralanmıştır.

- 1.Frekans kalibrasyonuna ihtiyaç duymaktadır.
- 2.Ürün ile içinde bulunduğu kapalı ortam arasında denge nem oluşumunun olması gerekmektedir.
- 3.Histeresiz değerlerine haizlerdir, yani belirli bir yaklaşıklıkla değerleri verebilmektedirler. Ancak bazı durumlarda ise son derece iyi bir yaklaşımla vermektedirler.
- 4.Asetik asit ve gliserol gibi organik materyallerin var olduğu durumlarda hatalı okumalar da verebilmektedirler.
- 5.Sensörlerin bazıları volatik asitler tarafından bozulabilmektedirler.
- 6.Ayrıca bir cihazla günde en fazla 20 kez su aktivite belirleme ölçümleri yapılabilmektedir.

2.19.4. Mikrobik üreme yoluyla bozulma

Canlı yiyecek hücrelerinin tümü kendisini çevreleyen ortamdaki su ve neme son derece duyarlıdır. Mikro organizmaların büyümesi ve toksin oluşumu ürünlerdeki su aktivitesine doğrudan bağlı olmaktadır. Toksinlerin üremesi için gerekli olan minimum su aktivitesi mikrobik ortam için gerekli olan su aktivite seviyesinden çoğu durumlarda daha yüksek olmaktadır [44].

Faz stabilitesi olması da su aktivitesi değerlerine bağlı olmaktadır. Muhtelif su aktivite seviyelerinde Staphylococcus aureus bakterisi için üreme değerleri de farklı olmaktadır [82]. Su aktivitesi ile birlikte mikro organizmaları etkileyen diğer faktörler ürünün pH değeri, oksijen, koruyucu kimyasal maddeler, sıcaklık ve radyasyon olarak sıralanabilir [22].

Ürünlerdeki mikro organizmaların ısı, ışık ve kimyasallara olan hassasiyetleri su aktivite değerleri yükseldikçe artmaktadır [44].

2.19.5. Enzimatik reaksiyonlar

Yiyeceklerde su aktivite değerlerinin 0.75 den daha düşük olduğu durumlarda enzimatik aktivite engellenmektedir. Sebzelere uygulanan soldurma ve beyazlatma gibi kısa süreli ısı etkisi altında bırakma işlemleri ürünlerdeki enzimlerin inaktif duruma geçmelerini sağlamaktadır. Enzimatik aktivite çoğu durumlarda yiyeceklerin besin değerlerini düşürdüğü için istenmemektedir [22].

Gıdalardaki enzimatik kavrulma esnasında, ürünlerin değerli besin (fruit) kısımlarının azalması, gaz oluşumu ve koyu renk pigmentlerinin oluşumu suretiyle üründe renk koyulaşması ile karşılaşmaktadır [55].

2.19.6. Üründeki fiziksel ve yapısal değişimler

Kurutma esnasında ürün geometrisi ve yapısındaki değişimler kütle transfer değerlerini azaltmakta ve ürün kalitesini düşürmektedir [46].

Kurutulan gıdalardaki en sık rastlanan fiziksel ve yapısal bozulmalar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [22].

1. Odunumsu yapı
2. Yavaş ve tamamlanmayan kurutma
3. Ürün öz suyu kaybı

Nişasta gibi polisakaridlerin kristalleşmesi üründeki suyun uzaklaştırılması neticesinde ortaya çıkmaktadır. Bu ise ürün hücresel bütünlüğünü parçalayıp bozmaktadır. Kurutma esnasında ürünün büzülüp küçülmesine de sıkça rastlanmaktadır. Büzülme genellikle kurutma sürecinin başlangıç ve erken zamanlarında ortaya çıkmaktadır[22].

2.19.7. Üründeki besin değeri aroma ve lezzet azalması

Kurutma esnasında ve sonucunda bir nem buharlaşması olmaktadır. Ürünün kurutma amacıyla ısıtılması sonucunda bu buharlaşmayla birlikte aroma ve lezzet verici bazı unsurlarda kaybolmaktadır. Aromanın ürünün bünyesinde tutulabilme kabiliyeti diğer kurutma metotlarına kıyasla spray kurutma ve isothermal kurutmada çok daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda ürün kalınlığı ve gaz tarafı kütle transfer katsayılarının artışı da üründeki aroma tutma kabiliyetini artırıcı bir unsurdur [22].

2.19.8. Nemli katı partikül ve su aktivite ilişkisi

Su aktivitesinin gıda biliminde son derece önemli ve etkin bir yere sahip olduğu, konuyla uğraşan tüm bilim adamları tarafından teyit edilmektedir. Düşük su aktivite değerlerinde ürünün uzun süre saklanması mikro organizmaların gelişim hızlarının son derece düşük olması ve kimyasal reaksiyonların cereyan etmelerinin oldukça zor olması nedeniyle, su aktivitesi gıda biliminde önemli bir yer tutmaktadır [50] .

Su aktivitesi su miktarı ile buhar basıncı arasındaki ilişkiden dolayı kurutma kinetiğinde rol oynamaktadır. Bilindiği gibi buhar basıncı gradyeni kurutma mekanizmasının tahrik unsuru olarak göz önüne alınmaktadır. Şayet bir sistem

termodinamik dengede ve birçok faz ve bileşenden oluşmuş ise, fazlar arasında sürekli bir molekül hareketi olacaktır. Molekül değişimi tüm bu bileşenler arasında eşit olacak ve böylelikle muhtelif fazların kütlelerinde değişim olmayacaktır. Bu nedenle fazlar arası serbest enerjide net bir değişim olmayacaktır. Böylece fazlar içindeki tüm bileşenlerin kimyasal potansiyelleri eşit kalacaktır.

Gazların kimyasal potansiyelleri direkt olarak söylenememektedir, ancak uçuculuk (fugacity) denilen yardımcı bir fonksiyon tarafından verilmektedir. Uçuculuk buhar basıncının boyutu olarak tanımlanmaktadır ve bir maddenin moleküllerinin kaçma eğilimini ifade etmektedir. Bir karışımın içinde bulunan ideal gaz için kısmi basınca eşit olmaktadır. Termodinamik konsept olarak su aktivitesi uçuculuk seviyesi olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir sistemin su aktivitesi, sistemdeki suyun kısmi buhar basıncına hemen hemen eşit olmaktadır [51].

Atmosfer basıncı altında ve sıcaklıkların 50 °C den düşük olduğu durumlarda su aktivitesi ve kısmi buhar basınçları arasındaki farklılıklar % 0.2 den daha az olmaktadır. Yani pratikte su aktivitesi kısmi buhar basıncına eşit denilmektedir [22].

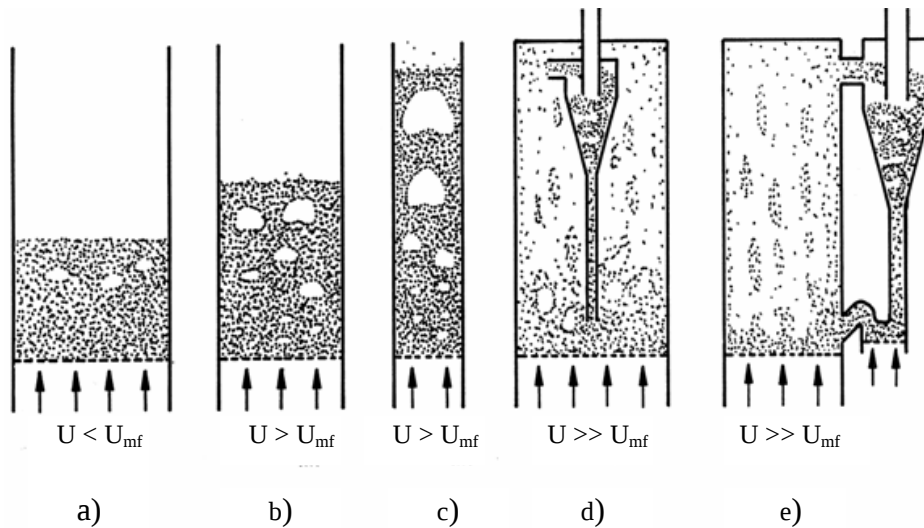
2.20. Akışkan Yataklar

Akışkanlaşma prensibi endüstriyel ölçülerde ilk olarak 1922 yılında ince taneli kömürün gazifikasyonunda kullanılmıştır. Bu tarihten itibaren kullanımı sürekli artarak sanayinin birçok alanında kullanım bulmuştur. Özellikle enerji verimli kullanımının son derece önem kazandığı son yıllarda, kurutma prosesleri de dahil birçok işlemler için en elverişli proses olması bakımından, son derece önem kazanmıştır.

Akışkan yatakta sebze kurutma sonuçları mükemmel ürün kalitesi, lezzet ve renk parametrelerinde bozulma olmadığını göstermektedir, proses süreleri sürekli çalışan bantlı kurutuculara kıyasla çok kısalmıştır. [56]. Katı partiküllerin akışkan yataklarda kurutulması hem iyi reaktör performansı ve hem de düşük ilk yatırım ve bakım masrafları nedeniyle, ayrıca kullanılan ekipmanların uzun ömürlü ve sağlamlıkları dolayısıyla, yaygın bir endüstriyel proses olarak kullanılmaktadır [52].

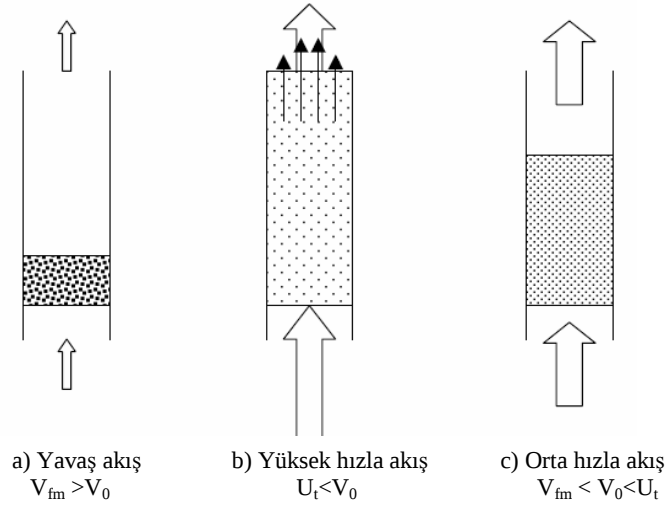
2.20.1 Akışkan yatak tipleri

Akışkanlaşmanın başlaması için gerekli olan minimum akışkanlaşma hızının aşılması gerekmektedir. Bu hızın büyüklüğüne göre akışkan yataklar sınıflandırılmaktadır. Hava hızının minimum akışkanlaşma hızından daha düşük olduğu durumlarda katı partiküllerin akışkanlaşmaya başlaması mümkün olmamaktadır bu durum aşağıdaki Şekil 2.14 a kısmında gözlemlenmektedir ve bu tip yataklar sabit yatak olarak bilinmektedir. Şekil b kısmında görüldüğü gibi hava hızının minimum akışkanlaşma hızını aşmasıyla birlikte yatak genişlemeye başlayacak ve sistemde baloncuk oluşumu da hasıl olacaktır. Ancak bu baloncuk oluşumu ve büyüklükleri sınırlı olacaktır. Kısım c de görüldüğü gibi yatak dar ve uzun olması durumunda baloncuklar oldukça büyük şekiller almaktadır ve gaz dalgaları haline gelmektedirler. Şayet gaz hızı daha fazla artırılmaya devam edilirse katı partikülleri yatak dışına sürüklenmeye başlayacaktır. Şekil d kısmında görüldüğü gibi yatak dışına taşan partiküller tutulmalı ve yatağa geri gönderilmelidir. Hava hızının daha fazla artırılmasıyla Şekil e kısmında görüldüğü gibi sürüklenmeli yataklar elde edilmektedir. [57]



Şekil 2.14. Partikül büyüklüğüne göre akışkan yatakların sınıflandırılması

Bir başka sınıflandırma daha basit olarak sabit ve akışkan yatakların minimum akışkanlaşma hızına göre yapılmış ve yatak sabit, akışkan yatak ve sürüklenmeli yatak olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 2.15 de görülmektedir.



Not: V_{fm} : minimum akışkanlaşma hızı

Şekil 2.15. Akışkan yatakların partikül hareketine göre sınıflandırılması

2.20.2. Akışkan yatakların Geldart'a göre sınıflandırılması

Geldart 1973 yılında partikül akışkanlaşmasının karakteristiklerini incelemiştir. Gözlemlerinde partikül çapını ve akışkan fazı ile katı faz arasındaki relativ yoğunluğu baz olarak almıştır. Sınıflandırmayı aşağıdaki gibi vermiştir ve her bir grubun karakteristik özellikleri belirtilmiştir.

Grup A :

Baloncuk oluşumlu yatak

Yatak genişlemesi büyük ölçüde baloncuk oluşumu öncesi gerçekleşmektedir.

Katı partiküllerinin sirkülasyonu oldukça fazladır.

Grup B:

En sık rastlanan yatak tipidir

A grubu partiküllerinden daha iri taneciklere haizdir

Akışkanlaşma hızının aşılmasıyla birlikte baloncuk oluşumu hasıl olmaktadır. Dağıtıcı ızgara önünde küçük baloncuklar oluşmakta ve bunlar yatak boyunca genişlemektedir.

Baloncuk çapları partikül büyüklüklerinden bağımsız olmaktadır.

Partiküllerin sirkülasyonu fazladır.

Grup C:

Zor akışkanlaşmalar ve partiküller yumak biçiminde toplanır

Yatak içinde ara kanalların oluşumuna rastlanır.

Partiküller birleşmeye meyillidir.

Grup D:

Büyük ve ağır partiküller söz konusudur.

Baloncuk oluşumu son derece hızlıdır ve büyük çaplarda oluşum söz konusudur.

Baloncuk oluşumu diğer gaz kısmı oluşumundan daha yavaş hasıl olmaktadır.

Baloncuk çapı büyüdükçe yığılıp kümeleşme eğilimlidir.

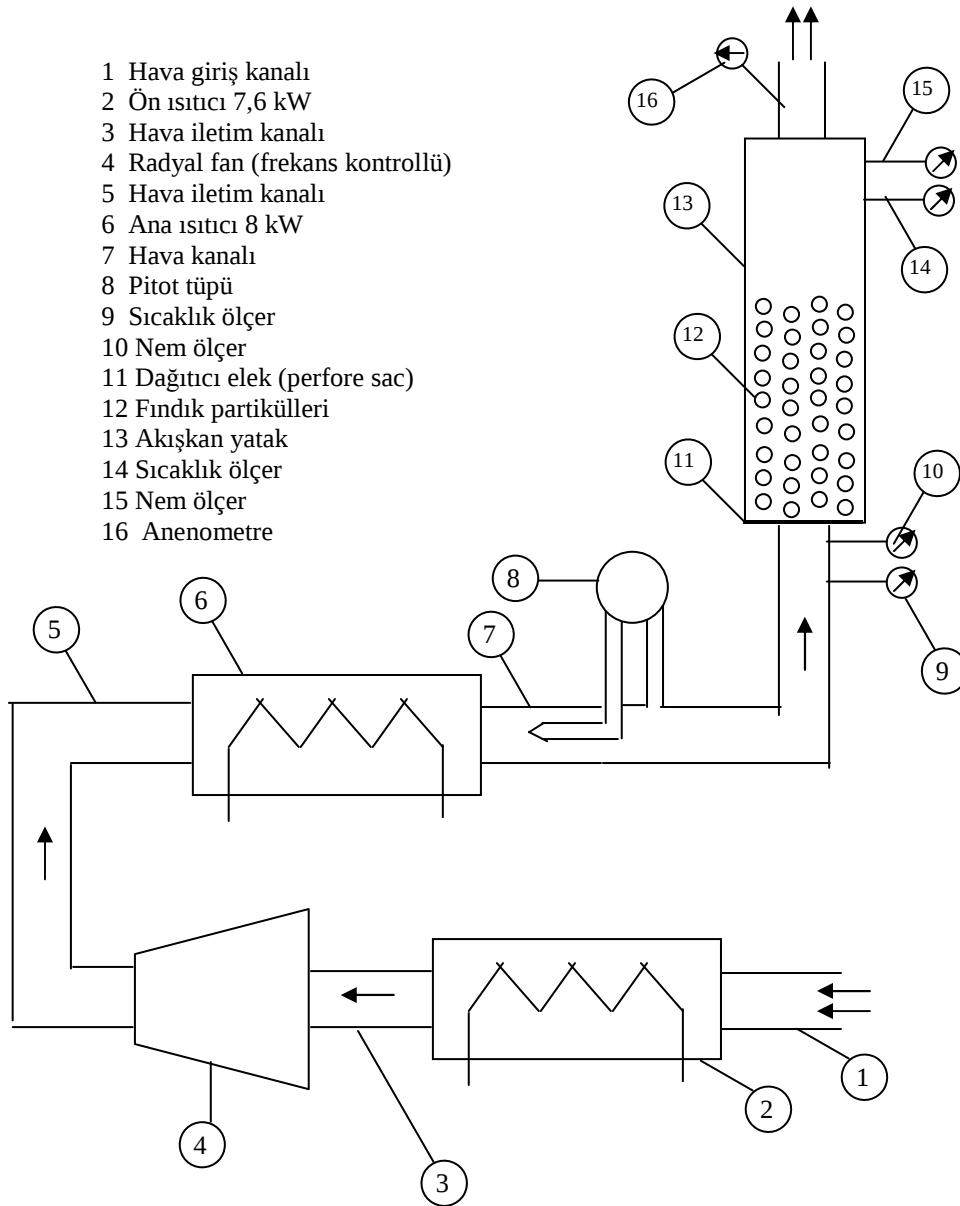
Yatak dışına partikül sevkıyatı daha kolaydır.

Geldart sınıflandırmasına göre fındık içleri hem çapları ve hem de yoğunlukları bakımından D tipi özellik göstermektedir. Bunların incelenmesi ve reaksiyonların gelişiminde baloncuk fazının oldukça önem arz edeceği açıktır.

Fındık fıstık vb kuruyemişlerin kavrulması geleneksel olarak konvektif tip bantlı fırınlarda yapılmaktadır. Akışkan yatak kullanılarak kurutma ve kavurma yapılmasında son dönemlerde sıkça kullanılmaktadır. Bu sistemlerin incelenmesi hususunda literatürde birçok çalışmalar mevcuttur. Bunların önemli bir bölümü ve diğer fındık ile ilgili çalışmalar aşağıda kısa deyinmelerle çıkarılmıştır.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Setinin Kurulması



Şekil 3.1 Deney tesisat şeması

Fındık içlerinin akışkan yatakta kavrulması için laboratuvar ölçülerinde bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu setin prensip şeması Şekil 4.1 de görülmektedir.

Set bir adet ön ısıtıcı, radyal fan, frekans invertörü , hava irtibat borusu, dağıtıcı elek, çelik malzemeden yatak gövdesi, 2 adet sıcaklık ölçer, 2 adet kombine sıcaklık ve nem ölçer, bir adet pitot tüpü, 1 adet basınç farkı ölçer ve diğer muhtelif izolasyon ve ek parçalarından oluşmuştur. Bu parçaların tanımları aşağıda yapılmıştır.

Fan: Laboratuvar ortamından havayı emmek ve akışkan yatağa basılmasını temin etmek amacıyla bir adet geriye eğik kanatlı radyal santrifüj fan kullanılmıştır. Fan giriş ağzı çapı 150 mm ve çıkış ağzı ise 130*110 mm dikdörtgen kesit olup 100 mm çapındaki hava basma borusu ile irtibatı yapılmıştır. Fanı çeviren elektrik motorunun gücü ise 1.5 kW dır ve fan ile aynı mil üzerinde direkt tahrikli olarak çalıştırılmaktadır.. Motor devir sayısını ayarlamak üzere frekans kontrolü amacıyla invertör kullanılmıştır. Fan çıkışında hava 1500 mm uzunluğunda bir boru içinden düz bir hatta sirküle edilmektedir. Bu borunun üzerinde yatağa giren havanın hızı ve debisini belirlemek üzere Pitot tüpü yerleştirilmiştir.

Frekans invertörü: Fan motor devir sayısını ayarlamak üzere Siemens Micromaster serisi invertörler içinden 7.5 kW güce kadar kullanılabilen bir invertör seçilmiştir. Bu sürücü 380 V AC gerilim ile beslenmektedir. Bu invertör çalışma esnasında motorun çalışma akımını gerilimi frekansı ve devir sayısını dijital ekranı vasıtasıyla gösterebilmektedir.

Pitot tüpü: basma borusu üzerinde akışkan yatak ortamına girecek olan havanın debisini ve hızını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Pitot tüpü 300 mm uzunlukta ve çapı 4 mm dir. Paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Pitot tüpü çıkışları da basınç farkını hPa, mmSS, ve mmHg olarak ölçebilen fark basınç ölçen hücreye bağlanmıştır.

Sıcaklık ve nem ölçerler: Hava dağıtım eleğinin hemen altındaki ve akışkanlaşmanın bittiği yatak seviyesinin biraz üzerindeki noktalara sıcaklık ve nem ölçerler bağlanmıştır. Havanın akışkan yatağa girmeden hemen önceki ve yatağı terkettikten hemen sonraki sıcaklık ve nemini belirlemek üzere yerleştirilmişlerdir. Bunlar ölçüm uçlarının bulunduğu noktalardaki sıcaklık ve nemi digital ekranlarında direkt olarak gösteren aygıtlardır. Testo 605 tipi nem ölçerler 125 mm daldırma uzunluklarına haizlerdir. Cihazların hassasiyetleri % 0.1 nem ve % 0.1 sıcaklık aralığındadır. Sistemin irtibat borularında yapıldığı gibi giriş sıcaklık ve nem ölçerlerden itibaren yatak gövdesi çok iyi bir biçimde izolasyon malzemesi ile kaplanmıştır. Akışkan yatağın gövde uzunluğu dağıtıcı elekten itibaren 500 mm dir ve yatak çapı 100 mm olarak dizayn edilmiştir. Dağıtıcı elek çelik saçtan mamül olup içinde 1.5 mm lik çapa haiz delikler mevcuttur. Akışkan yataktaki sıcaklık ölçümü amacıyla Testo 905 –T1 tipi sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Bunlar 3 mm çapında ve 200 mm daldırma uzunluklarına haizlerdir. Bu sensörler K tipi termočiftlerden oluşmuşlardır ve sıcaklıkları direkt dijital ekranlarında göstermektedirler. Ölçüm aralıkları –50 ve +350 ° C arasındadır. Akışkan yatak çıkışında ise Testo 465 kompakt ölçüm cihazı ve buna bağlı kombine bir sıcaklık ve nem ölçücü yardımıyla ölçümler yapılmıştır.

Isıtıcı üniteler: Bunlar bir adet ön ısıtıcı ve bir adet ana ısıtıcıdan oluşmuştur. Ön ısıtıcı kapasite ayarını tam yapabilmek amacıyla her biri 0.8 kW gücünde yedi adet ve 2 kW lık bir adet toplam 7.6 kW lık elektrikli resistansdan oluşmuştur. Ana ısıtıcı ise her biri 2 kW güce haiz dört adet toplam gücü 8 kW olan elektrikli resistanslardan oluşmuştur. Böylelikle her türlü laboratuvar hava şartlarında 160 ° C ye kadar akışkan yatak sıcaklığı temin edilebilmektedir. Her deney bitiminde önlem amacıyla elektrikli ısıtıcılar kapatıldıktan sonrada fan en az 10- 15 dakika emniyet ve soğutma amacıyla çalıştırılmaya devam edilmiştir.

3.2. Deneylerin Yapılması

Deneylerde lezzeti ve kavurma işlemine en uygun çeşit olması nedeniyle Tombul fındık kullanılmıştır. Numuneler Ordu sahil yöresinin yaklaşık 100-150 metre deniz seviyesinden yüksekliğe haiz Öceli köyünden 2003 yılında hasadı yapılmış ürünlerden alınmıştır. Deneyler esnasında kavurma sıcaklıkları 90, 110, 130, 150 ° C

olarak seçilmiştir. Her bir deney 400 gramlık numunelerle yapılmıştır ve numune büyüklükleri 11-13 mm tane büyüklüğüne haiz fındık içlerinden seçilmişlerdir. Bu numuneler üniform başlangıç nemlerine haiz olmaları amacıyla kabuklu fındık olarak ahşap örgülü bir sepette 2 ay boyunca bekletilerek muhafaza edilmişlerdir ve ortalama deney öncesi nemleri % 4.65 kuru bazlı olarak ölçülmüştür. Numune nemi belirlenmesi Sartorius MA30 tipi gravimetrik nem ölçüm cihazı ile yapılmıştır ve her bir numune yaklaşık 2 saat boyunca gravimetrik ölçüme tabii tutulmuştur. Numuneler deney ortamına getirilinceye kadar ve deney sonrasında nem geçirmez ambalajlarda muhafaza edilmişlerdir. Deney tesisatı önce ana ısıtıcı açılmak suretiyle ısıtılmış ve buna ilaveten istenilen hava sıcaklığını temin etmek amacıyla ön ısıtıcı kademeli olarak açılmıştır. Sistem rejime girdikten sonra Testo 465 sıcaklık nem ölçer ve kayıt cihazı programlamıştır ve her bir dakikada sistem çıkışındaki sıcaklık ve nem değerleri belirlenmek suretiyle sistem bilgileri kayıt altına alınmıştır. Deneylerde hava hızı 5.5 m/s olarak hem pitot tüpü ve hem de Airflow TA-2 marka anemometre vasıtasıyla tespit edilmiştir. Partikül akışkanlaşma yatak yüksekliği 160 mm olarak tespit edilmiştir. Akışkan yatak L/d oranı 1,6 olarak tespit edilmiştir. Aşağıda Tablo 4.1 de deney parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 3.1 Fındık kavurma deney gerçekleştirme koşulları

Deney Adı	Sıcaklık	Ürün Miktarı	Hava hızı	Süresi	Ürün nevi ve yılı
Kavurma	°C	gram	m/s	dakika	
K150	150	400	5,5	25	Tombul 2003
K130	130	400	5,5	25	Tombul 2003
K110	110	400	5,5	25	Tombul 2003
K90	90	400	5,5	25	Tombul 2003
K120	120	150	4,8	25	Tombul 2003
K100	100	150	4,8	25	Tombul 2003
K80	80	150	4,8	35	Tombul 2003
K70	70	150	4,8	30	Tombul 2003

Sıcaklık değeri bakımından rejime ulaşmış olan akışkan yatağa ortam sıcaklığına haiz olan fındık partikülleri sisteme yukarıdan dökülmek suretiyle hızlı bir biçimde dahil edilmiştir. Laboratuvar ortamı sıcaklığı ve dolayısıyla fındık partikül sıcaklıkları deney başlangıcında 26 °C olarak tespit edilmiştir. Böylece deney süreci başlamıştır ve her 5 dakikada bir ve her defasında dörder adet olmak üzere numuneler alınmıştır. Bu numuneler derhal hava sızdırmaz uygun büyüklükte poşetlere konulmak suretiyle nem tespiti için sevk edilmişlerdir. 400 gram numunelerle yapılan deneyler yatak içinde ürün dağılım uygunluğu ve elde edilen neticelerin buna paralel olarak kullanışlı olması nedeniyle teorik ve pratik inceleme esnasında bundan böyle kullanılacaktır. Fındık partikülleri yoğunluğu tespiti daha önce araştırmacı Demir [22] tarafından yapılmış olduğundan burada verilmiş olan değer esas alınmıştır. Demir [22] tarafından kavrulmuş fındık için 848 gr/m³ değeri ve kuru fındık için 875 gr/m³ yoğunluk değerleri verilmiştir. Akışkan yataktaki prosesin hızı göz önüne alındığında uygun yoğunluğun kavrulmuş fındığın değerine yakın olacağı anlaşılmaktadır ve bu değer 850 gr/m³ olarak hesaplarda alınacaktır.

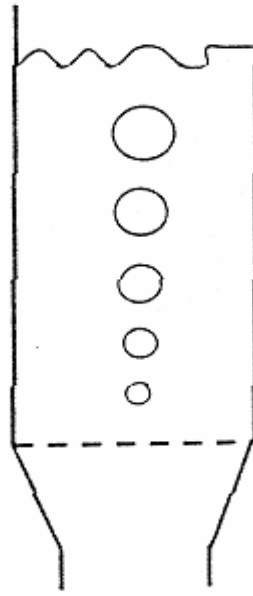
BÖLÜM 4. MATEMATİKSEL MODEL

4.1. Matematiksel Modelin Eldesi

Bu aşamada modellemenin yapılabilmesi için yatağın ana karakteristiklerinin bilinmesi gerekecektir. Bunlar ise sırasıyla katı partiküllerin yoğunluğu, tane büyüklükleri ve akışkan yatağın şekilsel biçimi olmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi katı partiküller küresel cisimler olarak kabul edilmektedir ve çapları 11- 13 mm arasında değişmektedir. Fındık tanelerinin yoğunlukları 850 kg/m^3 olarak alınmaktadır [25]. Yatağın çapı 100 mm ve yatağın olduğu dikey boru uzunluğu 500 mm olup yatak oluşum yüksekliği ortalama 160 mm olarak tespit edilmiştir. Bu durumda sistem Geldart sınıflandırmasına göre D tipi akışkan yatak olarak ortaya çıkmaktadır. Bu ise yatak boyunca akış esnasında üç farklı fazın oluştuğunu göstermektedir. Bunlar sırasıyla gaz, katı partikül ve baloncuk fazları olmaktadır. Ayrıca bu şekildeki modellemelerde fazlardaki yatak boyunca oluşan homojensizlikleri de göz önüne almak mümkün görünmektedir.

Akışkan yatakların modellenmelerinde ilk çalışmalar plug akış ve karışım akışlı modeller olarak karşımıza çıkmıştır [40]. Daha sonraki gelişmelerle yukarıda da sözü edildiği gibi akışkan yatakların çözümlemelerinde hidrodinamik modeller ele alınmaya başlanmıştır. Buna göre yatağın davranımı yükselen baloncukların karakteristiklerine göre belirlenmektedir.

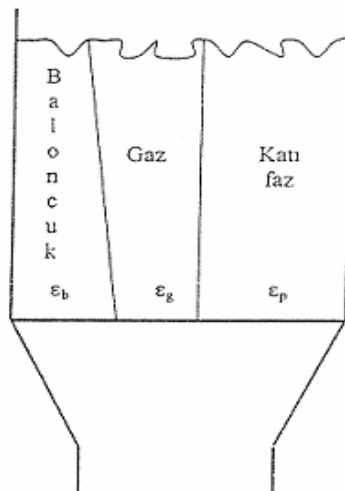
Baloncuklar yatakta yükseldikçe çapları ve hızları da artmaktadır. Baloncuk çapının büyümesi yükselmeyle birlikte küçük çaplı baloncukların büyük çaplıyla birleşmesine bağlı olarak açıklanmaktadır. Bu durum Şekil 5.1 de görülmektedir.



Şekil 4.1 Baloncuk çapının yatak yüksekliği ile değişimi

Burada yükselirken doğrultuları değişmeyen ancak çapları artan baloncukların olduğu fazın bu şekilde geliştiği varsayılmaktadır. Böyle bir modelin uygulanabilmesi için, baloncuk çapları yatak boyunca değiştiğinden yatağında aksel yönde bölmelere ayrılması gerekecektir [40].

Akışkan yataktaki faz dağılımı Şekil 4.2 de gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Akışkan yatak içinde faz dağılımları

Burada Grup D tipi partiküllerde baloncuk çapının sabit olduğu kabulü doğru sonuç vermeyebilecektir. Belirli zaman peryotlarında baloncuk fazı debisinin sabit kabul edilmesi ve yükseldikçe baloncukların hızlarının artmasından ötürü, süreklilik denklemi şartı olarak yatak yüksekliği boyunca baloncuk fazının kapsamı azalacaktır. Şekil 4.2 den görüldüğü gibi yatak yüksekliği boyunca katı fazın sabit olduğu kabul edilebilir ve bu kabul önemli bir yaklaşımla doğru olacaktır. Ayrıca katı partikülleri ideal karıştığı yani her partikülün farklı yatak yüksekliklerinde aynı sürelerde bulunduğu varsayılmaktadır. Kurutma tekniği problemlerinde bu yaklaşımlar tercihen yapılmaktadır. Baloncuk fazı kapsamı azalması ve katı fazın sabit kalmasından dolayı yapılan kabullerle gaz fazı kapsamının yatak boyunca artacağı belirlenmektedir. Gaz ve baloncuk fazları için parametrelerin tek boyutlu, yalnızca düşey eksen boyunca ve katı faz içinse ideal karışım olduğu ve parametrelerin yine tek boyutlu ve yalnızca radyal ekseninde değiştiği kabulü yapılmaktadır. Ayrıca fındık partikülleri küresel ve içi boş cisim olarak göz önüne alınmıştır.

Yukarıda yapılan bu kabullere dayanarak öncelikle gerekli ifadelerin uygun biçimleri çıkarılmaya çalışılacaktır. Baloncuk debisi ifadesi aşağıdaki gibi verilmektedir [84].

$$Q_b = \Psi (u - u_{mf}) A_t \quad (4.1)$$

Burada u yataktaki gaz hızını u_{mf} ise minimum akışkanlaşma hızını A_t yatağın toplam kesit alanını göstermektedir. Ψ katsayısı Y yatak yüksekliği ve d yatak çapı olmak üzere muhtelif Y/d oranları için aşağıdaki gibi önerilmektedir.

$$\begin{aligned} \Psi &= 0.26 & Y/d &\leq 0.5 \\ \Psi &= \exp[0.464 \log (Y/d) - 1.02] & 0.5 &\leq Y/d \leq 10 \end{aligned}$$

Yatak yüksekliğine bağlı olarak baloncuk boyutlarının da değişimini içeren baloncuk çapı ifadesi Darton ve arkadaşları tarafından aşağıdaki gibi gösterilmiştir. [40]

$$d_{bi}=0.54(u-u_{mf})^{0.4}\left(Y_j+4\sqrt{A_0}\right)^{0.8}g^{-0.2} \quad (4.2)$$

5.2 eşitliğinde A_0 dağıtıcı eleğin dolu alanını g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

Burada j indisi baloncuğun eksenel hareketindeki herhangi bir konumu göstermektedir. Baloncuğun yükselme hızı u_{bj} ise;

$$u_{bj}=(u-u_{mf})+0.71(gd_{bj})^{0.5} \quad (4.3)$$

olarak verilmektedir, baloncuk boşluğu ise aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_{bj}=\frac{Q_b}{A_t u_{bj}} \quad (4.4)$$

Partiküllerin hacımsal dağılımı yatak boyunca sabit kabul edilir. Aslında yatağın yüzeyine doğru bu dağılım değişmesine rağmen yatağın performansı üzerinde çok küçük bir etkisi olacaktır. Partikül boşluğu aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_p=1-\varepsilon_{bj}-\varepsilon_{gj} \quad (4.5)$$

gazın hacim boşluğu ε_{gj} ise aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_{gj}=(1-\varepsilon_{bj}-\varepsilon_p) \quad (4.6)$$

gaz hızı u_{gj} ise;

$$u_{gj}=\frac{(u-\varepsilon_{bj}u_{bj})}{u_{ij}} \quad (4.7)$$

Burada yatağın genişlemesi ortalama baloncuk yükselmesine eşit olduğu kabulü yapılarak akışkanlaşmadan sonraki yatak yüksekliği için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$Y_f = \frac{W}{\rho_p \varepsilon_p A_t} = \frac{Y_{mf}}{1 - \varepsilon_{b_{of}}} \quad (4.8)$$

Burada W yataktaki partikül kütle miktarını $\varepsilon_{b_{of}}$ ortalama baloncuk boşluğunu göstermektedir. Minimum akışkanlaşma hızı ifadesi aşağıdaki gibi verilmektedir [40].

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^2 \Phi_s} Re_{mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s^2} Re_{mf} = Ar \quad (4.9)$$

Bilindiği gibi Reynold sayısı;

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (4.10)$$

ve Archimed sayısı; μ_g gazın dinamik vizkozitesi olmak üzere

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (4.11)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Minimum akışkanlaşma ifadesi kuru partikül için geçerlidir ve kavrulma işlemi için gelen fındık partikülleri de kuru olarak reaksiyon fırınına girmektedir. Akışkan yataklarda kurutma ile ilgili çeşitli modeller literatürde mevcuttur. Bunların arasında üç fazlı modeller oldukça yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Burada baloncuk fazını inaktif bypass fazı olarak düşünüp iki fazlı gibi çözüme gitmekte mümkündür [34]. Ancak ilk defa Hajidavalloo ve Hamdullahpur tarafından önerilen ve kullanılan model daha sonra Topuz [84] tarafından da tatbik edilmiş ve son derece başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada da Hajidavalloo ve Hamdullahpur tarafından önerilen aynı model uygulanacaktır. Akışkan yatak duvar sıcaklığı çok iyi izolasyon nedeniyle sabit olarak kabul edilecektir. Her üç faz içinde

kütle ve enerji alışverişleri incelenecek ve akışkan yatağın geçerli denklemleri, değişimlerin tek boyutlu olduğu kabulüyle elde edilecektir. Böylece fındık kavurma esnasındaki kurutma prosesi teorik olarak modellenip çözülecektir.

5.1.1. Gaz fazı

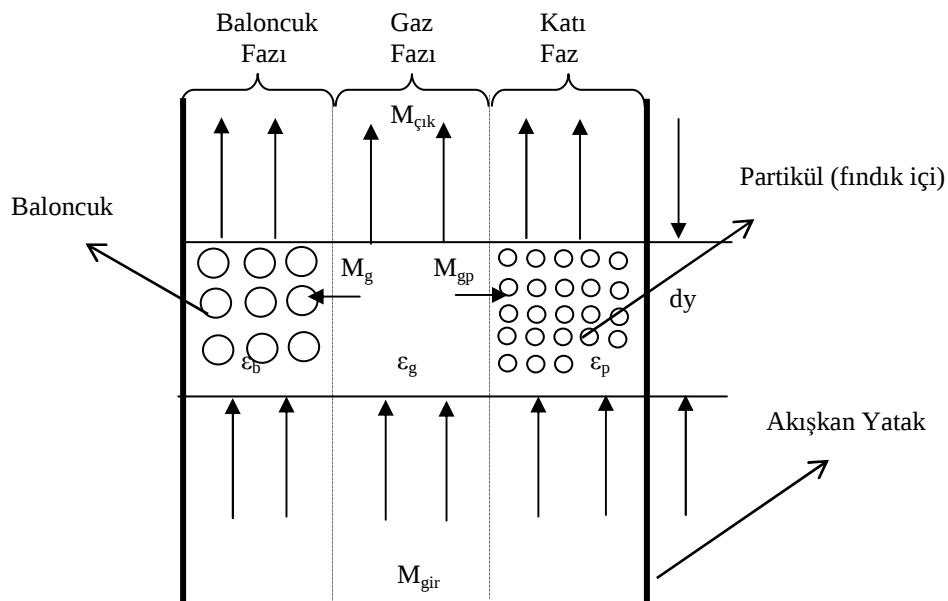
Kütle dengesi : Şekil 5.3 de gösterilen kontrol hacmine gaz fazı için kütlenin sakınımı yasası uygulanırsa

Aşağıdaki ifade yazılabilecektir.

$$\left(\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{birim zamandaki} \\ \text{kütle değişimi} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacmine giren} \\ \text{toplam kütle} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacminden çıkan} \\ \text{toplam kütle} \end{array} \right) \quad (4.12)$$

yukarıdaki denklem açılımı için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{\partial M_G}{\partial t} = \sum \dot{M}_{gir} - \sum \dot{M}_{cik} \quad (4.13)$$



Şekil 4.3 Gaz fazı kütle geçişi için kontrol hacmi ve oluşan kütle ifadeleri

Fazlar arası kütle geçişleri de göz önüne alınarak ifade düzenlenirse

$$\frac{\partial M_G}{\partial t} = \dot{M}_{gir} + \dot{M}_{çık} + \left(\dot{M}_{gp} + \dot{M}_{gb} \right) \quad (4.14)$$

denklemini elde edilir. Burada kontrol hacmine giren nem kütlesi

$$\dot{M}_{gir} = \rho_h X_g \varepsilon_g A_t U_g \quad (4.15)$$

olarak yazılabilir. Birim zamanda çıkan nem kütlesi ise:

$$\dot{M}_{çık} = \rho_h X_g \varepsilon_g A_t U_g + \frac{\partial (\rho_h X_g \varepsilon_g A_t U_g)}{\partial y} dy \quad (4.16)$$

olarak düzenlenir.

Gaz ile partikül fazları arası kütle geçişi :

$$\dot{M}_{gp} = \rho_h k_{gp} (X_{py} - X_g) A_p \quad (4.17)$$

Gaz ile baloncuk fazı arası kütle geçişi:

$$\dot{M}_{gb} = \rho_h k_{gb} (X_b - X_g) A_b \quad (4.18)$$

ifadeleri ile belirlenmektedir.

dy birim yüksekliğine karşılık gelen toplam kontrol hacmi

$$dV = A_t dy \quad (4.19)$$

biçimindedir. Üstteki denklemlerde

- k_{gp} : gaz ile partikül arası kütle geçiş katsayısını
 A_p : fındık yüzey alanını
 k_{gb} : Gaz ile baloncuk fazları arası kütle geçiş katsayısını
 A_b : baloncuk yüzey alanını ifade etmektedir.

Yukarıdaki denklemler 4.15-4.18, denklem (4.3) de yerine yazılırsa ve eşitliklerin her iki tarafı $A_t dy$ ifadesi ile bölünürse

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_g \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_g \varepsilon_g U_g) = \rho_h k_{gp} (X_{py} - X_g) \frac{A_b}{A_t d_z} - \rho_h k_{gb} (X_g - X_b) \frac{A_b}{A_t d_z} \quad (4.20)$$

elde edilir. Yatağın birim alanına düşen partikül ve baloncuk alanlarının oranları sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\frac{A_p}{A_t dy} = \frac{6\varepsilon_p}{d_p} \quad (4.21)$$

$$\frac{A_b}{A_t dy} = \frac{6\varepsilon_b}{d_b} \quad (4.22)$$

Baloncuğun geometrik oranı (A_b/V_b) ifadesi ile kütle geçiş katsayısı k_{gb} çarpılarak K_{gb} toplam kütle geçiş katsayısı bulunur.

$$K_{gb} = \frac{A_b}{V_b} k_{gb} = \frac{6k_{gb}}{d_b} \quad (4.23)$$

4.21 –4.23 denklemleri 4.20 de yerine yazılırsa gaz fazı kütle dengesi için sonuç denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_g \varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_g \varepsilon_g U_g) = \rho_h k_{gp} (X_{py} - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} - \rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) \quad (4.24)$$

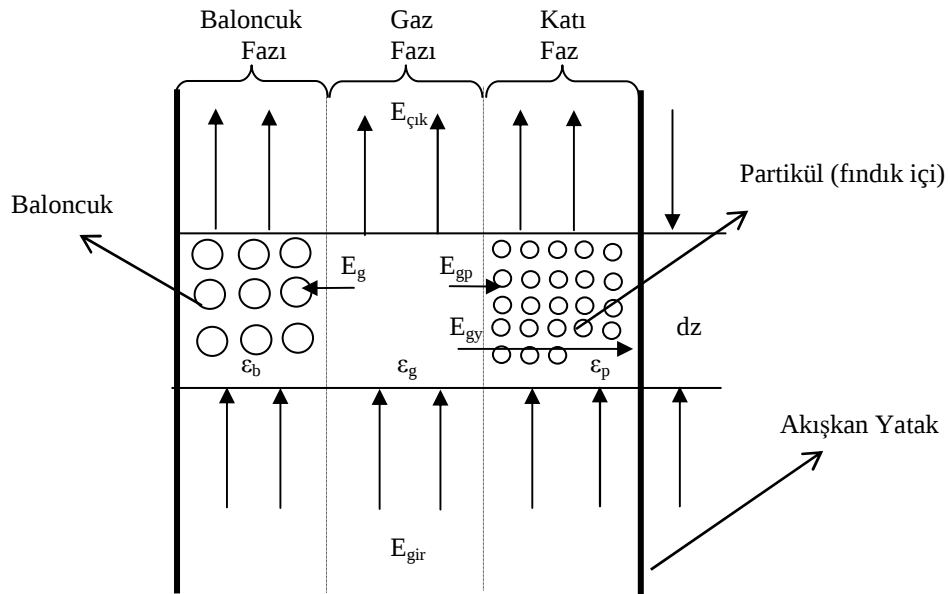
Enerji dengesi:

Kontrol hacmi gaz fazı kısmına enerjinin sakınımı yasası uygulanırsa

$$\left(\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{birim zamandaki} \\ \text{enerji değişimi} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacmine giren} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacminden çıkan} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) \quad (4.25)$$

ifadeler aşağıdaki gibi yazılabilir ve Şekil 4.4 de gaz fazının çevresiyle olan enerji alışverişleri gösterilmiştir.

$$\frac{\partial E_g}{\partial t} = \sum E_{gir} - \sum E_{cik} \quad (4.26)$$



Şekil 4.4 Gaz fazı ısı geçişi için kontrol hacmi ve ısı ifadeleri

4.26 ifadesi açılımı ile yazılırsa aşağıdaki biçimde elde edilir.

$$\frac{\partial H_g}{\partial t} = \dot{H}_{gir} - \dot{H}_{cik} + (\dot{H}_{gp} + \dot{H}_{gb} + \dot{H}_{gd}) \quad (4.27)$$

kontrol hacmine gaz fazı için enerji girişi yazılırsa

$$\dot{H}_{gir} = \rho_h C_{\varepsilon_g} A_t U_g T_g \quad (4.28)$$

elde edilir. Kontrol hacminden çıkan enerji ise

$$\dot{H}_{çık} = \rho_h C_{\varepsilon_g} A_t U_g T_g + \frac{\partial (\rho_h C_{\varepsilon_g} A_t U_g T_g)}{\partial y} dy \quad (4.29)$$

biçimindedir. Gaz ile partikül arası enerji geçişi .

$$\dot{H}_{gp} = -h_{gp} (T_g - T_p) A_p - \dot{M}_{gp} C_{bu} (T_g - T_p) \quad (4.30)$$

olmaktadır. Gaz ile baloncuk fazları arasındaki enerji geçişi.

$$\dot{H}_{gb} = h_{gb} (T_b - T_g) A_b + \dot{M}_{gb} C_{bu} (T_b - T_g) \quad (4.31)$$

olarak yazılır. 4.30 ve 4.31 denklemlerinin sağ tarafındaki birinci terim sıcaklık farkından doğan ısı geçişini ikinci terim ise nem transferi dolayısıyla oluşan ısı geçişini ifade etmektedir. Gaz ile akışkan yatak cidarı arasındaki enerji geçişi ise aşağıdaki gibidir.

$$H_{gd} = -h_{gd} (T_g - T_d) A_d \quad (4.32)$$

burada h_{gd} gaz ve duvar arasındaki ısı geçiş katsayısını tanımlamaktadır ve Howard tarafından aşağıdaki şekilde önerilmiştir.

$$h_{gd} = \frac{0.86 Ar^{0.15} \lambda_h}{d_p} \quad (4.33)$$

burada λ_h havanın ısı iletkenliğini göstermektedir. İlgili ifadeler ve 4.28-4.33 denklemleri 4.27 de yerlerine yazıldıktan sonra denklemin her iki tarafı $A_t dy$ ifadesi ile bölünürse:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_g \varepsilon_g T_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h C_g \varepsilon_g U_g T_g) = & -h_{pg}(T_g - T_p) \frac{A_p}{A_t dy} \\ & - \rho_h k_{pg}(X_{py} - X_g) \frac{A_p}{A_t dy} C_{bu}(T_p - T_g) + h_{gb}(T_b - T_g) \frac{A_b}{A_t dy} \\ & + \rho_h k_{gb}(X_b - X_g) \frac{A_b}{A_t dy} C_{bu}(T_b - T_g) - h_{gd}(T_g - T_d) \frac{A_d}{A_t dy} \end{aligned} \quad (4.34)$$

elde edilir. Yatağın birim kontrol hacmi başına düşen partikül ve baloncuk alanları ifadeleri 4.34 denkleminde yerine yazılmak suretiyle gaz fazı enerji dengesi için aşağıdaki denklem elde edilir

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_g \varepsilon_g T_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h C_g \varepsilon_g U_g T_g) = & h_{pg}(T_p - T_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} \\ & - \rho_h k_{pg}(X_{py} - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} C_{bu}(T_{py} - T_g) + H_{gb}\varepsilon_b(T_b - T_g) \\ & + \rho_h K_{gb}\varepsilon_b(X_b - X_g) C_{bu}(T_b - T_g) - h_{gd}(T_d - T_g) \frac{(1 - \varepsilon_p)}{d_t} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Katı faz ile gaz fazı arasındaki ısı ve kütle geçişi katsayılarının hesaplanması için Hagen [58] tarafından aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$Nu = \frac{h d_p}{\lambda} = \left(2 + \left(0.4 * Re^{1/2} + 0.06 * Re^{2/3} * Pr^{0.4} \right) \right) \quad (4.36)$$

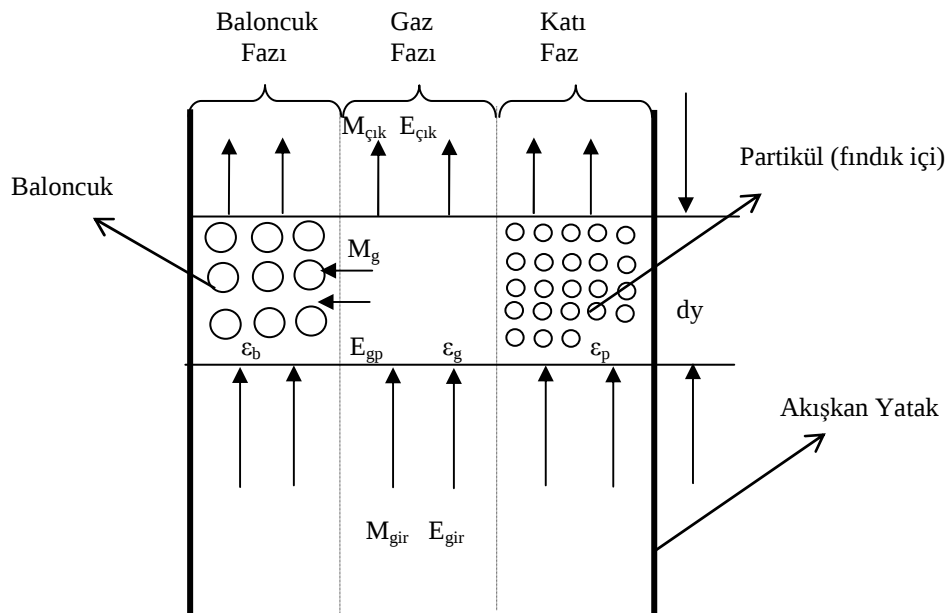
$$Sh = \frac{k d_p}{D} = \left(2 + \left(0.4 * Re^{1/2} + 0.06 * Re^{2/3} * Sc^{0.4} \right) \right) \quad (4.37)$$

Burada

- Nu: Nusselt sayısını
 Sh: Sherwood sayısını
 Re: Reynolds sayısını
 Sc: Schmidt sayısını
 D: Diffüzyon katsayısını
 k: Partikül gaz kütle transfer katsayısını
 d_p : Partikül çapını göstermektedir.

5.1.2. Baloncuk fazı

Akışkan yatak içinde akışın homojenliğini bozan en nemli unsurlardan birisi baloncukların varlığıdır. Geldart'ın sınıflandırmasına göre fındık büyüklüğündeki partiküllerin D sınıfı yatak yapısı oluşturdukları bilinmektedir. Bu tip yataklarda ise baloncuk oluşumu kaçınılmaz olmaktadır. Baloncuk fazı için plug akış kabul edilmektedir. Böylece gaz fazında çıkarılan denklemlere benzer biçimde kütle ve enerji dengesi için nihai ifadeler aşağıdaki gibi elde edilir.



Şekil 4.5 Baloncuk fazı kütle ve ısı transferi için tek boyutlu kontrol hacmi ve oluşan ifadeler

Kütle dengesi:

$$\left(\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{birim zamandaki} \\ \text{kütle değişimi} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacmine giren} \\ \text{toplam kütle} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacminden çıkan} \\ \text{toplam kütle} \end{array} \right) \quad (4.38)$$

yukarıdaki denklem açılımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial M_b}{\partial t} = \sum \dot{M}_{gir} - \sum \dot{M}_{çık} \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial M_b}{\partial t} = \dot{M}_{gir} - \dot{M}_{çık} + \left(\dot{M}_{gb} \right) \quad (4.40)$$

denklemini elde edilir. Burada kontrol hacmine giren nem kütlesi

$$\dot{M}_{gir} = \rho_h X_b \varepsilon_b A_t U_b \quad (4.41)$$

olarak yazılabilir. Birim zamanda çıkan nem kütlesi ise:

$$\dot{M}_{çık} = \rho_h X_b \varepsilon_b A_t U_b + \frac{\partial (\rho_h X_b \varepsilon_b A_t U_b)}{\partial y} dy \quad (4.42)$$

Gaz ile baloncuk fazı arası kütle geçişi:

$$\dot{M}_{gb} = \rho_h k_{gb} (X_g - X_b) A_b \quad (4.43)$$

ifadeler yerine yazıldığında ve denklemin her iki tarafı $A_t \cdot dy$ ile bölünüp sadeleştirme yapıldığında baloncuk fazı kütle dengesi için nihai bağıntı aşağıdaki gibi elde dillecektir.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_b \varepsilon_b)}_{\text{zamanla kütle değişimi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_b \varepsilon_b U_b)}_{\text{yükseklikle kütle değişimi}} = \underbrace{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b)}_{\text{nem geçişi ile kütle değişimi}} \quad (4.44)$$

Enerji dengesi:

$$\left(\begin{array}{c} \text{kontrol hacminde} \\ \text{birim zamandaki} \\ \text{enerji değişimi} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacmine giren} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{kontrol} \\ \text{hacminden çıkan} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) \quad (4.45)$$

ifadeler aşağıdaki gibi yazılabilir ve Şekil 5.3 de baloncuk fazının çevresiyle olan enerji alışverişleri gösterilmiştir.

$$\frac{\partial H_g}{\partial t} = \sum H_{gir} - \sum H_{çık} \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial H_b}{\partial t} = \dot{H}_{gir} - \dot{H}_{çık} + (\dot{H}_{gb}) \quad (4.47)$$

kontrol hacmine baloncuk fazı için enerji girişi yazılırsa

$$\dot{H}_{gir} = \rho_h C_b \varepsilon_b A_t U_b T_b \quad (4.48)$$

kontrol hacminden çıkan enerji ise

$$\dot{H}_{çık} = \rho_h C_b \varepsilon_b A_t U_b T_b + \frac{\partial (\rho_h C_b \varepsilon_b A_t U_b T_b)}{\partial y} dy \quad (4.49)$$

Gaz ile baloncuk fazları arasındaki enerji geçişi.

$$\dot{H}_{gb} = h_{gb} (T_b - T_g) A_b + \dot{M}_{gb} C_{bu} (T_b - T_g) \quad (4.50)$$

olarak yazılır. 5.50 denkleminin sağ tarafındaki birinci terim sıcaklık farkından doğan ısı geçişini ikinci terim ise nem transferi dolayısıyla oluşan ısı geçişini ifade etmektedir. İfadeler yerine yazıldığında ve denklemin her iki tarafı $A_t \cdot dy$ ile bölünüp sadeleştirme yapıldığında baloncuk fazı enerji dengesi için nihai ifade aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_b \epsilon_b T_b)}_{\text{zamanla entalpi değişimi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}(\rho_h C_b \epsilon_b U_b T_b)}_{\text{yükseklikle entalpi değişimi}} = \underbrace{H_{gb} \epsilon_b (T_g - T_b)}_{\text{ısı geçişi}} + \underbrace{\rho_h K_{gb} \epsilon_b (X_g - X_b) C_{bu} (T_g - T_b)}_{\text{nem ile entalpi geçişi}} \quad (4.51)$$

Baloncuk ile gaz arası toplam kütle ve ısı geçiş katsayıları:

$$K_{gb} = 4.5 \left(\frac{U_{mf}}{d_b} \right) + 5.85 \left(\frac{D_{bu}^{0.5} g^{0.25}}{d_b^{1.25}} \right) \quad (4.52)$$

$$H_{gb} = 4.5 \left(\frac{U_{mf} \rho_h C}{d_b} \right) + 5.85 \left(\frac{(\lambda_h \rho_h C)^{0.5} g^{0.25}}{d_h^{1.25}} \right) \quad (4.53)$$

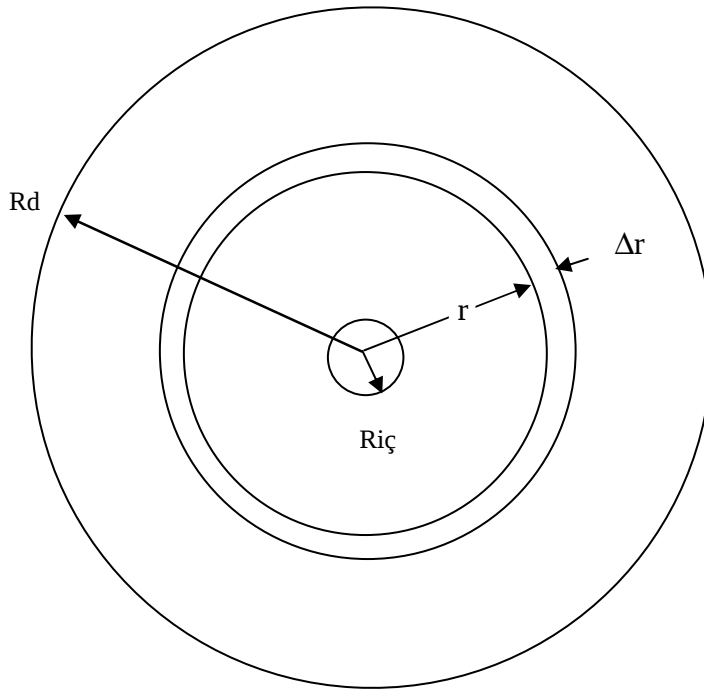
ifadeleri ile verilmektedir. [84]

5.1.3. Katı faz

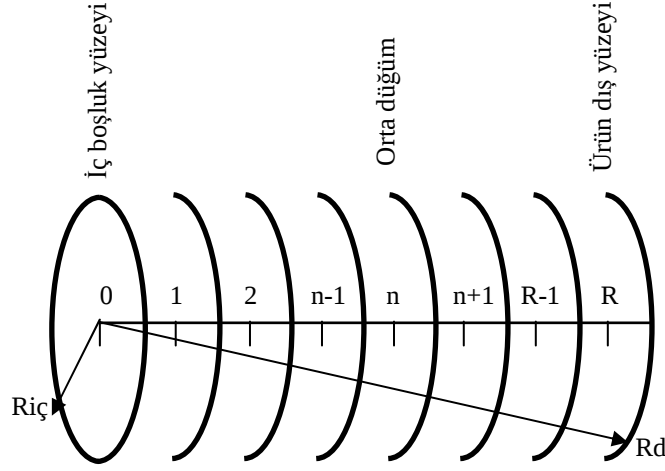
Yiyeceklerin kurutma prosesleri daha önce bahsedildiği gibi iki farklı peryottan oluşmaktadır. Bu peryotların varlığı ve oluşumu genellikle katının nem içeriğine kurutma gazına vb diğer şartlara bağlı olarak gelişmektedir. Bu peryotlar sırasıyla sabit kurutma hızlı ve azalan kurutma hızlı peryot olmaktadır. Kavurma işlemi için hazırlanan iç fındıkların başlangıç nemleri çok düşük olduğundan sabit kurutma hızlı peryod, bu durumda muhtemelen ortaya çıkmayacaktır.

Azalan kurutma hızlı peryot: Kurutmanın gelişen ve ilerleyen sürecinde dış yüzeydeki nemin alınmasından sonra nem alınma yüzeyi ürün içine doğru ilerleyecek

ve ürünün daha iç kısımlarından nem alınmaya başlanacaktır. Bu durumdaki bir ürünün kurutma hızını nem difüzyon özellikleri belirlemektedir. Burada sistemin analizinde katı partiküllerin üniform izotropik ve küresel şekle ve içlerinde boşluğa haiz oldukları kabul edilmektedir. Katı partikülde ısı ve kütle transferini tetikleyen kuvvetler, buhar basıncı, katı yüzeyi ile gaz arasındaki sıcaklık ve basınç farkı olmaktadır. Büyük partiküllerde partikül iç kısımlarındaki nem ve sıcaklık gradyanlarının belirlenmesi gerekir. Bu nedenle difüzyon denklemlerinin sınır şartlarında da kullanılması gerekmektedir. Ayrıca partikül içindeki nemin ürün yüzeyine sıvı fazda geldiği ve bunu takiben buharlaşmanın yalnızca yüzeyde hasıl olduğu kabul edilmektedir. İçi boş küresel cisim olarak kabul edilen fındık partikülleri için kontrol hacmin gösterimi aşağıda Şekil 5.6 a ve b de gösterilmiştir.



Şekil 4.6a. Fındık partikülleri kontrol hacmi



Şekil 4.6b. İç boş küresel cisimde kontrol hacim ve düğüm noktaları gösterimi

İfadeler aşağıda çıkarılmıştır.

Diffüzyon denklemi:

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla M_p) \quad (4.54)$$

Tek boyutlu küresel koordinatlarda ve nem gradyeninin yalnızca radyal yönde olduğu kabul edilirse 5.54 denklemi bu şartlar için aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) \quad (4.55)$$

Katı partikül kontrol hacmi Şekil 4.6 da gösterilmiştir. başlangıç ve sınır şartları aşağıda çıkarılmıştır.

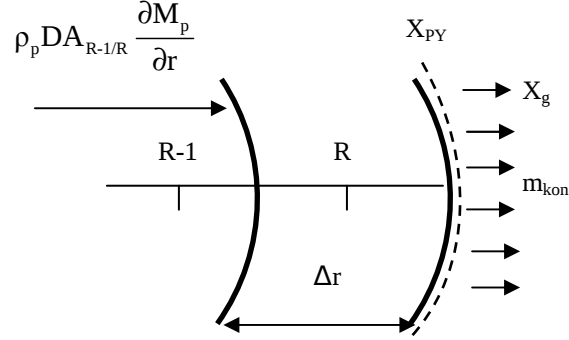
$$t = 0 \quad \text{da} \quad 0 \leq r \leq R \quad M_p = M_{po} = \text{sabit} \quad (4.56)$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{iç} \quad \text{ise} \quad \dot{m}_{kon} = 0 \quad (4.57)$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{dış} \quad \text{ise} \quad M_p(r_d, t) = f(X_{py})$$

Partikül yüzeyindeki sınır şartı için eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenir :

$$\rho_p \Delta V \frac{\partial M_p}{\partial t} = \rho_p D A_p \frac{\partial M_p}{\partial r} - \dot{m}_{kon} \quad (4.58)$$



Şekil 4.7. Fındık dış yüzeyinden taşınım ile kütle geçişi

Partikül yüzeyi için taşınım ile kütle geçişi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{m}_{kon} = \rho_h k_{gp} A_p (X_{py} - X_g) \quad (4.59)$$

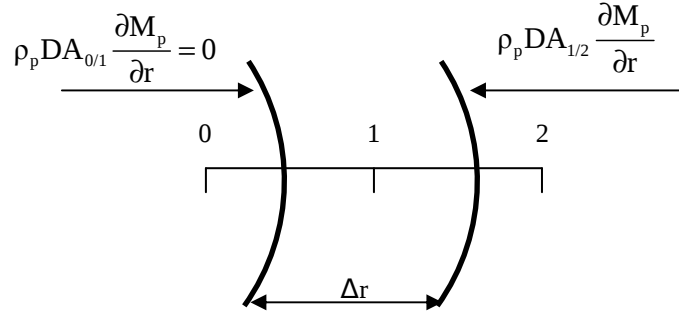
burada X_{py} partikül yüzeyindeki sınır tabaka mutlak nemini göstermektedir. 4.59 ifadesi 4.58 de yerine yazılırsa

$$\rho_p \Delta V \frac{\partial M_p}{\partial t} = \rho_p D A_p \frac{\partial M_p}{\partial r} - \rho_h k_{gp} A_p (X_{py} - X_g) \quad (4.60a)$$

elde edilir.

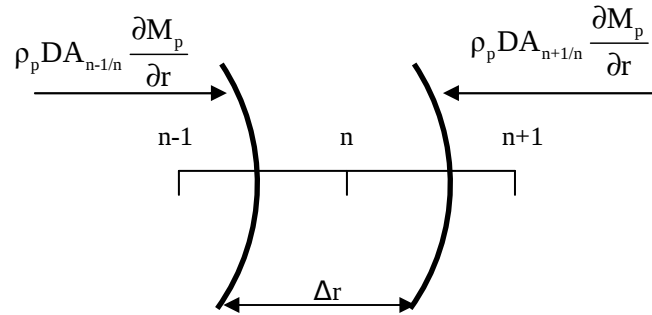
Partikül iç boşluk sınırında kütle sakınımı denklemi sınır şartları kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir. Şekil 4.8 de görülmektedir.

$$\rho_p \Delta V \frac{\partial M_p}{\partial t} = 0 - \rho_p D A_p \frac{\partial M_p}{\partial r} \quad (4.60b)$$



Şekil 4.8. Partikül iç boşluk yüzeyinde kütle geçişi

Sınır şartlarının olmadığı ürün iç kısımları için kontrol hacim yaklaşımı ile denklem düzenlenirse ve şekilden de görüldüğü gibi aşağıdaki son hale haiz olacaktır.



Şekil 4.9. Katı partikül orta düğümlerdeki kütle geçişi

$$\rho_p \Delta V \frac{\partial M_p}{\partial t} = \rho_p DA_{sol} \frac{\partial M_p}{\partial r} + \rho_p DA_{sağ} \frac{\partial M_p}{\partial r} \quad (4.60c)$$

Enerji denklemi ve başlangıç ile sınır şartları aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial (\rho_p C_p T_p)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (4.61)$$

Başlangıç ve sınır şartları:

$$t = 0 \quad \text{da} \quad 0 \leq r \leq R \quad T_p = T_{po} = \text{sabit} \quad (4.62)$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{i\check{c}} \text{ ise} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \dot{q}_{kon} = 0 \quad (4.63)$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{dış} \text{ ise} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \dot{q}_{kon} = h_{gp} (T_g - T_{py}) - \rho_h k_{gp} b (X_{py} - X_g)$$

partikül dış yüzeyindeki sınır şartı yazılıp denklem oluşturulursa aşağıdaki ifade elde edilmektedir. Şekil 4.10 de durum gösterilmiştir.

$$\rho_p \Delta V C_p \frac{\partial (T_p)}{\partial t} = \lambda_p A_{sol} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \rho_p D A_{R-1/R} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{R-1/R} + \dot{q}_{buh} + \dot{q}_{pg} + \dot{q}_{pd} \quad (4.64)$$

elde edilir, burada

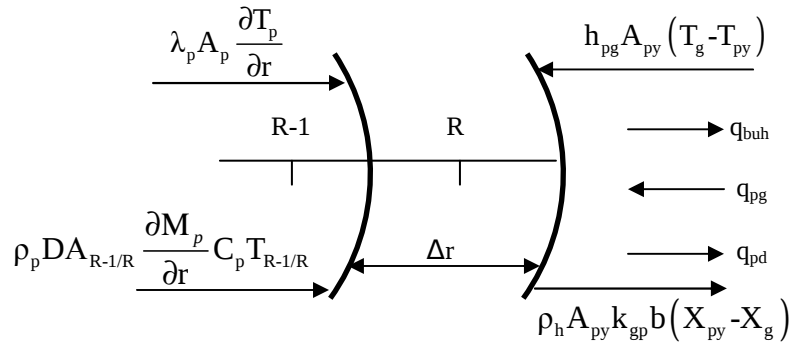
$$\dot{q}_{buh} = \dot{m}_{kon} b \quad \text{buharlaşma ısısı} \quad (4.65)$$

$$\dot{q}_{pg} = h_{pg} A_{py} (T_g - T_{py}) \quad (4.66)$$

partikül ve gaz arası ısı geçişini

$$\dot{q}_{pd} = h_{pd} A_{pd} (T_d - T_{py}) \quad \text{partikül ile duvar arası ısı geçişini} \quad (4.67)$$

ifade etmektedir (partikül duvar ısı geçişi cüzi etki yapması beklendiğinden ihmal edilebilecektir). Burada T_{py} partikül yüzey sıcaklığını ve T_d akışkan yatak duvar sıcaklığını göstermektedir.



Şekil 4.10 Fındık dış yüzeyinden ısı geçişi ve kontrol hacim

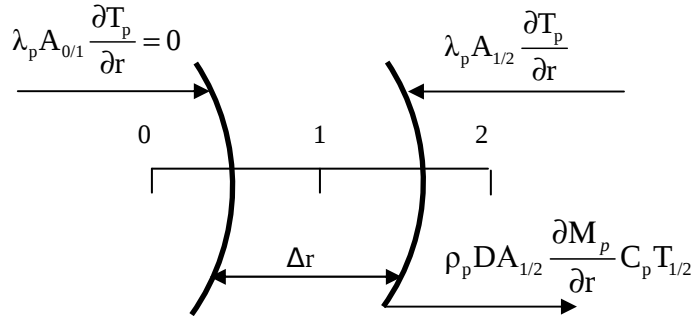
Partikül ile duvar arası ısı geçiş katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir. [40]

$$h_{pd} = \frac{0,843 Ar^{0,39} \lambda_h}{d_p^{0,5}} \quad (4.68)$$

Denklem 5.64 de ifadeler yerine yazılıp partikül duvar arası enerji geçişi cüzi olduğundan ihmal edilirse ürün yüzeyinde ifadenin nihai hali aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\rho_p \Delta V_R C_p \frac{\partial(T_p)}{\partial t} = \lambda_p A_{R-1/R} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \rho_p D A_{R-1/R} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{R-1/R} + h_{pg} A_{py} (T_g - T_{py}) - \rho_h k_{gp} A_{py} b (X_{py} - X_g) \quad (4.69)$$

İç boşluk yüzeyinde sınır şartları yerine konularak denklem düzenlenirse Şekil 4.9 da gösterildiği gibi aşağıda ifade edilmiştir.



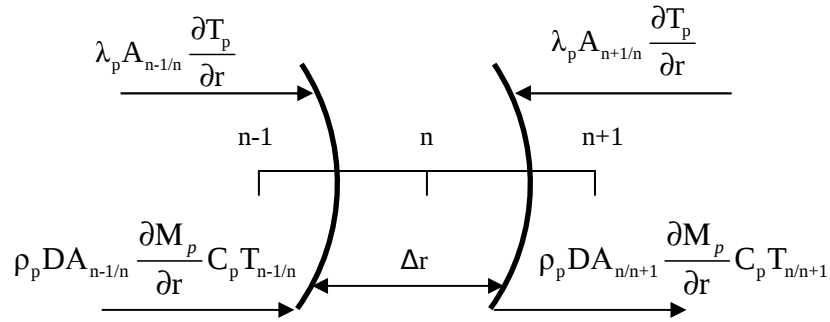
Şekil 4.11 Fındık iç yüzeyinden ısı geçişi ve kontrol hacim

$$\rho_p \Delta V C_p \frac{\partial(T_p)}{\partial t} = 0 + \lambda_p A_{1/2} \frac{\partial T_p}{\partial r} - \rho_p D A_{1/2} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{1/2} \quad (4.70)$$

buradan düzenlenirse nihai denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\rho_p \Delta V C_p \frac{\partial(T_p)}{\partial t} = \lambda_p A_{1/2} \frac{\partial T_p}{\partial r} - \rho_p D A_{1/2} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{1/2} \quad (4.71)$$

ürün orta kısımları için denklem Şekil 4.12 de görüldüğü gibi sınır şartları olmayacağından aşağıdaki gibi oluşacaktır.



Şekil 4.12 Fındık orta kısımlarda ısı geçişi ve kontrol hacim

$$\begin{aligned} \rho_p \Delta V C_p \frac{\partial(T_p)}{\partial t} = & \lambda_p A_{sol} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \lambda_p A_{sağ} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \\ & \rho_p D A_{n-1/n} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{n/n-1} - \rho_p D A_{n/n+1} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{n/n+1} \end{aligned} \quad (4.72)$$

4.2. Lineer Olmayan Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Nümerik Analizi

Gaz ve baloncuk fazı denklemleri hiperbolik tip ve katı faz denklemleri ise parabolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlenmesinde kontrol hacim yaklaşımı kullanılmıştır. Çözümlerde sonlu farklar metodu kullanılarak denklemlerin ayırt edilmiş halleri elde edilecektir, burada kararlılığın sağlanmasına yönelik olarak tam implicit yaklaşım tercih edilmiştir.. Hesaplanacak bölge kontrol hacimlere bölünmüştür.. Ayırt edilen denklemler her bir kontrol hacim için kütle ve enerjinin korunumu denklemlerini vermektedir..

4.2.1. Gaz fazı

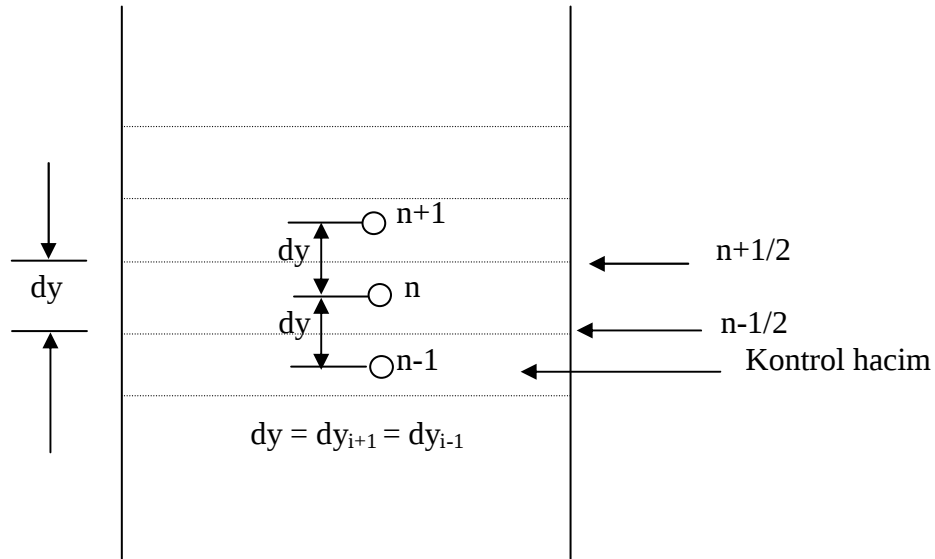
Kütle geçişi denklemi ele alınırsa, bunlar hiperbolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu tip denklemlerin ayırt edilmesinde explicit, implicit ve Crank Nicholson gibi değişik metotlar mevcuttur; burada önemli olan kararlı çözümün elde edilmesidir. İmplicit metot tercih edilmiş ve denklemlerin elde edilmesinde kullanılmıştır. 4.24 bağıntısında gaz fazı kütle sakınım ifadesi elde edilmişti ve aşağıda yeniden yazılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_g \epsilon_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_g \epsilon_g U_g) = \rho_h k_{gp} (X_{py} - X_g) \frac{6\epsilon_p}{d_p} - \rho_h K_{gb} \epsilon_b (X_g - X_b) \quad (4.73)$$

Denklem $\rho_h \epsilon_g$ ile bölünürse

$$\frac{\partial}{\partial t}(X_g) + \frac{\partial}{\partial y}(X_g u_g) = \frac{6\epsilon_p k_{gp}}{\epsilon_g d_p} (X_{py} - X_g) - \frac{K_{gb} \epsilon_b}{\epsilon_g} (X_g - X_b) \quad (4.74)$$

elde edilir. Ayırt edilmiş denklemi elde etmek üzere, Şekil 4.13'de gösterildiği gibi kontrol hacim seçimi yapılmıştır.



Şekil 4.13 Yatak içinde düğüm noktaları ve kontrol hacmin seçimi.

Kararsız terim için, (denklemden sol baştaki ilk terim) değişkenlerin düğüm noktasındaki değerinin tüm kontrol haciminde geçerli olduğu kabul edilirse;

$$X_{gn}^{i+1} - X_{gn}^i + \frac{U_g \Delta t}{\Delta y} (X_{n+1/2}^{i+1} - X_{n-1/2}^{i+1}) = \frac{6k_{gp} \epsilon_p \Delta t}{\epsilon_g d_p} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) - \frac{K_{gb} \epsilon_b \Delta t}{\epsilon_g} (X_g^{i+1} - X_b^{i+1}) \quad (4.75)$$

bulunur, burada n+1/2 yerine n ve n-1/2 yerine n-1 yazılırsa denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$X_{gn}^{i+1} - X_{gn}^i + \frac{U_g \Delta t}{\Delta y} (X_{gn}^{i+1} - X_{gn-1}^{i+1}) = \frac{6k_{gp} \epsilon_p \Delta t}{\epsilon_g d_p} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) - \frac{K_{gp} \epsilon_b \Delta t}{\epsilon_g} (X_g^{i+1} - X_b^{i+1}) \quad (4.76)$$

denklem düzenlenirse çözüm öncesi son hali elde edilecektir

$$\begin{aligned} X_{gn}^{i+1} \left[1 + \frac{U_g \Delta t}{\Delta y} + \frac{6k_{gp} \epsilon_p \Delta t}{\epsilon_g d_p} + \frac{K_{gp} \epsilon_b \Delta t}{\epsilon_g} \right] - X_{gn-1}^{i+1} \left[\frac{U_g \Delta t}{\Delta y} \right] - X_{gn}^i \\ = X_{py}^{i+1} \left[\frac{6k_{gp} \epsilon_p \Delta t}{\epsilon_g d_p} \right] + X_b^{i+1} \left[\frac{K_{gp} \epsilon_b \Delta t}{\epsilon_g} \right] \end{aligned} \quad (4.77)$$

Enerji denkleminin ayırt edilmeden önceki son hali 4.35 eşitliğinde verilmişti ve aşağıda yeniden yazılmıştır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_h C_g \epsilon_g T_g) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_h C_g \epsilon_g U_g T_g) = h_{pg} (T_{py} - T_g) \frac{6\epsilon_p}{d_p} \\ - \rho_h k_{pg} (X_{py} - X_g) \frac{6\epsilon_p}{d_p} C_{bu} (T_{py} - T_g) + H_{gb} \epsilon_b (T_b - T_g) \\ + \rho_h K_{gb} \epsilon_b (X_g - X_b) C_{bu} (T_b - T_g) - h_{gd} (T_g - T_d) \frac{(1 - \epsilon_p)}{d_t} \end{aligned} \quad (4.78)$$

Burada partikül yüzey sıcaklığının gaz ve ürün son düğüm noktası olan R noktasındaki değerlerle ifade edilmesi gerekecektir. Bu amaçla partikül yüzeyinde denge şartı yazılırsa:

$$h_{gp} A_{py} (T_g - T_{py}) = \lambda A_{py} \frac{(T_{py} - T_R)}{\frac{\Delta r}{2}} \quad (4.79)$$

buradan

$$(T_g - T_{py}) = \frac{2\lambda A_{py}}{h_{gp} A_{py} \Delta r} (T_{py} - T_R) \text{ elde edilir ve ilgili düğümlerde alan ifadeleri yerine}$$

yazılarak

$$(T_g - T_{py}) = \frac{2\lambda}{h_{gp} \Delta r} (T_{py} - T_R) \text{ elde edilir. Buradan düzenlenirse}$$

$$\frac{h_{gp} \Delta r}{2\lambda} (T_g - T_{py}) = (T_{py} - T_R)$$

$$\frac{h_{gp} \Delta r}{2\lambda} T_g + T_R = T_{py} + \frac{h_{gp} \Delta r}{2\lambda} T_{py}$$

$$Bi = \frac{h_{gp} \Delta r}{\lambda} \quad (4.80)$$

olarak tanımlanır ve T_{py} ifadesi çekilirse

$$T_{py} = \frac{T_g \frac{Bi}{2} + T_R}{1 + \frac{Bi}{2}} = T_g \left(\frac{Bi}{Bi+2} \right) + T_R \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \quad (4.81)$$

elde edilir. T_{py} ifadesi yerine yazılıp eşitlik $\rho_h C_g \varepsilon_g$ ile bölündüğünde

:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(T_g) + \frac{\partial}{\partial y}(U_g T_g) = & \frac{h_{pg}}{\rho_h C_g \varepsilon_g} \left(\left(T_g \left(\frac{Bi}{Bi+2} \right) + T_R \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \right) - T_g \right) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} \\
& - \frac{\rho_h k_{pg}}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (X_{py} - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} C_{bu} \left(\left(T_g \left(\frac{Bi}{Bi+2} \right) + T_R \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \right) - T_g \right) + \frac{H_{gb} \varepsilon_b}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (T_b - T_g) \\
& + \frac{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (X_b - X_g) C_{bu} (T_b - T_g) - \frac{h_{gd}}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (T_d - T_g) \frac{(1-\varepsilon_p)}{d_t}
\end{aligned} \tag{4.82}$$

elde edilir ve düzenlendiğinde ayırt edilmeden önceki hali bulunur.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(T_g) + \frac{\partial}{\partial y}(U_g T_g) = & \frac{h_{pg}}{\rho_h C_g \varepsilon_g} \left(\frac{2}{Bi+2} \right) (T_R - T_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} + \\
& - \frac{\rho_h k_{pg}}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (X_{py} - X_g) \frac{6\varepsilon_p}{d_p} C_{bu} \left(\frac{2}{Bi+2} \right) (T_R - T_g) + \frac{H_{gb} \varepsilon_b}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (T_b - T_g) \\
& + \frac{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (X_b - X_g) C_{bu} (T_b - T_g) - \frac{h_{gd}}{\rho_h C_g \varepsilon_g} (T_g - T_d) \frac{(1-\varepsilon_p)}{d_t}
\end{aligned} \tag{4.83}$$

Enerji denklemi de kütle denklemi ile aynı tipte olduğundan, benzer kabuller yapılarak denklem ayırt edilirse enerji denkleminin son hali şu şekilde olacaktır

$$\begin{aligned}
& T_{gn}^{i+1} \left[1 + \frac{U_g \Delta t}{\Delta y} + \frac{12h_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\rho_h C_g \varepsilon_g d_p (Bi+2)} + \frac{12k_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\varepsilon_g C_g d_p (Bi+2)} C_{bu} (X_{py}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) \right] \\
& + \frac{H_{gp} \varepsilon_b \Delta t}{\rho_h \varepsilon_g C_g} + \frac{K_{gb} \varepsilon_b \Delta t}{\varepsilon_g C_g} C_{bu} (X_{bn}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) + \frac{h_{gd} \Delta t (1-\varepsilon_p)}{\rho_h \varepsilon_g C_g d_t} \\
& - T_{gn-1}^{i+1} \left[\frac{U_g \Delta t}{\Delta y} \right] - T_{gn}^i - T_{bn}^{i+1} \left[\frac{H_{gp} \varepsilon_b \Delta t}{\rho_h \varepsilon_g C_g} + \frac{K_{gb} \varepsilon_b \Delta t}{C_g \varepsilon_g} C_{bu} (X_{bn}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) \right] \\
& - T_{Rn}^{i+1} \left[\frac{12h_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\rho_h C_g \varepsilon_g d_p (Bi+2)} - \frac{12k_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\varepsilon_g C_g d_p (Bi+2)} C_{bu} (X_{py}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) \right] \\
& - T_{dn}^{i+1} \left[\frac{h_{gd} \Delta t (1-\varepsilon_p)}{\rho_h C_g \varepsilon_g d_t} \right] = 0
\end{aligned} \tag{4.84}$$

4.2.2. Baloncuk fazı

Baloncuk fazının enerji ve kütle denklemleri gaz fazında olduğu gibi hiperbolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Baloncuk fazının değerlendirilmesinde yine gaz fazındaki benzer kabuller yapılabilir. Kütle sakınımı denkleminin son hali 4.44 ifadesi ile verilmişti. Aşağıda yeniden yazılmıştır.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h X_b \varepsilon_b)}_{\text{zamanla kütle değişimi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(\rho_h X_b \varepsilon_b U_b)}_{\text{yükseklikle kütle değişimi}} = \underbrace{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b)}_{\text{nem geçişi ile kütle değişimi}} \quad (4.85)$$

Denklemin her iki tarafı $\rho_h \varepsilon_b$ ile bölünürse:

$$\frac{\partial}{\partial t}(X_b) + \frac{\partial}{\partial y}(X_b u_b) = K_{gb} (X_b - X_g) \quad (4.86)$$

Elde edilir. Gaz fazında olduğu gibi sonlu farklar metodu ve implicit yaklaşım ile ayırt edilmiş kütle dengesi denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$X_{bn}^{i+1} - X_{bn}^i + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} (X_{bn+1/2}^{i+1} - X_{bn-1/2}^{i+1}) = K_{gb} \Delta t (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) \quad (4.87)$$

burada gaz fazı için yapılan $n+1/2$ yerine n ve $n-1/2$ yerine $n-1$ kullanımı ile denklem düzenlenirse

$$X_{bn}^{i+1} - X_{bn}^i + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} (X_{bn}^{i+1} - X_{bn-1}^{i+1}) = K_{gb} \Delta t (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) \quad (4.88)$$

ve buradan baloncuk fazı kütle denklemi ayırt edilmiş nihai bağıntısı aşağıdaki gibi elde edilmiştir

$$X_{bn}^{i+1} \left[1 + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} + K_{gb} \Delta t \right] - X_{bn-1}^{i+1} \left[\frac{u_b \Delta t}{\Delta y} \right] - X_{bn}^i - X_{gn}^{i+1} [K_{gb} \Delta t] = 0 \quad (4.89)$$

Enerji dengesi için nihai ifade 4.51 de verilmişti aşağıda tekrar gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h C_b \varepsilon_b T_b)}_{\text{zamanla entalpi değişimi}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}(\rho_h C_b \varepsilon_b U_b T_b)}_{\text{yükseklikle entalpi değişimi}} = \\
\underbrace{H_{gb} \varepsilon_b (T_g - T_b)}_{\text{ısı geğişi}} + \underbrace{\rho_h K_{gb} \varepsilon_b (X_g - X_b) C_{bu} (T_g - T_b)}_{\text{nem ile entalpi geğişi}}
\end{aligned} \tag{4.90}$$

denklemin her iki tarafı $\rho_h C_b \varepsilon_b$ ile bölündüğünde

$$\frac{\partial}{\partial t}(T_b) + \frac{\partial}{\partial y}(U_b T_b) = \frac{H_{gb}}{\rho_h C_b} (T_g - T_b) + \frac{K_{gb}}{C_b} (X_g - X_b) C_{bu} (T_g - T_b) \tag{4.91}$$

elde edilir ve ayırt edilmiş biçimi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$T_{bn}^{i+1} - T_{bn}^i + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} (T_{bn}^{i+1} - T_{bn-1}^{i+1}) = \frac{H_{gb} \Delta t}{\rho_h C_b} (T_{gn}^{i+1} - T_{bn}^{i+1}) + \frac{K_{gb} \Delta t}{C_b} (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) C_{bu} (T_{gn}^{i+1} - T_{bn}^{i+1}) \tag{4.92}$$

ve buradan bilinmeyenlere göre düzenlenirse

$$\begin{aligned}
T_{bn}^{i+1} \left[1 + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} + \frac{H_{gb} \Delta t}{\rho_h C_b} + \frac{K_{gb} \Delta t}{C_b} (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) C_{bu} \right] - T_{bn-1}^{i+1} \left[\frac{u_b \Delta t}{\Delta y} \right] - T_{bn}^i \\
- T_{gn}^{i+1} \left[\frac{H_{gb} \Delta t}{\rho_h C_b} + \frac{K_{gb} \Delta t}{C_b} (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) C_{bu} \right] = 0
\end{aligned} \tag{4.93}$$

4.2.3. Katı faz (fındık)

Katı fazdan elde edilen denklemler parabolik tip kısmi diferansiyel denklemlerdir. Katı faz denklemlerini ayırt etmek için hiperbolik sistemde olduğu gibi burada da implicit metod kullanılmıştır. Katı faz ile gaz fazı denklemleri arasındaki diğer bir fark ise kullanılan koordinat sistemidir. Fındık partikülleri içi boş küresel cisimler olarak kabul edilecektir, böylece sınır şartları iç boşluk yüzeyi ve dış yüzeyde yazılacaktır. Partikülün küresel yapısından ötürü, katı faz denklemlerinde küresel koordinatların kullanılması gerekir. Küresel koordinatlarda denklemleri ayırt etmek

için, tek boyutlu kütle difüzyon denklemi ele alınmıştır. Sınır şartları yerine konularak elde edilen 3 farklı denklemin ayırt edilmiş ifadeleri bulunacaktır.

Kütle sakınımı ele alınırsa ürün dış yüzeyi için 4.60a ifadesi elde edilmişti. Yeniden yazılırsa

$$\rho_p \Delta V_R \frac{\partial M_p}{\partial t} = \rho_p D A_{R/R-1} \frac{\partial M_p}{\partial r} - \rho_h k_{gp} A_{py} (X_{py} - X_g) \quad (4.94)$$

denklemin her iki tarafını $\rho_p \Delta V_R$ ye bölersek

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \frac{\rho_p D A_{R/R-1}}{\rho_p \Delta V_R} \frac{\partial M_p}{\partial r} - \frac{\rho_h k_{gp} A_{py}}{\rho_p \Delta V_R} (X_{py} - X_g) \quad (4.95)$$

elde edilir, buradan alan ve hacim ifadeleri yerine yazılırsa

$$\frac{\partial M_R}{\partial t} = \frac{D(r_d - \Delta r)^2}{\Delta r \left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \frac{\partial M_R}{\partial r} - \frac{\rho_h k_{gp}}{\rho_p \Delta r} \frac{r_d^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} (X_{py} - X_g) \quad (4.96)$$

bulunur ve ayırt edilmiş hali ise aşağıdaki gibidir

$$\begin{aligned} M_R^{i+1} - M_R^i - \frac{D \Delta t}{\Delta r^2} \left[\frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] (M_{R-1}^{i+1} - M_R^{i+1}) \\ + \frac{\rho_h k_{gp} \Delta t}{\rho_p \Delta r} \frac{r_d^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) = 0 \end{aligned} \quad (4.97)$$

ifade düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
& M_R^{i+1} \left[1 + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - M_{R-1}^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - M_R^i \\
& + \frac{\rho_h}{\rho_p} \frac{k_{gp}\Delta t}{\Delta r} \frac{r_d^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) = 0
\end{aligned} \tag{4.98}$$

elde edilir.

Orta düğümlerde denklem 4.60c de verilmişti aşağıda tekrar yazılmıştır.

$$\rho_p \Delta V_m \frac{\partial M_p}{\partial t} = \rho_p DA_{sol} \frac{\partial M_p}{\partial r} + \rho_p DA_{sağ} \frac{\partial M_p}{\partial r} \tag{4.99}$$

denklemin her iki tarafını $\rho_p \Delta V_m$ ye bölersek

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = \frac{DA_{sol}}{\Delta V_m} \frac{\partial M_p}{\partial r} + \frac{DA_{sağ}}{\Delta V_m} \frac{\partial M_p}{\partial r} \tag{4.100}$$

elde edilir, buradan alan ve hacim ifadeleri yerine yazılırsa

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = D \frac{\left(r_m - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{r_m^2 \Delta r} \frac{\partial M_p}{\partial r} + D \frac{\left(r_m + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{r_m^2 \Delta r} \frac{\partial M_p}{\partial r} \tag{4.101}$$

bulunur ve ayırt edilmiş hali ise aşağıdaki gibidir

$$\begin{aligned}
M_m^{i+1} - M_m^i &= D \frac{\Delta t \left(r_m - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{r_m^2 \Delta r^2} (M_{m-1}^{i+1} - M_m^{i+1}) + D \frac{\Delta t \left(r_m + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{r_m^2 \Delta r^2} (M_{m+1}^{i+1} - M_m^{i+1})
\end{aligned} \tag{4.102}$$

bilinmeyenlere göre düzenlenirse sonuç denklemi takip ettiği gibi olacaktır.

$$\begin{aligned}
& M_m^{i+1} \left[1 + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \left(2 + \frac{\Delta r^2}{2r_m^2} \right) \right] - M_{m-1}^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_m - \frac{\Delta r}{2} \right)^2}{r_m^2} \right] \\
& - M_{m+1}^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_m + \frac{\Delta r}{2} \right)^2}{r_m^2} \right] - M_m^i = 0
\end{aligned} \tag{4.103}$$

İç boşluk yüzeyinde ise ifade 8.60b ile verilmişti, aşağıda yeniden gösterilmiştir.

$$\rho_p \Delta V \frac{\partial M_p}{\partial t} = 0 - \rho_p D A_p \frac{\partial M_p}{\partial r} \tag{4.104}$$

hacim ve alan ifadeleri yerine konulup ayırt edildiğinde nihai ifade elde edilir.

$$M_0^{i+1} \left[1 + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_{iç} + \Delta r \right)^2}{\left(r_{iç} + \frac{\Delta r}{2} \right)^2} \right] - M_1^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_{iç} + \Delta r \right)^2}{\left(r_{iç} + \frac{\Delta r}{2} \right)^2} \right] - M_0^i = 0 \tag{4.105}$$

Enerji sakınımı ifadesi de katı faz kütle sakınımına benzer biçimde düzenlenecektir.

Ürün dış yüzeyinde ifade 4.69 ile verilmişti. Aşağıda yeniden çıkarılmıştır.

$$\begin{aligned}
\rho_p \Delta V_R C_p \frac{\partial (T_p)}{\partial t} = & \lambda_p A_{R-1/R} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \rho_p D A_{R-1/R} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort} + h_{pg} A_{py} (T_g - T_{py}) \\
& - \rho_h k_{gp} A_{py} b (X_{py} - X_g)
\end{aligned} \tag{4.106}$$

denklemin her iki tarafı $\rho_p C_p \Delta V_R$ ile bölünürse

$$\begin{aligned} \frac{\partial(T_R)}{\partial t} = & \frac{\lambda_p A_{sol}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \frac{\partial T_{R-1/R}}{\partial r} + \frac{\rho_p D A_{R-1/R} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \\ & + \frac{h_{pg} A_{py}}{\rho_p \Delta V_R C_p} (T_g - T_{py}) - \frac{\rho_h k_{gp} A_{py} b}{\rho_p \Delta V_R C_p} (X_{py} - X_g) \end{aligned} \quad (4.107)$$

$T_{py} = T_g \left(\frac{Bi}{Bi+2} \right) + T_R \left(\frac{2}{Bi+2} \right)$ daha önce bulunmuş olan bu ifade yerine konulursa

$$\begin{aligned} \frac{\partial(T_R)}{\partial t} = & \frac{\lambda_p A_{sol}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \frac{\partial T_{R-1/R}}{\partial r} + \frac{\rho_p D A_{R-1/R} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \\ & + \frac{h_{pg} A_{py}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \left(T_g - \left(T_g \left(\frac{Bi}{Bi+2} \right) + T_R \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \right) \right) - \frac{\rho_h k_{gp} A_{py} b}{\rho_p \Delta V_R C_p} (X_{py} - X_g) \end{aligned} \quad (4.108)$$

elde edilir ve düzenlenirse

$$\begin{aligned} \frac{\partial(T_R)}{\partial t} = & \frac{\lambda_p A_{sol}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \frac{\partial T_{R-1/R}}{\partial r} + \frac{\rho_p D A_{R-1/R} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \\ & + \frac{h_{pg} A_{py}}{\rho_p \Delta V_R C_p} \left(\frac{2}{Bi+2} \right) (T_g - T_R) - \frac{\rho_h k_{gp} A_{py} b}{\rho_p \Delta V_R C_p} (X_{py} - X_g) \end{aligned} \quad (4.109)$$

bulunur, buradan alan ifadeleri de yerine yazılıp sadeleştirme yapılarak ayırt edilmiş ifade türetilirse

$$\begin{aligned} T_R^{i+1} - T_R^i = & (T_{R-1}^{i+1} - T_R^{i+1}) \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2} \right)^2} + \\ & (M_{R-1}^{i+1} - M_R^{i+1}) \frac{D \Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2} \right)^2} \left(\frac{T_{R-1}^{i+1} + T_R^{i+1}}{2} \right) + \\ & \frac{h_{pg} \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r} \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2} \right)^2} (T_g^{i+1} - T_R^{i+1}) - \frac{\rho_h k_{gp} b \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2} \right)^2} \end{aligned} \quad (4.110)$$

elde edilir.

$$Fo = \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2}, \quad Bi = \frac{h_{gp} \Delta r}{\lambda} \quad \text{olarak tanımlanır ve } Fo * Bi = \frac{h_{pg} \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r} \quad \text{olarak bulunur}$$

bu bağıntılar denklemde yerine yazılır ve düzenlenirse ürün yüzeyi için nihai ifade

$$\begin{aligned} T_R^{i+1} & \left[1 + Fo \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + Fo Bi \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} - (M_{R-1}^{i+1} - M_R^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] \\ & - T_{R-1}^{i+1} \left[Fo \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_{R-1}^{i+1} - M_R^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - T_R^i \\ & - T_g^{i+1} \left[Fo Bi \left(\frac{2}{Bi+2} \right) \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - \frac{\rho_h k_{gp} b \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r} \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) = 0 \end{aligned} \quad (4.111)$$

elde edilir. Ürün orta noktaları için ifade aşağıda gösterildiği gibi 4.72 de verilmişti.

$$\begin{aligned} \rho_p \Delta V_n C_p \frac{\partial(T_p)}{\partial t} &= \lambda_p A_{sol} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \lambda_p A_{sağ} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \\ & \rho_p D A_{n-1/n} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T - \rho_p D A_{n/n+1} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort} \end{aligned}$$

denklemin her iki tarafı $\rho_p \Delta V_n C_p$ ile bölünürse

$$\begin{aligned} \frac{\partial(T_p)}{\partial t} &= \frac{\lambda_p A_{sol}}{\rho_p \Delta V_n C_p} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \frac{\lambda_p A_{sağ}}{\rho_p \Delta V_n C_p} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \\ & \frac{\rho_p D A_{n-1/n}}{\rho_p \Delta V_n C_p} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort} - \frac{\rho_p D A_{n/n+1}}{\rho_p \Delta V_n C_p} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{ort} \end{aligned} \quad (4.112)$$

elde edilir, ayırt edilmiş ifade ise

$$\begin{aligned}
 T_n^{i+1} - T_n^i &= (T_{n-1}^{i+1} - T_n^{i+1}) \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} + (T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1}) \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} + \\
 &+ (M_{n-1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D \Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \left(\frac{T_{n-1}^{i+1} + T_n^{i+1}}{2}\right) - (M_n^{i+1} - M_{n+1}^{i+1}) \frac{D \Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \left(\frac{T_{n+1}^{i+1} + T_n^{i+1}}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4.113}$$

Fo boyutsuz sayısı yerine yazılıp ifade düzenlenirse

$$\begin{aligned}
 T_n^{i+1} &\left[1 + \text{Fo} \left(2 + \frac{\Delta r^2}{2 r_n^2} \right) - (M_{n-1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right. \\
 &\quad \left. + (M_{n+1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right] \\
 - T_{n-1}^{i+1} &\left[\text{Fo} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} + (M_{n-1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right] \\
 - T_{n+1}^{i+1} &\left[\text{Fo} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} + (M_n^{i+1} - M_{n+1}^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right] - T_n^i = 0
 \end{aligned}
 \tag{4.114}$$

Ürün iç boşluk sınırındaki ifade ise 4.71 bağıntısında verildiği gibidir, aşağıda yeniden çıkarılmıştır.

$$\rho_p \Delta V_1 C_p \frac{\partial (T_p)}{\partial t} = \lambda_p A_{1/2} \frac{\partial T_p}{\partial r} - \rho_p D A_{1/2} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{\text{ort}}$$

buradan ifade $\rho_p \Delta V_1 C_p$ ile bölünürse

$$\frac{\partial(T_p)}{\partial t} = \frac{\lambda_p A_{1/2}}{\rho_p \Delta V_1 C_p} \frac{\partial T_p}{\partial r} - \frac{\rho_p D A_{1/2}}{\rho_p \Delta V_1 C_p} \frac{\partial M_p}{\partial r} C_p T_{\text{ort}} \quad (4.115)$$

elde edilir. Ayırt edilmiş durum ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} T_1^{i+1} - T_1^i &= (T_2^{i+1} - T_1^{i+1}) \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \\ &- \left(\frac{T_1^{i+1} + T_2^{i+1}}{2}\right) (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \end{aligned} \quad (4.116)$$

$$\begin{aligned} T_1^{i+1} &\left[1 + \frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] + \\ T_2^{i+1} &\left[-\frac{\lambda_p \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - T_1^i = 0 \end{aligned} \quad (4.117)$$

Fo sayısı denklemde yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir

$$\begin{aligned} T_1^{i+1} &\left[1 + Fo \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] + \\ T_2^{i+1} &\left[-Fo \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D \Delta t}{2 \Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - T_1^i = 0 \end{aligned} \quad (4.118)$$

4.3. Çözüm Yöntemi

Akışkan yatakta kurutma prosesi incelendiğinde, oluşan denklemler iki çeşittir: Gaz fazı için denklemler birinci mertebeden hiperbolik kısmi diferansiyel denklemler, katı faz için ise ikinci mertebeden parabolik kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu farklılıktan ötürü çözüm yönteminin seçimi çok önemlidir. Elde edilen denklemler lineer cebri denklemlerdir, çözüme ulaşmak için iyi bir metod belirlemek gerekir. Akışkan yatak, gazın özelliklerinde eksenel yönde değişikliklerin hesaba katılması için yatağın geometrisi de göz önüne alınarak, sayılı kontrol hacimlere bölünür. Katı faz da (fındık), partikülün içindeki değişikliklerden ötürü sonlu kontrol hacimlere bölünür.

Tek boyutlu ayırt edilmiş denklemlerin çözümü Gauss eliminasyon yöntemi ile sağlanabilmektedir. Ayırt edilerek elde edilen denklemlerden üç köşegenli (three diagonal) matris sistemleri oluşmaktadır. Bu tip denklemlerin matris çözümlerinde Gauss Eliminasyon yöntemi başarıyla uygulanmaktadır, bu yöntemin uygulanmasında Thomas algoritması olarak adlandırılan çözüm algoritmaları türetilmektedir. [59] Üç köşegenli matris oluşturan sistemlerin çözümlenmesinde Matlab, Maple gibi hazır yazılımlar kullanılabildiği gibi C#Sharp, Fortran vb diğer uygun programlama dillerinde özel yazılım geliştirmekte mümkün olmaktadır [60]. Gauss eliminasyon yönteminin üç köşegenli matris oluşturan sistemlere uygulanmasında oluşan Thomas algoritmasının farklı programlama dillerinde uygulanması bulunmaktadır. Denklem sistemlerinin eş zamanlı çözümlenmesi gerekmektedir. Tüm bu hususlar göz önüne alınarak çözüm için C#Sharp dilinde Gauss eliminasyon yöntemi kullanılarak ve Thomas algoritmasına benzer tarzda çözümleme yapan bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu programda kullanılan denklemler ve programın akış diyagramı Ek A ve B'de mevcuttur. Öncelikle çözüm yönteminin dayanmış olduğu partikül yüzeyindeki hava nemi X_{py} nin belirlenmesi gerekmektedir. X_{py} kurutucu gaz sıcaklığı, ürün nemi ve dolayısıyla kurutma süresinden bağımlı olmaktadır. $X_{py} = f (T , X_p , t)$ şeklinde tanımlanabilmektedir. Burada X_{py} nin zamanla eksponansiyel biçimde azalacağı öngörülmekte ve beklenmektedir. X_{py} değeri her beş dakikada bir alınmış olan, deney numunelerinden elde edilen ürün nem değerlerinin kullanılmasıyla, iterasyon yoluyla belirlenmiştir.

Programda önce verilen şartlara göre sırasıyla her düğüm noktasındaki değerler hesaplanmaktadır..Başlangıç değerleri bilinmektedir yada gerçeğe yakın tahminlerle çözüme başlanmaktadır. Tüm denklemler baloncuk kütle denkleminde başlayarak, gaz ile devam etmekte ve en son katı partiküllerin kütle ve sıcaklık değişimlerinin bulunmasıyla neticelenmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde fındıkta kavurma prosesi boyunca yalnızca azalan kurutma hızlı periyodun söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Azalan kurutma hızlı periyotda kurutma hızının azalımı partikül yüzeyindeki hava mutlak neminin sürekli olarak azalmasıyla simüle edilmektedir. D difüzyon katsayısı 100 - 160 °C sıcaklık aralığında 2.3×10^{-7} ile 11.8×10^{-7} aralığında değişmektedir İfade Özdemir tarafından aşağıdaki biçimde verilmiştir. [61].

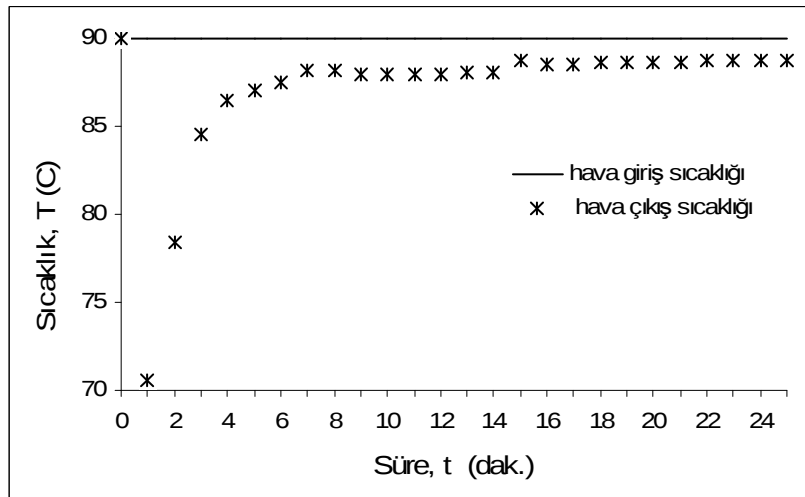
$$D=0,014 \cdot e^{(-4099,8/T)}$$

Kütle transfer katsayısı k_{gp} nin baloncuk oluşumlu akışkan yataklardaki değişimleri için birinci kurutma hızlı periyot da 0.0145-0.021 m/s, ve ikinci kurutma hızlı periyot da ise 0.0002-0.0037 m/s aralığında değerler verilmektedir.[62]. Burada partikül yüzeyindeki nem değişimi X_{py} değerlerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır ve muhtelif zaman aralıklarında yukarıda değinildiği gibi deney sonuçları ile kıyaslamak suretiyle iterasyon yapılarak belirlenmiştir. Çözümde buna göre bulunmaktadır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE MODEL VERİLERİ İLE KİYASLANMASI

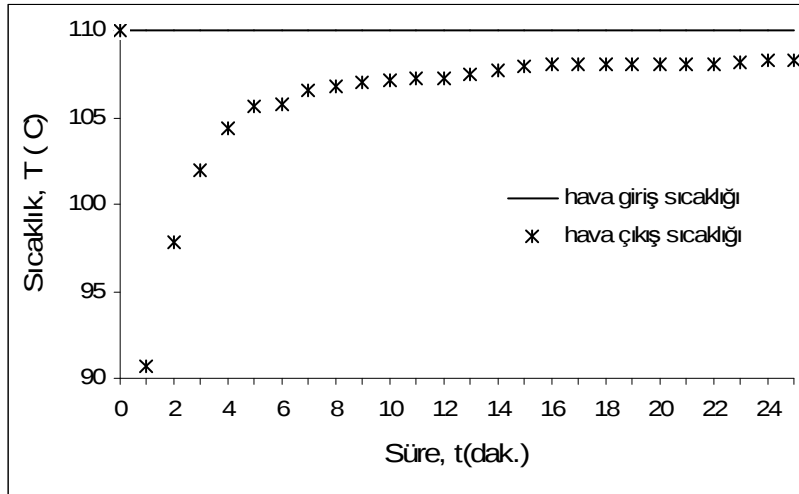
Fındık kavurma prosesinin akışkan yatakta gerçekleştirilmesi 2004 yılı temmuz ve ağustos ayları boyunca eski fındık olarak adlandırılabilen 2003 yılı fındığı kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin seçimi özenle yapılmıştır ve tane büyüklüklerinin birbirine yakın olmasına gayret gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar Excel programında grafikler haline dönüştürülmüştür. Deney sıcaklıkları: özellikle kavurma işleminin genellikle yapıldığı klasik konveyörlü kurutma fırınlarında sıkça tercih edilen sıcaklıklar gözönüne alınarak seçilmiştir. Akışkan yatağın oldukça iyi izole edilmesi temin edilmiştir, bu vesile ile yatak yüksekliği boyunca sıcaklık değişimi ihmal edilebilir mertebelerde tutulmaya çalışılmıştır.

5.1 Akışkan Yatak Havası İçin Deney Sonuçları



Şekil 5..1. Deney havası giriş çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 90 °C)

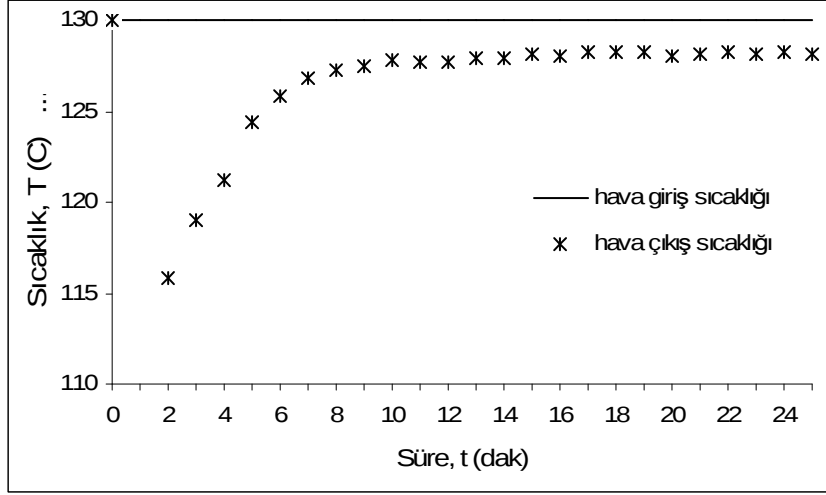
Şekil 5.1 de görüldüğü gibi öncelikli olarak ürünle yüklenmemiş boş yatakta hava sıcaklığı 90°C ye getirilmiştir, bu aşamadan sonra kısa süre içinde ve ani olarak ortam sıcaklığında bulunan ürünün yatak içine yüklenmesi gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki eğriden takip edildiği gibi ürünlerin yüklenme sıcaklığı deney setine girmeden önce 26°C olduğundan hava çıkış sıcaklığı ilk dakika içinde ani olarak düşmüştür. Bu andan itibaren kısa süre içinde ürünün sıcaklığının artması gözlenmiştir. Bundan sonra ise hava çıkış ile giriş sıcaklığı arasındaki fark zaman ilerledikçe gittikçe azalmıştır. Ürün içindeki nem azalmasına paralel olarak hava giriş ve çıkış sıcaklıkları farkı birbirine yaklaşmaya devam etmiş ve aradaki fark ürün nemi azalması ile gittikçe fark edilemez bir duruma ulaşmıştır. Bu deneyde fark edilen bir diğer nokta ürünün yatağa yüklenmesi ile birlikte hava debisinde kısmen bir azalma olması ve bunun ise hava giriş sıcaklığını bir miktar artırması olmaktadır dolayısıyla hava giriş ve çıkış sıcaklıkları birlikte başlangıç şartlarına göre artma eğilimi gösterecektir. Bunun bertaraf edilmesi ön ısıtıcı resistanslarından uygun olanını devre dışı bırakmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Aynı durum diğer deneylerde de benzer şekilde gözlenmiştir ve bertaraf edilmiştir.



Şekil 5.2. Deney havası giriş ve çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 110°C)

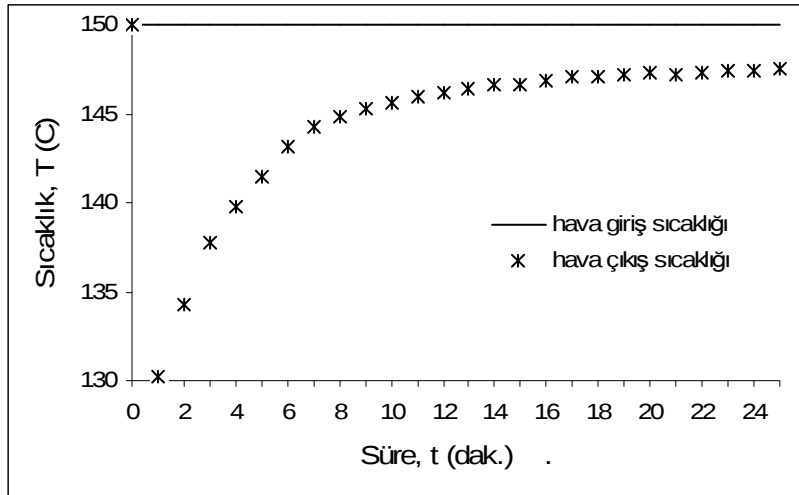
Yukarıda Şekil 5.2 de görüldüğü gibi başlangıçta 110°C nin biraz altında ayarlanan hava giriş sıcaklığı, ortam sıcaklığına haiz iç fındık partiküllerinin yatağa yüklenmesiyle birlikte hava debisindeki azalmanın sonucu olarak giriş havası

sıcaklığında cüzi artış söz konusu olmuştur. Bunu bertaraf etmek amacıyla ön ısıtıcı kademesinden biri devre dışı bırakılmıştır. Burada deney süresi artıkça hava giriş çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın azalımı söz konusu olmaktadır. Kavurma süresi uzadıkça giriş sıcaklık arasındaki farkın değişimi deney başlangıcındaki belirginliğini gittikçe kaybetmektedir.



Şekil 5.3. Deney havası giriş ve çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 130 °C)

Şekil 5.3 den görüldüğü gibi başlangıçta 130 °C nin hemen altında rejim halinde bulunan hava giriş sıcaklığı ortam sıcaklığı 26 °C lik sıcaklığa haiz fındık içlerinin yatağa yüklenmesiyle 110 °C nin altına düşmüştür. Bu esnada yine diğer deneylerde olduğu gibi debi azalımının sonucu olarak hava giriş sıcaklığının bir müddet sonra set değerin üzerine çıktığı gözlewnmiş ve ön ısıtıcı kademe ayarlanmasından sonra set değeri civarında deneyin gelişmesi temin edilmiştir.

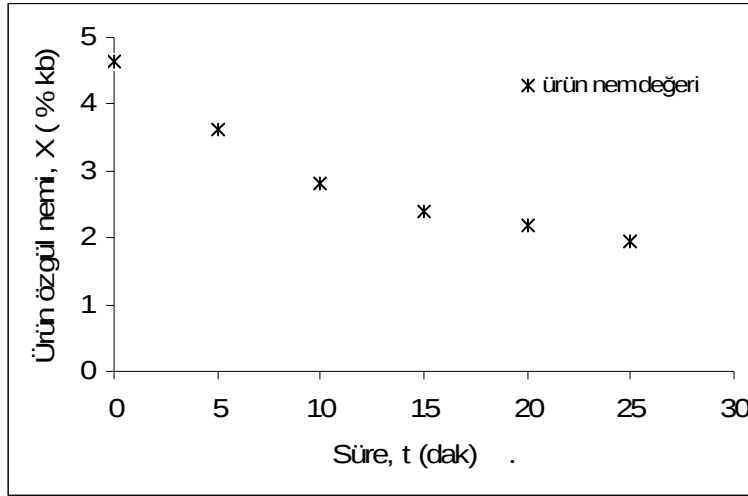


Şekil 5.4.. Deney havası giriş ve çıkış sıcaklıkları (deney sıcaklığı 150 °C)

Şekil 5.4 de görüldüğü gibi başlangıçta 150 °C olarak set edilen giriş havası sıcaklığı ortam sıcaklığında bulunan fındık içlerinin akışkan yatak sistemine yüklenmesiyle hava çıkış sıcaklığında bir miktar düşüşe neden olmaktadır. Söz konusu çıkış sıcaklığı deneyin ilk dakikasında ve bunu müteakiben 130 °C nin hemen üstünde bir değere kadar düşmüştür. Fındık partiküllerinin yüklenmesi neticesinde oluşan debi azalımı hava giriş ve çıkış sıcaklıklarının artmasına yol açmaktadır. Bunu bertaraf etmek amacıyla ön ısıtıcı kademelerinden biri kapatılmıştır. Böylece deneyin 150 °C sıcaklıkta tamamlanması gerçekleştirilmiştir. Burada özellikle kayda değer olarak hava sıcaklıkları arasındaki farkın ilk 10 dakikadan sonra oldukça az değiştiği ve sanki sabit kaldığı gözlenmektedir.

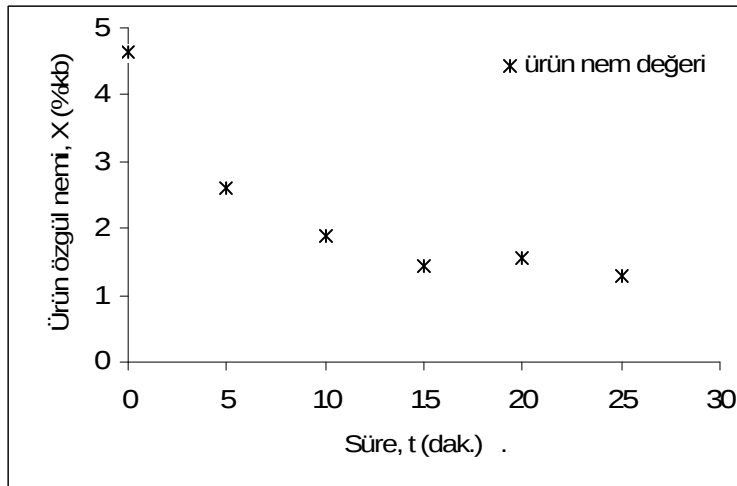
5.2. Fındık Partikülleri İçin Deney Sonuçları

90 °C sıcaklıkta ve 400 gram numunelerle yapılan ilk deney sonuçları Şekil 5.5 de görülmektedir. Buradan gözlenmekte olduğu gibi başlangıç nemlerinin çok düşük olmasından dolayı deney gelişimi azalan kurutma hızlı peryot olarak cereyan etmektedir. Kavurma işlemi için ön koşul olan % 3 nem değerine sekizinci dakikadan sonra ulaşılabilir. Ürün neminin % 1 seviyelerine gelmesi ile ürün toplam lezzeti daha da artacağından bu sıcaklıkta kavurmanın en az 20 dakika yapılması uygun olacağı anlaşılmaktadır..

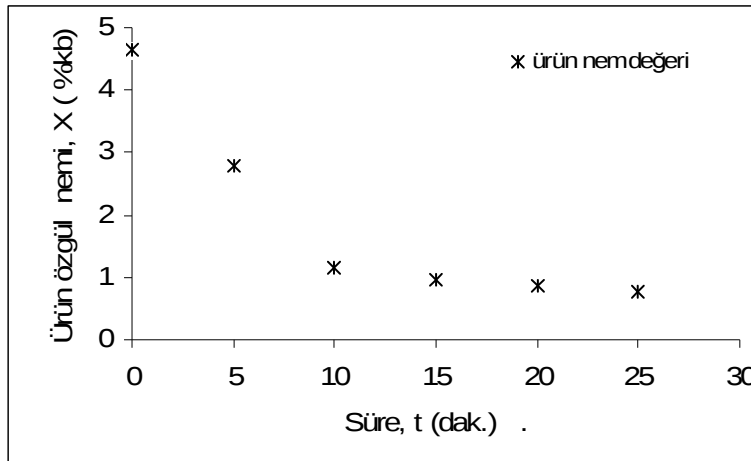


Şekil 5.5. Deneysel fındık kurutma eğrisi (sıcaklık 90 °C)

Aşağıda Şekil 5.6 dan görüldüğü gibi ürün kurutma eğrisinin temel karakteristikleri 90 °C sıcaklıkta gelişen eğriyle aynı olmaktadır ve sürekli azalan kurutma hızlı peryot olarak husule gelmektedir. Kavurma ön şartı olan % 3 lük nem oranlarına ilk 6 dakika sonunda ulaşılabilir. Bu sıcaklık için uygun kavurma zamanının belirlenmesi renk ve lezzet faktörleri ile birlikte yapılabilecektir

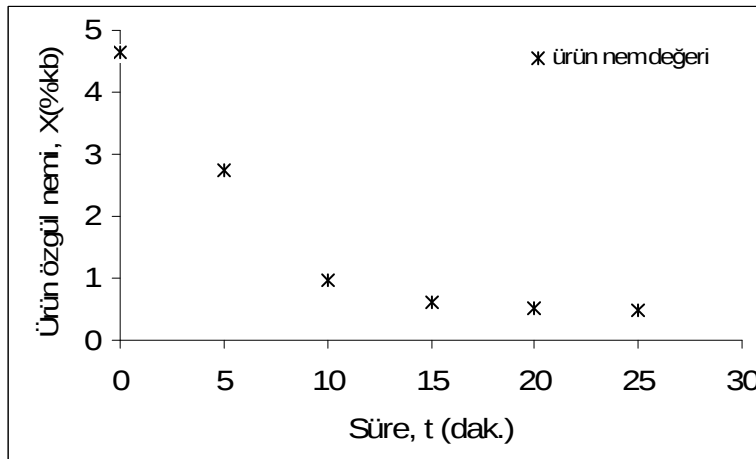


Şekil 5.6. Deneysel fındık kurutma eğrisi (sıcaklık 110 °C)



Şekil 5.7. Deneysel fındık kurutma eğrisi (sıcaklık 130 °C)

Kavurma sıcaklığı 130 °C ye çıkarıldığında ürün nemi değişimi birinci azalan kurutma hızlı ve ikinci azalan kurutma hızlı periyot olarak geliştiği gözlenmektedir. Burada belirleyici olan faktör ürün neminin belirli kritik noktalardan daha aşağıya inmesi olarak anlaşılmaktadır. Bu durum Şekil 5.7 de görülmektedir. Kavurma işlemi şartı olan % 3 lük neme ilk 5 dakikada ulaşılabilir.

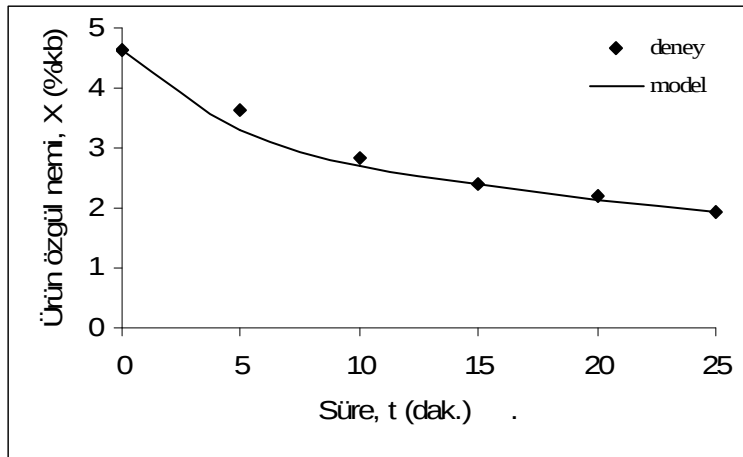


Şekil 5.8. Deneysel fındık kurutma eğrisi (sıcaklık 150 C)

Son deney olan 150 °C lik deney için ürün kurutma eğrisi Şekil 5.8 de görülmektedir. Bu sıcaklıkta kavurma nemi olan % 3 ün altına, 5 dakikadan daha az bir sürede

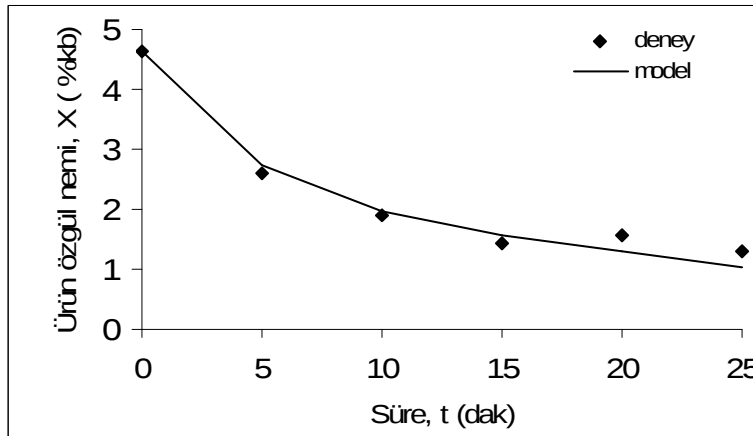
erişilmektedir. Burada gözlemlenen bir diğer husus ise 110, 130 ve 150 °C deki deneylerde ilk 5 dakikalık kurutma eğrisi gelişimlerinin birbirine yakın olmasıdır. Bu durumun ise ürün ısıtma peryodunun varlığı ve prosesi etkilemesinin bir sonucu olduğu anlaşılmaktadır.

5.3. Model Çözümleri ve Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması



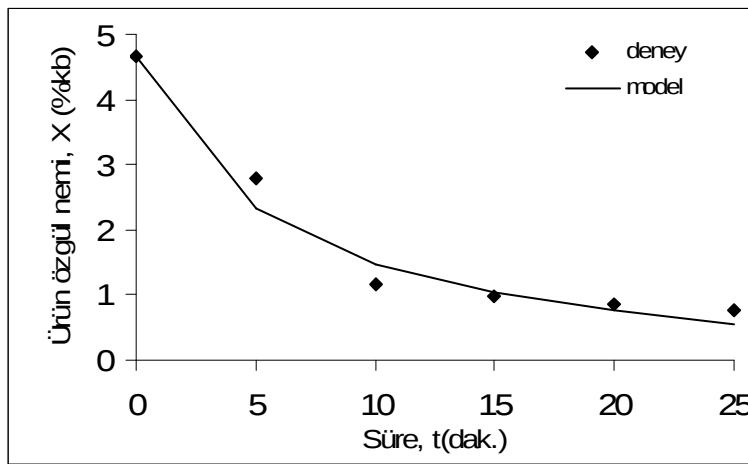
Şekil 5.9. Ürün nemi değişimi deney ve model kıyaslama (90 °C)

Yukarıda Şekil 5.9 dan görüldüğü gibi 90 °C lik kavurma deneyinden elde edilen kurutma eğrisi ile üç fazlı model çözümünün birbirine çok yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

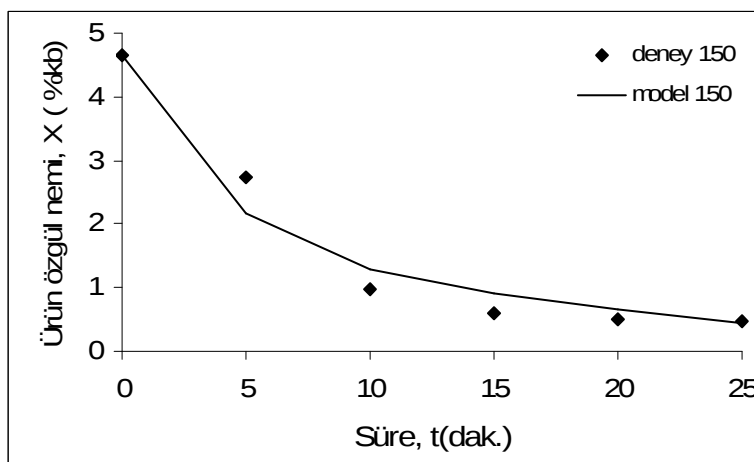


Şekil 5.10..Ürün nemi değişimi deney ve model kıyaslama (110 °C)

Yukarıda verilen Şekil 5.10 dan görülebileceği gibi deney ve model kurutma eğrisi sonuçlarının ortalama olarak birbirine çok yakın geliştiği görülmektedir. Azalan kurutma hızlı periyodun asimtotik bir biçimde geliştiği ve her bir sıcaklık değeri için var olan denge nem değerine doğru yakınsayacağı anlaşılmaktadır. Bu durum aşağıda Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 de verilen 130 °C ve 150 °C kurutma eğrileri içinde aynı biçimde olduğu gözlenmektedir.

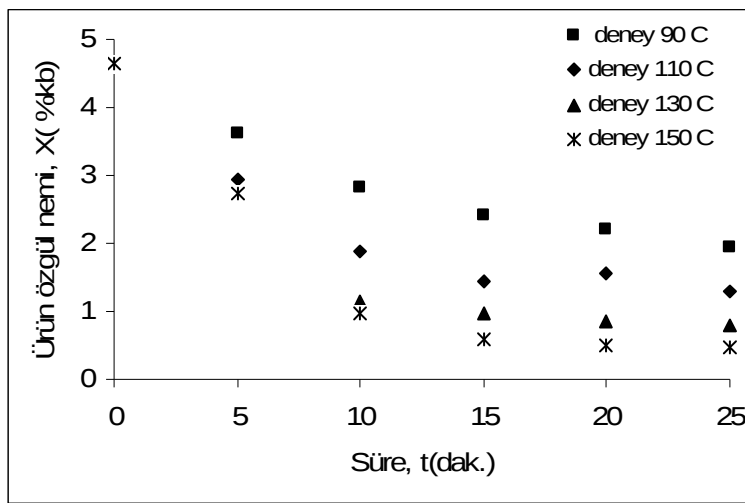


Şekil 5.11. Ürün nem değişimi deney ve model kıyaslama (130 °C)

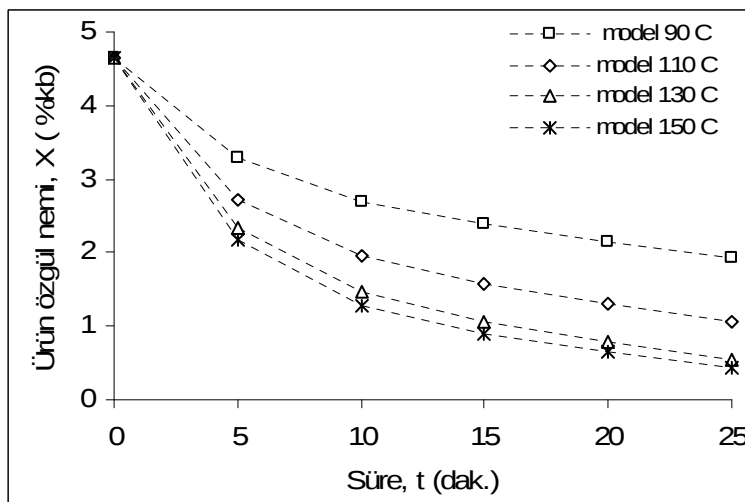


Şekil 5.12. Ürün nem değişimi deney ve model kıyaslama (150 °C)

Aşağıda Şekil 5.13 de farklı sıcaklıklarda ürün kurutma eğrilerinin değişimi deney verileri alınarak verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi her dört sıcaklık için de kavurma prosesi ilk 15 dakikasının gelişimi kurutma etkinliği bakımından son derece olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Arzu edilen son nem ve ürün renk değişimleri ve toplam lezzet parametreleri ile kavurma süreleri her bir sıcaklık için belirlenebilir. Yüksek sıcaklıklarda ilk beş dakikada ki kurutma değerlerinin birbirine yakın olması uygulama yapacak kişi ve kuruluşlara önemli parametre olabilecektir.

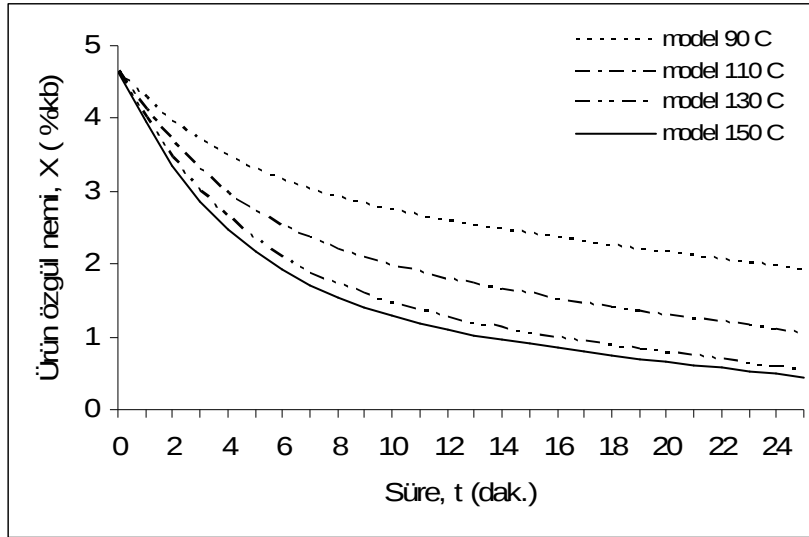


Şekil 5.13. Farklı sıcaklıklarda deneysel ürün nemleri değişimi



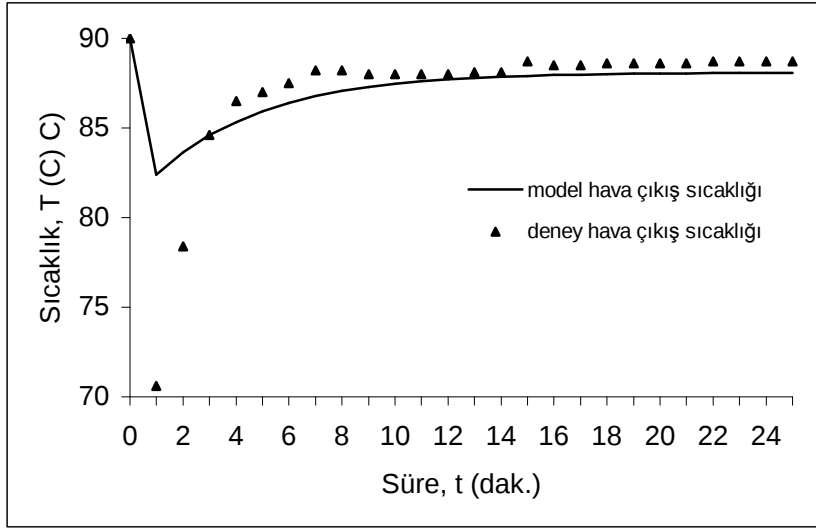
Şekil 5.14. Farklı sıcaklıklarda model ürün nemleri değişimi

Yukarıda Şekil 5.14 de deney sonuçları ile birebir kıyaslanıp görülebilmesi bakımından farklı sıcaklıklarda kurutma eğrilerinin değişiminin model verileri ile gösterimi verilmiştir.



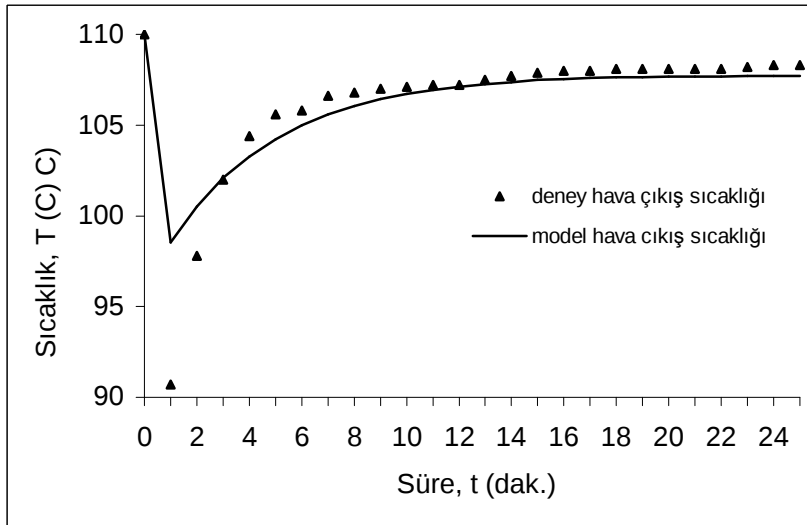
Şekil 5.15. Model çözümde ürün nem eğrileri

Yukarıda Şekil 5.15 de ürün nemlerinin farklı sıcaklıklarda zamanla değişimini model sonuçları kullanılarak verilmiştir. Sıcaklıkların yükselmesiyle kurutma eğrileri arasındaki fark azalmaktadır. Burada özellikle 130 ile 150 °C arasında önemli bir kurutma etkinliği farkı kalmaması dikkat çekmektedir.

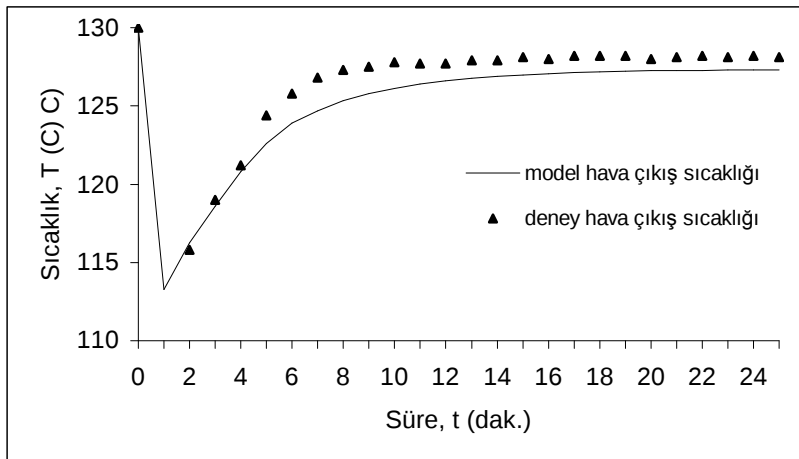


Şekil 5.16. Deney ve model (90 °C) hava çıkış sıcaklıkları değişimi

Kavurma işlemi için bilindiği gibi şartlandırılmış sıcak hava kullanılmıştır. Yatak çıkışlarında hava sıcaklıkları her dakikada bir ölçülmüştür ve bu değerlerin model çözümünde oluşan hava çıkış sıcaklıklarıyla kıyaslanması Şekil 5.16 dan başlayarak Şekil 5.17 , Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 da sırasıyla 90 , 110 , 130 ve 150 °C sıcaklıklar için verilmiştir. Deneyin başlangıç ve ilk aşamalarında yatak giriş ve çıkış hava sıcaklıkları farkı en yüksek olmaktadır ve deney gelişimi ile birlikte giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki fark azalmaktadır. Bu durumun üründen alınan nemin deneyin ilk aşamalarında en yüksek ve gittikçe değerinin düşmesinden kaynaklandığı görülmektedir.

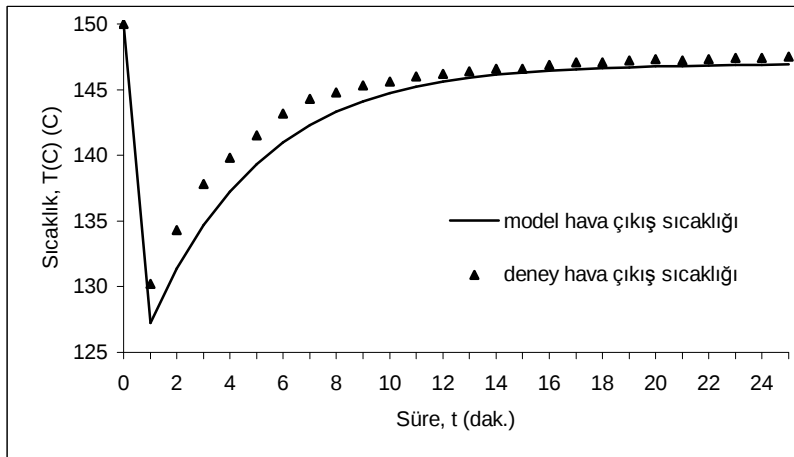


Şekil 5.17. Deney ve model (110 °C) hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi



Şekil 5.18. Deney ve model (130 °C) hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi

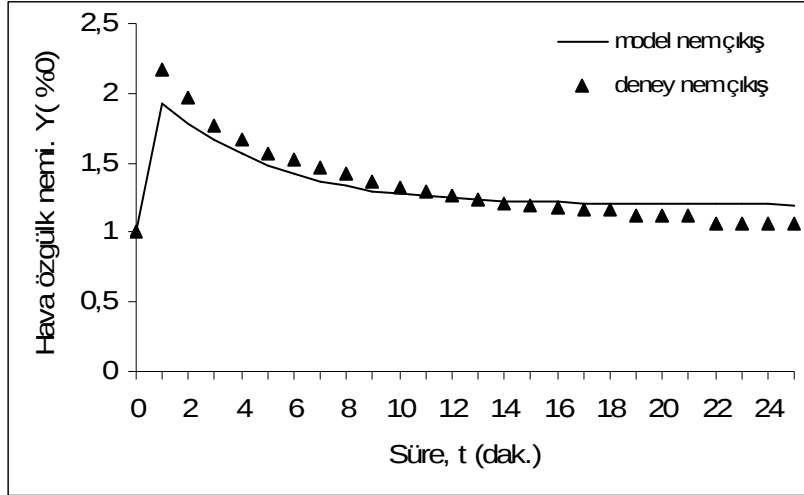
Buradaki şekillerden gözlemlenen bir diğer husus ise kavurma havası sıcaklığı arttıkça deney başlangıç aşamalarındaki hava giriş ve çıkış sıcaklık farkıda artmaktadır. Yüksek sıcaklıkta ürün ısıtma periyodunun daha hızlı ve kısa sürede gelişmesinin buna yol açtığı anlaşılmaktadır



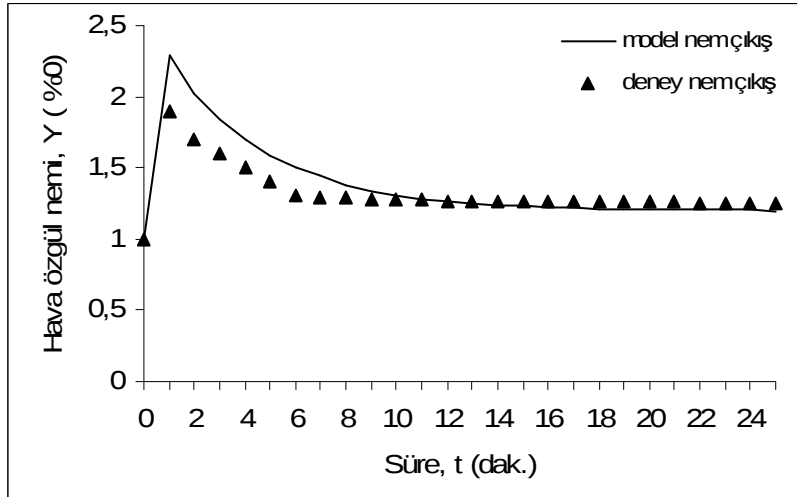
Şekil 5.19.. Deney ve model (150 °C) hava giriş ve çıkış sıcaklıkları değişimi

Aşağıda Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 de akışkan yatak çıkış hava nemlerinin zamanla değişimleri deney ve model verileri kullanılarak, birbiri ile de

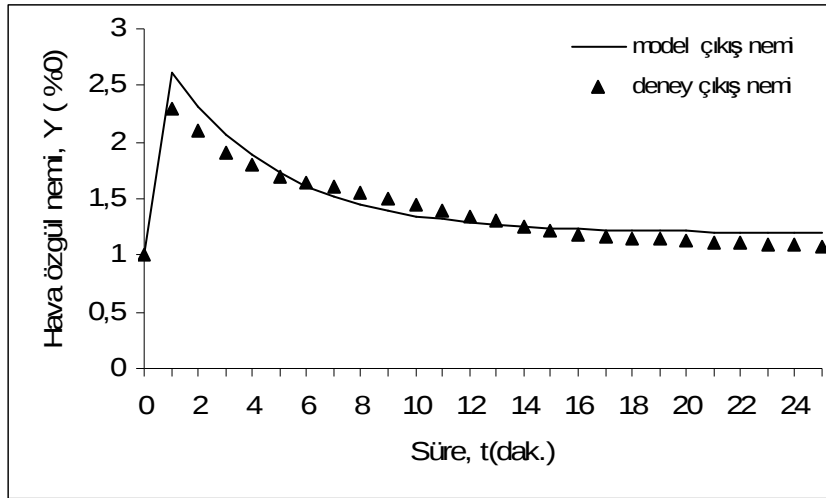
kıyaslanabilecek biçimde verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi deney ilk safhalarında yatak giriş ve çıkışında hava nemleri farkı en yüksek olmaktadır ve üründen nem alınışı azaldıkça yatak giriş ve çıkış hava nem farkı da azalacaktır.



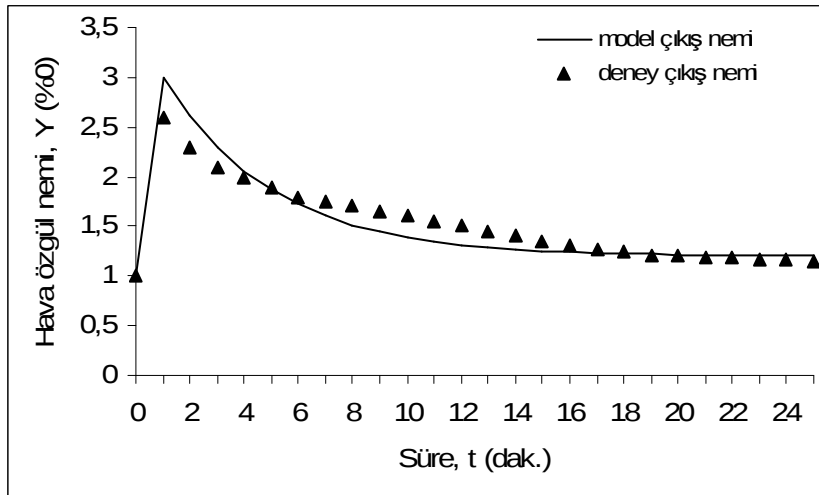
Şekil 5.20. Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 90 °C



Şekil 5.21. Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 110 °C

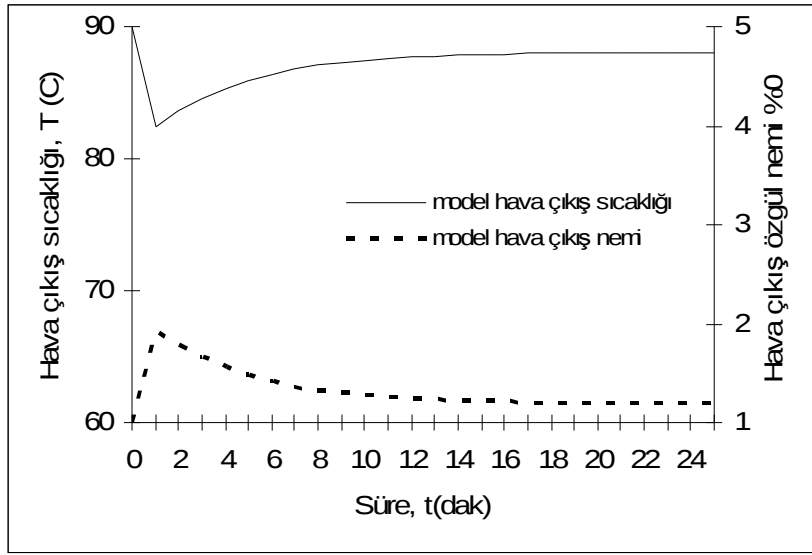


Şekil 5.22. Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 130 °C

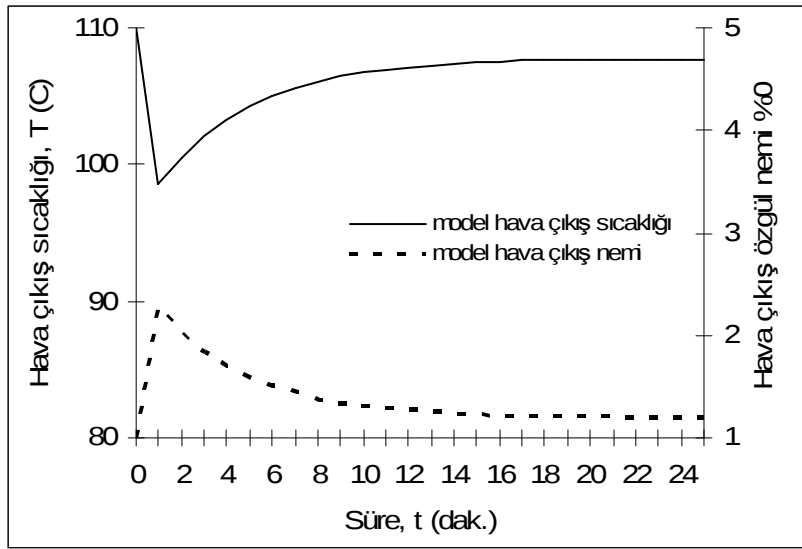


Şekil 5.23. Deney ve model hava çıkış nemleri değişimi 150 °C

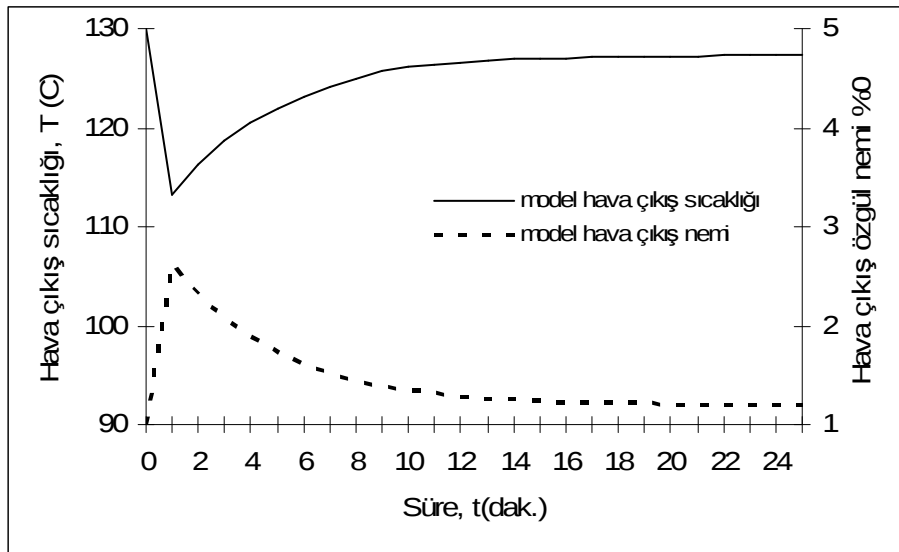
Aşağıda Şekil 5.24 – 5.27 de akışkan yatak çıkışında hava sıcaklık ve nem değerlerinin zamanla değişimleri birbiri ile kıyaslanabilecek biçimde aynı grafikte verilmiştir. Ürünün yatağa yüklenmesi ile birlikte hava çıkış sıcaklığı ani olarak düşmekte bunu takiben yavaş yavaş yükselmektedir. Hava çıkış nemi belirli bir biçimde proses boyunca azalmaktadır.



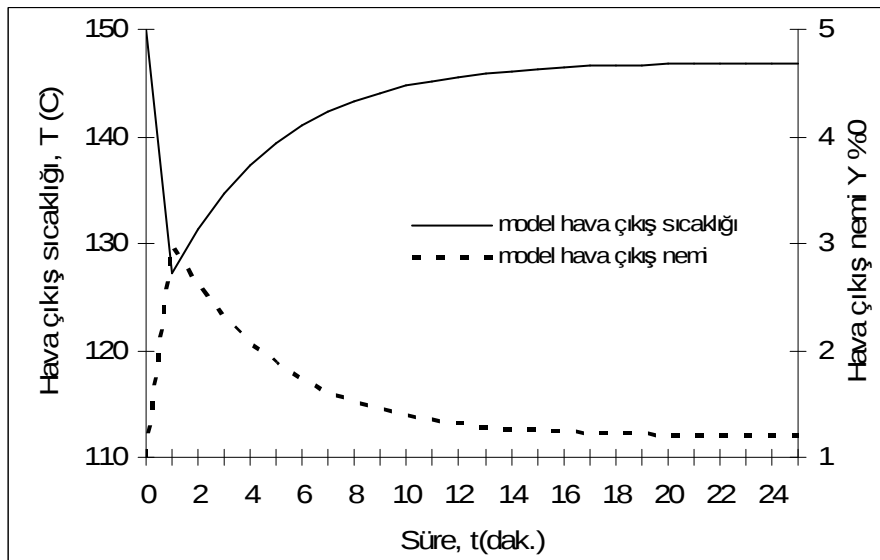
Şekil 5.24. Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 90 °C



Şekil 5.25. Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 110 °C

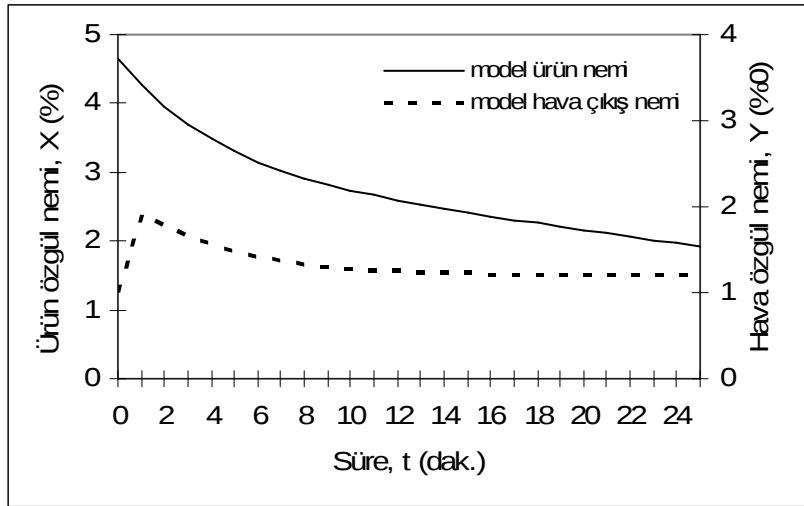


Şekil 5.26. Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 130 °C

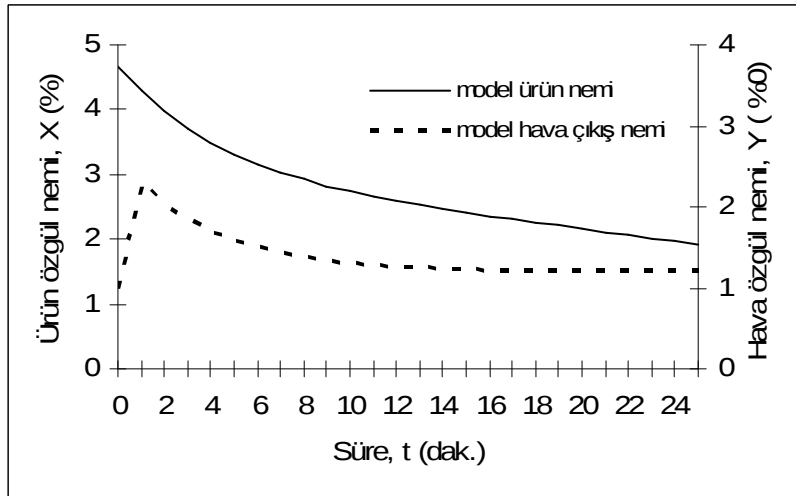


Şekil 5.27. Akışkan yatak çıkışında hava nem ve sıcaklık değişimleri 150 °C

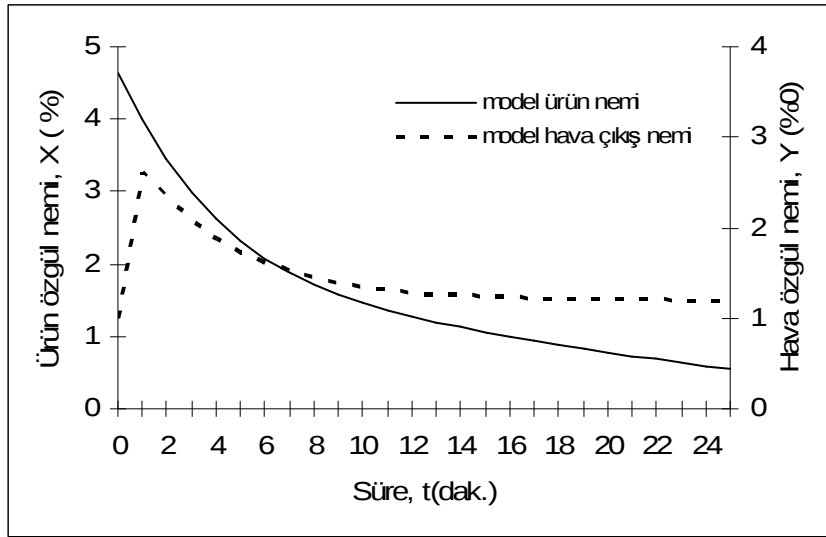
Aşağıda Şekil 5.28 – 5.31 arasında farklı deney sıcaklıkları için düzenlenmiş ürün nemi ve hava çıkış neminin değişimi aynı grafikte verilmiştir. Burada hava nemi %0 olarak verilmiştir.



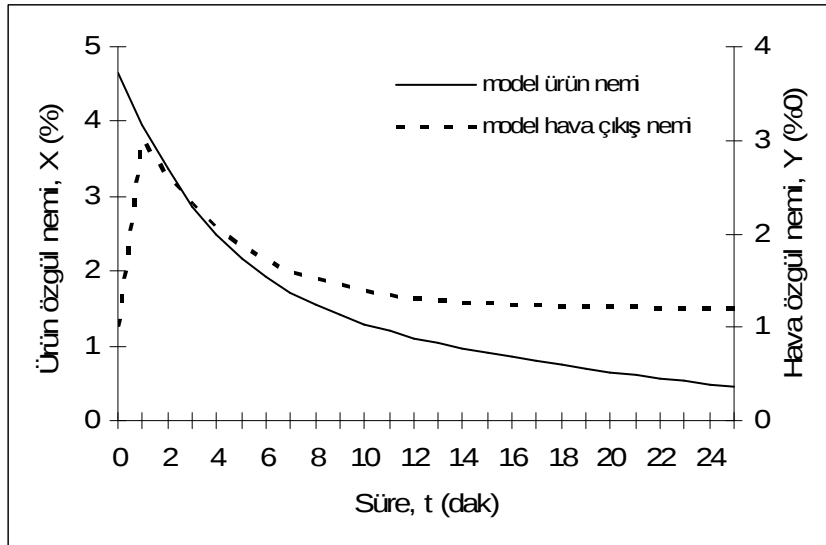
Şekil 5.28. Fındık hava çıkış nemi değişimleri 90 °C



Şekil 6.29. Fındık ve hava çıkış nemi değişimleri 110 °C

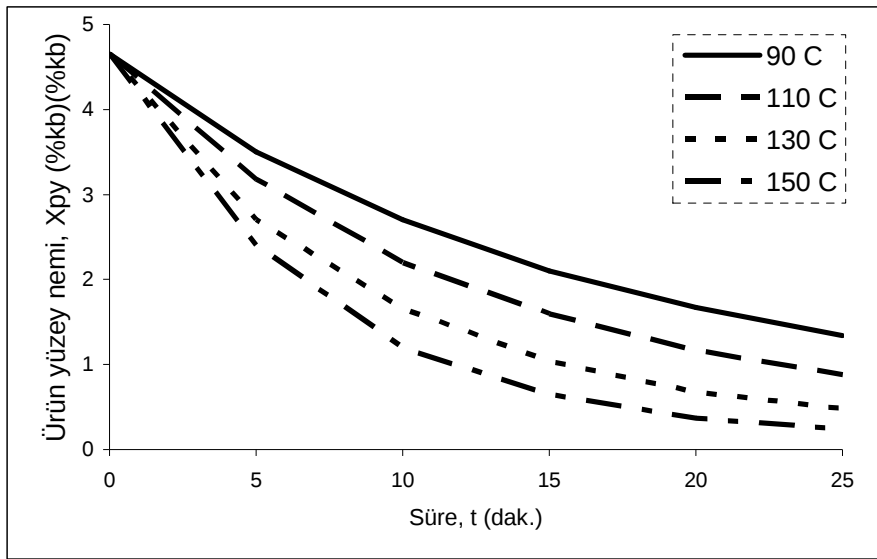


Şekil 5.30. Fındık ve hava çıkış nemi değişimleri 130 °C

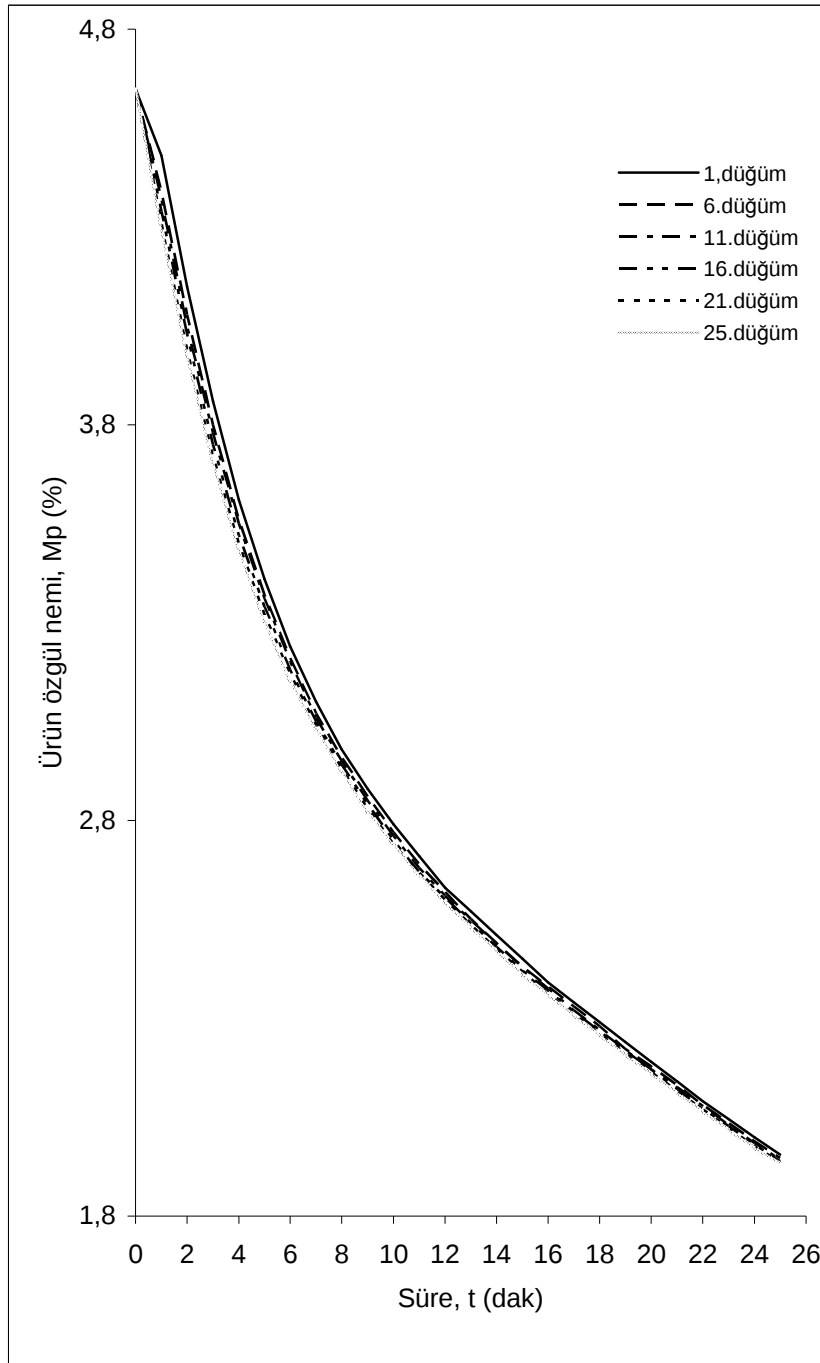


Şekil 5.31. Fındık ve hava çıkış nemi değişimleri 150 °C

Aşağıda Şekil 5.32 de X_{py} ile verilen hava için partikül yüzeyindeki nem miktarının farklı sıcaklıklarda zamanla değişimi verilmektedir. Prosesin başlangıcında X_{py} değerleri arasında sıcaklıkla belirgin farklılıklar olmaktadır. Daha sonraki aşamalarda nem miktarının azalmasıyla birlikte bu değerler birbirine yaklaşmaktadır.



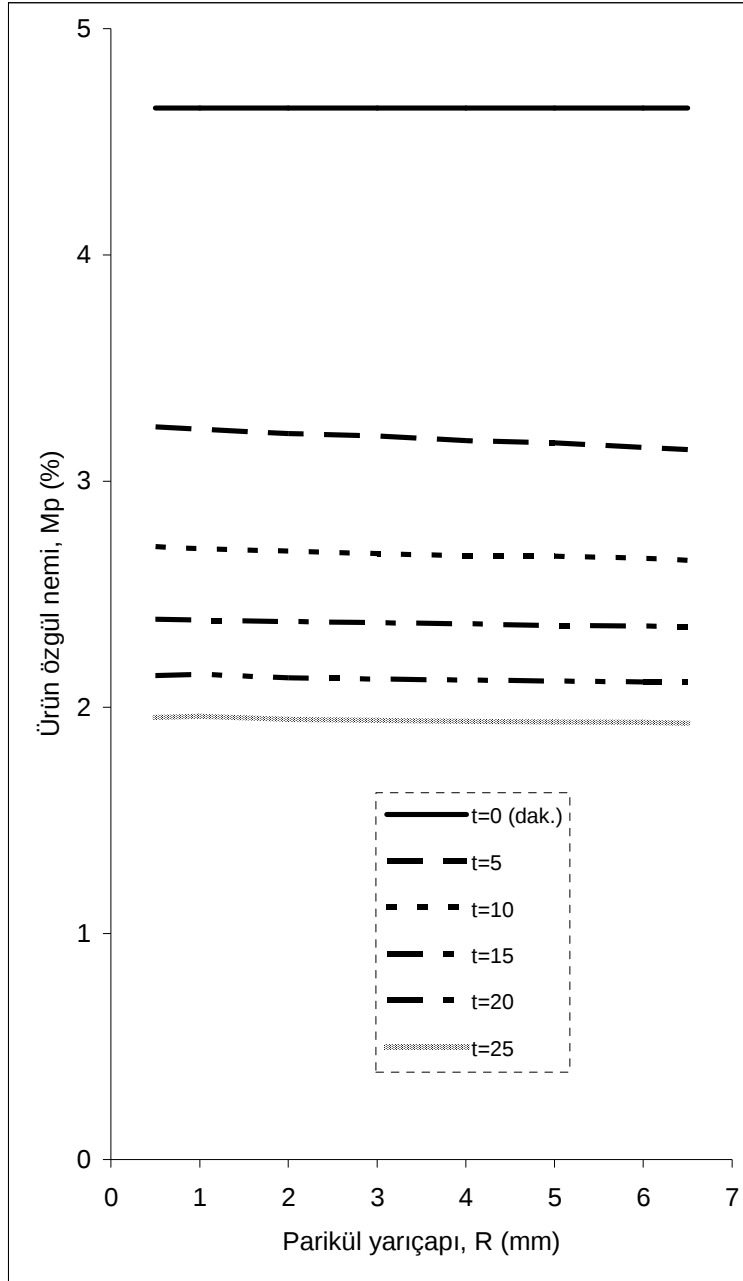
Şekil 5.32. X_{py} nem değerinin sıcaklık ve zamanla değişimi



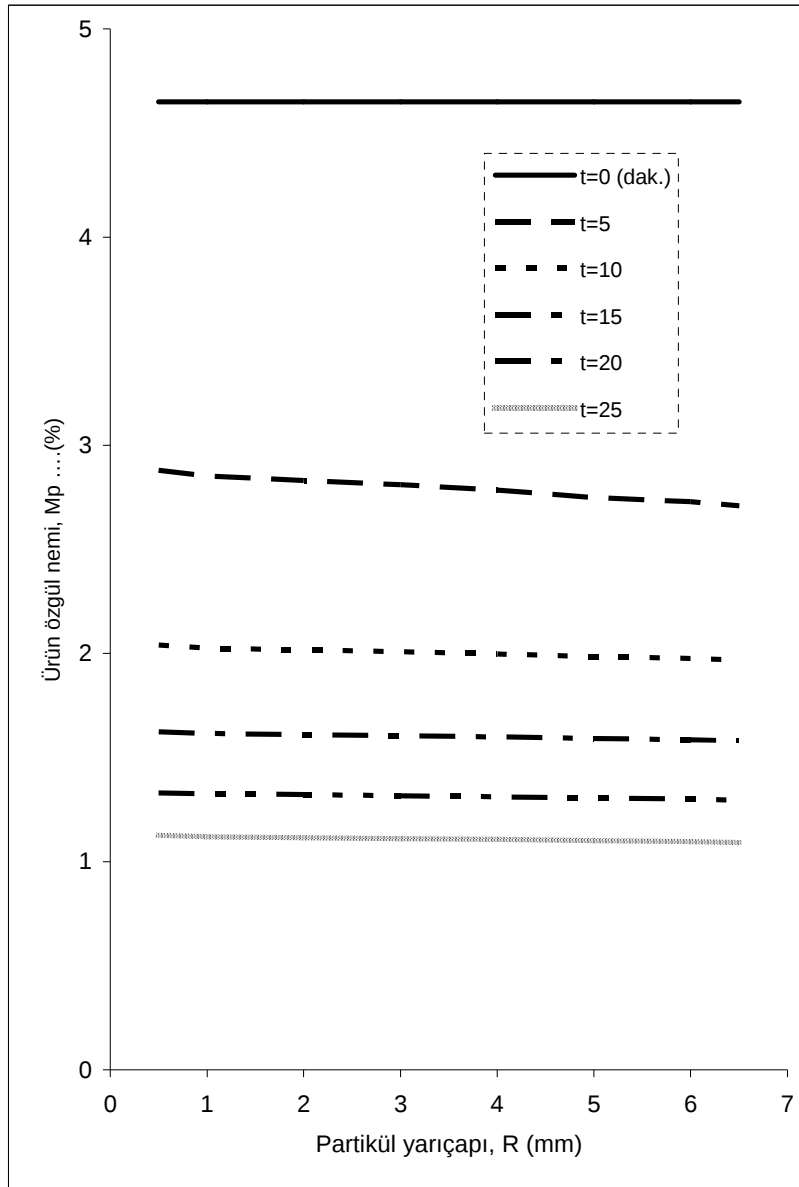
Şekil 5.33. Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 90 °C)

Yukarıda Şekil 5.33 de 90 °C kavurma için partikül içindeki nem dağılımının zamanla değişimi verilmiştir. Burada görüldüğü gibi ürün iç boşluk yüzeyi ile dış cidarı arasında prosesin başlangıç aşamalarında nem gradyeni daha büyüktür. Proses ilerledikçe ve dolayısıyla ürün içindeki nem miktarı azaldıkça ürün içindeki nem gradyeni de azalmaktadır. Aynı biçimde tüm deney sıcaklıkları için partikül

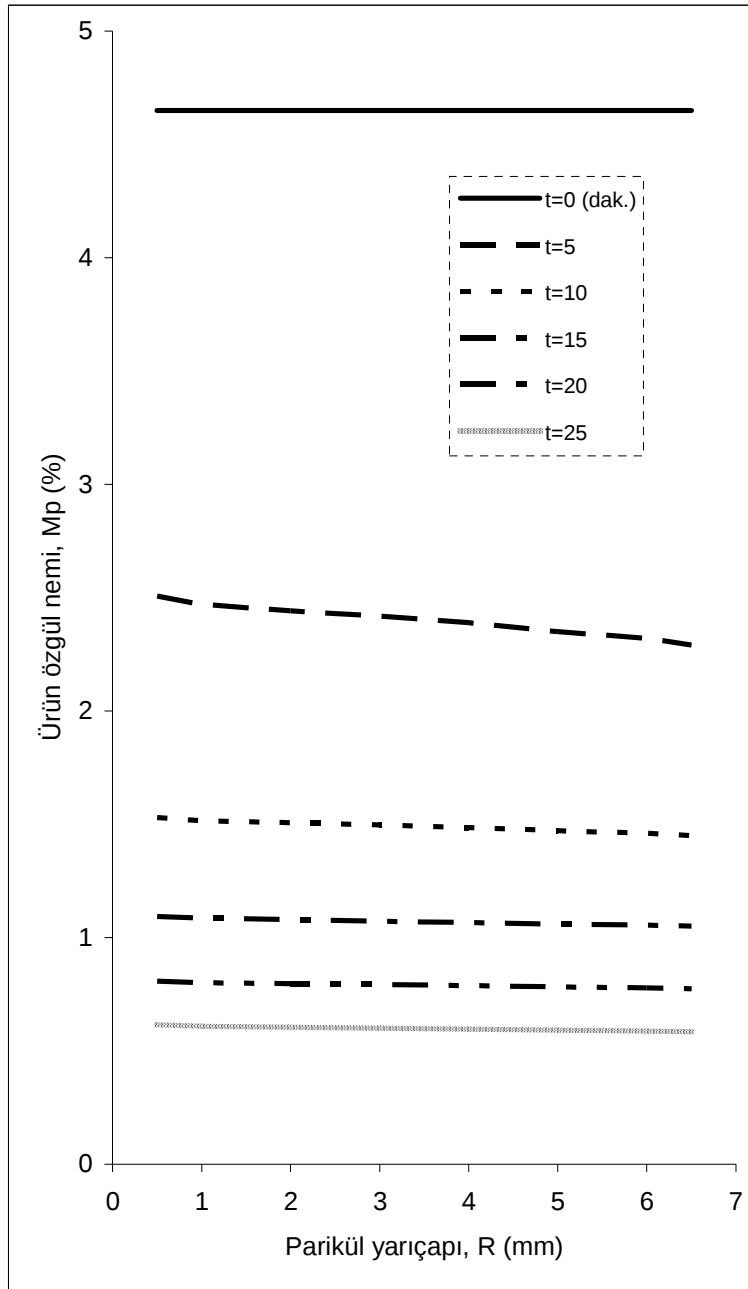
düğümlelerinde nem miktarlarının zamanla olan değişimlerini veren diğer grafikler aşağıda Şekil 5.34 – 5.37 de verilmiştir.



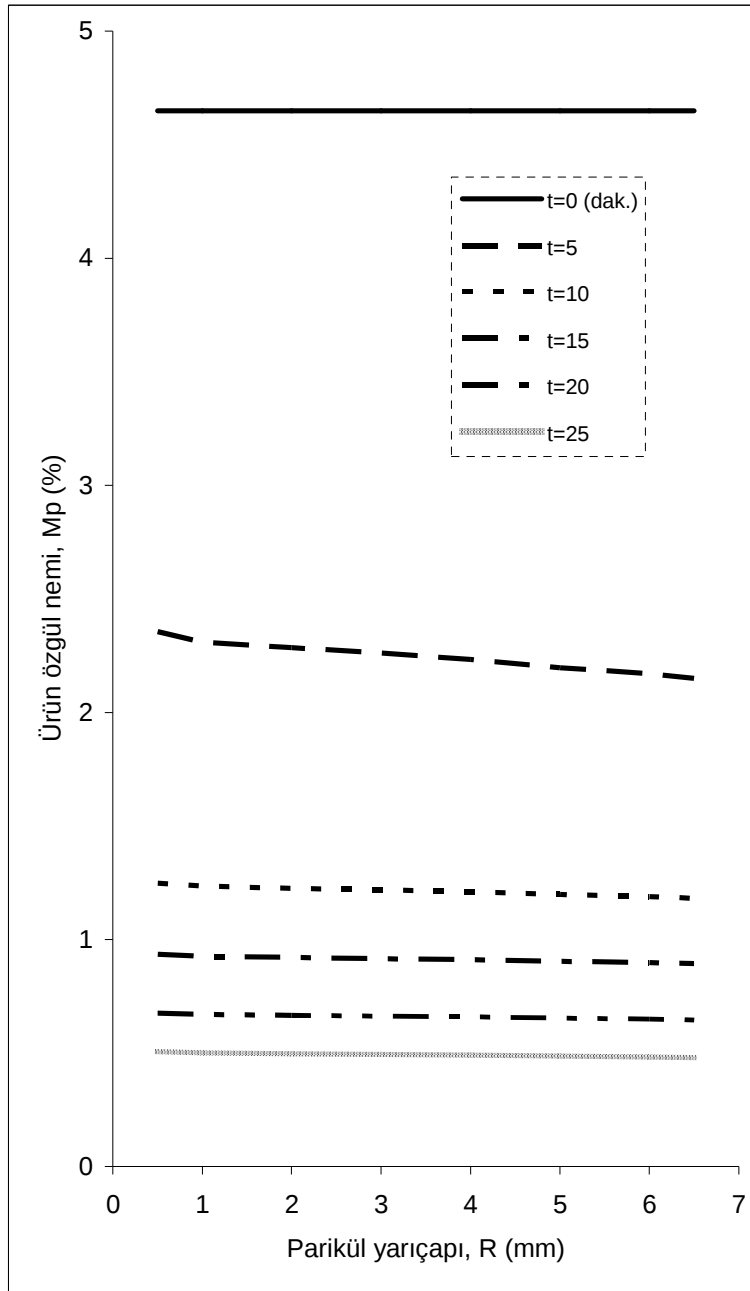
Şekil 5.34. Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 90 °C)



Şekil 5.35. Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 110 °C)

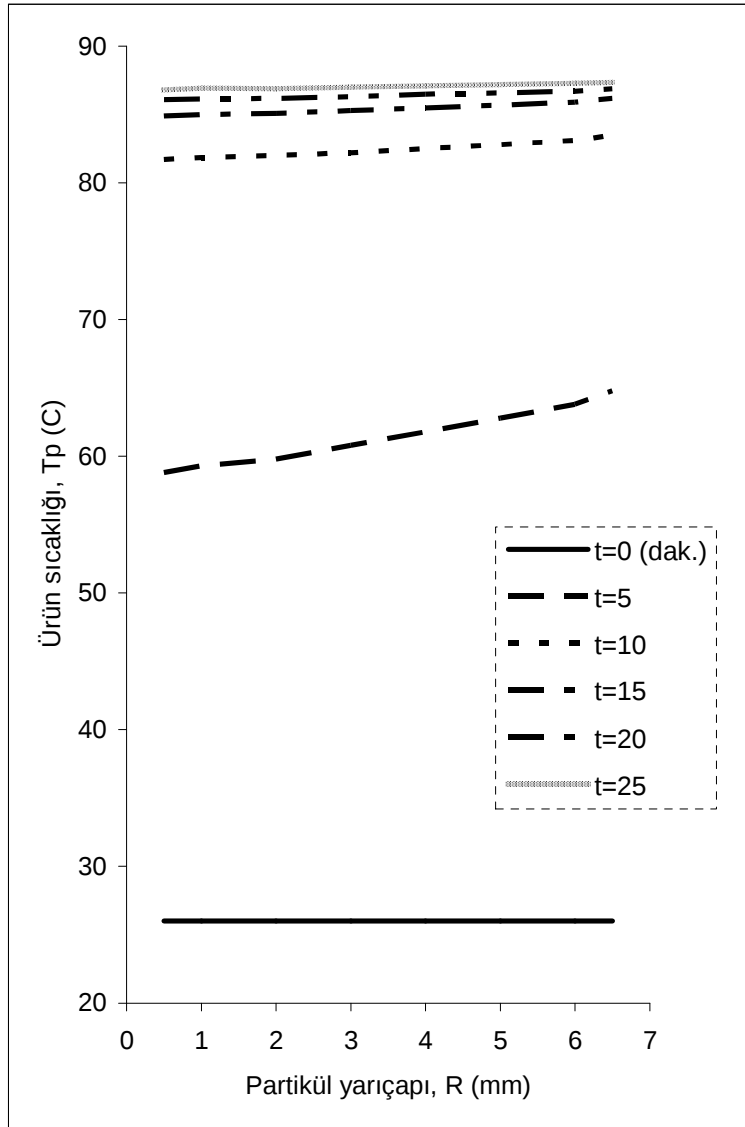


Şekil 5.36. Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 130 °C)

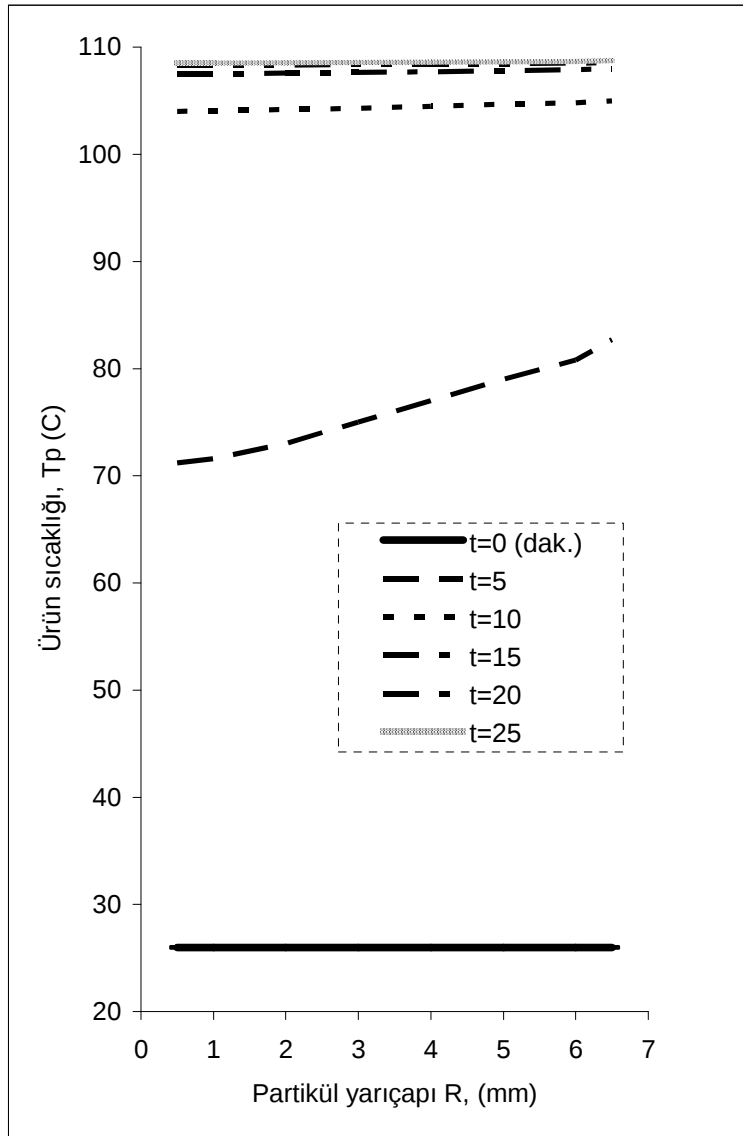


Şekil 5.37. Partikül içinde farklı düğümlerde nem değişimleri (model 150 °C)

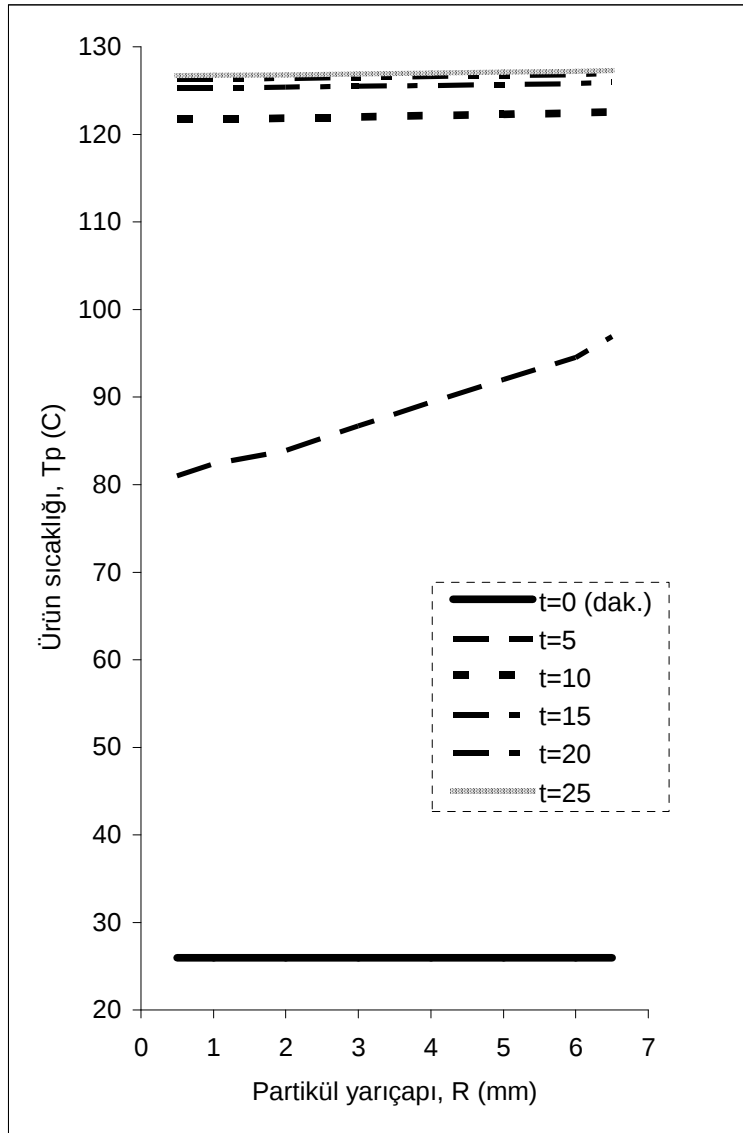
Partikül düğüm noktalarında sıcaklığın zamanla değişimi aşağıda Şekil 5.38 - 5.41 de verilmektedir. Prosesin başlangıç aşamalarında düğüm noktaları arasındaki sıcaklık farkları kısmen büyük olduğu gözlenmektedir, bu fark proses gelişimiyle birlikte gittikçe azalmakta ve iç düğümle dış yüzey arasındaki, sıcaklık farkları gittikçe kaybolmaktadır.



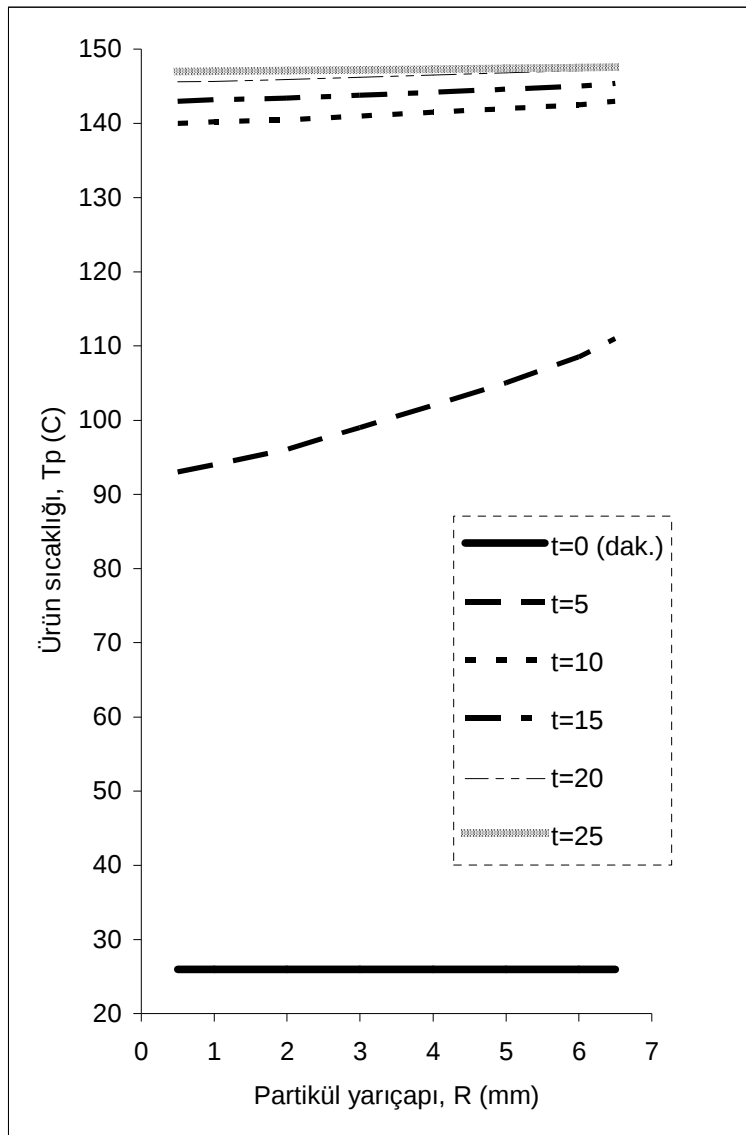
Şekil 5.38. Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 90 °C)



Şekil 5.39. Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 110 °C)



Şekil 5.40. Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 130 °C)



Şekil 5.41. Partikül içi farklı düğümlerde sıcaklık değişimleri (model 150 °C)

5.4. Deneysel Çalışmanın Hata Analizi

Yapılan tüm ölçümlerde ölçülen değer, gerçek değer ve hata kavramları söz konusudur. Ölçüm değeri ile gerçek değer arasındaki fark, deneysel hata olarak tanımlanmaktadır. Deneysel çalışmalarda hata analizi için ölçümüm girdi büyüklüklerinin dikkate alınıp modellenmesi gerekir. Bir ölçüm prosesinde hata yaratacı etkenleri tanımlamak ve bunların muhtemel büyüklüklerini belirlemek önem arz etmektedir. Bu deneyde gravimetrik metotla nem miktarı tayini, sıcaklık ölçümü ve benzer yöntemle hava nemi ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ve nem ölçümü

çalışma prensipleri bakımından benzer proplarla yapıldığından hata analizi bakımından aynı grupta değerlendirilebilecektir ve bunun yanında gravimetrik nem ölçümündeki hata analizi verilmeye çalışılacaktır. Ölçüm cihazı ile çevresi arasında montaj şekilleri dolayısıyla ısı iletimi oluşmaktadır butarz hatalara daldırma (immersion) hataları denmektedir. Isıtıcı meta olan gaz veya hava sıcaklığı yüksek değerlere haiz olduğunda radyasyon nedeniyled e hatalar oluşmaktadır [63] .

Hata büyüklüğünün tahmini ölçüm ve deney sonuçlarının güvenilirlik derecesini göserecektir. Böylece hataların sonuçlara tesiri de görülebilecektir. Deney ölçüm hataları belirlenebilen ve belirlenemeyen hatalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Belirlenebilen hatalar sistematik olarak tekrarlayan hatalardır ve genel olarak kalibre edilmemiş bir cihazla yapılan ölçümler veya formülde kullanılan bir değerin doğru olmamasından dolayı oluşanlardır. Belirlenemeyen hatalar ise istatistiki hatalardır, genel olarak belirlenemeyen hatalar çok cüzi tutulabilirse ölçüm değerleri yüksek hassaaiyetli. Hem belirlenebilen ve hem da belirlenemeyen hatalar çok cüzi tutulabilirse ölçüm değerleri yüksek doğruluklu denilmektedir. Bu deneyde oluşan hataların analizinde ISO tarafından geliştirilip normlaştırılan GUM (Guide of Uncertainty Measurement) metodu kullanılacaktır [64].

Bu metoda göre deney ölçüm hataları iki tip altında incelenmektedir.

TipA: Bir dizi ölçümlerin istatistiki analizlerinden belirlenebilen hatalardır.

TipB: İstatistiki analizlerin dışındaki metotlarla belirlenebilen hatalardır.

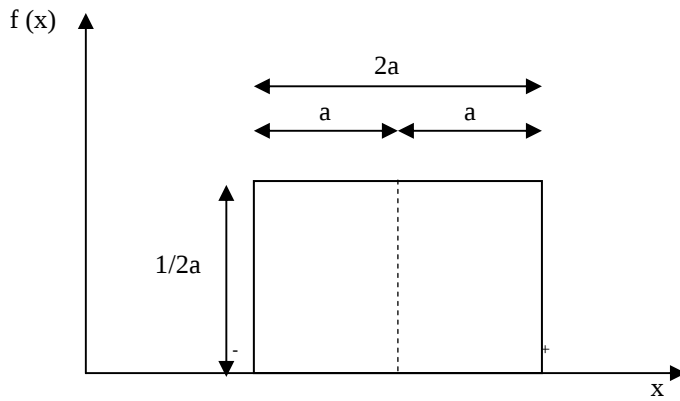
A tipi hata belirlemede ölçüm tekrarları yardımıyla deneyi yapan kişiler tarafından belirleme yapılabilmektedir. Genel olarak ölçümü yapılan bir büyüklük Y olarak tanımlanırsa bu büyüklük X_1 den X_n e kadar olan N sayıda büyüklüğe bağlıdır, bu büyüklüklerin her biride birer ölçülen büyüklük olabilecektir.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (5.1)$$

B tipi hatalar u_j^2 varyansı vasıtasıyla karakterize edilmektedir. Bu değ er ise cihaz kalibrasyon sertifikalarından ve tolerans limitlerinden bulunmaktadır [64]. Bu deneyde GUM metodu ve B tipi ölçüm hataları belirlenecektir. Burada ölçülen değ er için cihaz verileri kullanılarak en iyi tahmin değ erini tanımlanacaktır.

$$\text{En iyi tahmin} = \left(\frac{a_+ + a_-}{2} \right) \quad (5.2)$$

Burada a değerleri ölçüm cihazının tolerans limitlerinden çıkan en yüksek ve en düşük değerleri vermektedir. Sonuç olarak değerlerdeki değişimi aşağıda Şekil 5.42 de görüldüğü gibi alanı 1 olacak biçimde dikdörtgensel hata yayılımı olarak veren bir analiz metodudur.



Şekil 5.42 Dikdörtgensel hata yayılımı

$$\sigma^2 = \int (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (5.3)$$

Burada

x : sürekli sınır değişkeni

μ : yayılım değerleri ortalaması olmaktadır.

Şekil 5.42 de görüldüğü gibi dikdörtgensel hata dağılımının olduğu varsayıldığında varyans değerinin en iyi tahmini aşağıda gösterildiği gibi s^2 değeri ile verilmektedir.

$$s^2 = \frac{a^2}{3} \quad (5.4)$$

Buradan B tipi hata belirleme metodu için standart sapma bulunacaktır.

$$u = s = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5.5)$$

Aşağıda Tablo 5.1 de bulunan standart sapma değerleriyle gerçek ürün nem değerlerinin oluşma aralıkları verilmiştir. Burada 90 °C sıcaklıkta uygulanan kavurma deneyinden gelen nem miktarları kullanılmıştır.

Tablo 5.1 GUM metoduyla bulunan ürün nem miktarı

t (dak.)	Xp	Xpmin	Xpmax
0	0,0465	0,0459	0,0471
5	0,0363	0,0357	0,0369
10	0,0282	0,0276	0,0288
15	0,0245	0,0239	0,0251
20	0,0214	0,0208	0,0220
25	0,0189	0,0183	0,0195

Aynı şekilde tüm deney sıcaklıkları için GUM metoduyla sulunan standart sapma değerleri kullanılarak oluşabilecek sıcaklık aralıkları Tablo 5.2 de verilmektedir.

Tablo 5.2 GUM metoduyla bulunan deney sıcaklıkları

T °C	Tmin	Tmax
90	89,94	90,06
110	109,94	110,06
130	129,94	130,06
150	149,94	150,06

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Akışkan yatak havasının nem oranının kavurmanın ilk aşamalarında hızlı düştüğü, kurutma hızının düşmesiyle birlikte yatak havasının nem düşmesinde azaldığı görülmektedir.

Akışkan yatak kavurma sıcak havasının, yatak giriş ve çıkışı arasındaki farkının deney ilk aşamalarında en yüksek ve prosesin gelişimi ile gittikçe azalan bir karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Bunda hem ürün ısıtma periyodunun varlığı ve hemde üründen alınan nemin azalan kurutma hızlı periyotta gelişmesi etkin olmaktadır.

Ürün başlangıç nemlerinin çok düşük olmasından dolayı, sabit kurutma hızlı periyodun oluşmadığı ve kurutmanın yalnızca azalan kurutma hızlı periyotta geliştiği gözlenmektedir. Ancak kavurma sıcaklığının artışıyla ve dolayısıyla proses gelişiminin sonraki aşamalarında çok düşük ürün nem oranlarına ulaşılmasıyla birlikte, ikinci azalan kurutma hızlı periyodun da belirgin olarak ortaya çıktığı görülmektedir.

Model sonuçları ile deney verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Görüldüğü gibi model sonuçları deney verilerine çok yakındır. Bunda ürün yüzey neminin zamanla azalımının exponensiyel bir biçimde gelişecek olmasının tahmini ve değerlerin uygun belirlenmesi etken olmuştur.

İç fındık partikülleri kurutma kinetiklerinin gelişimlerinin de exponensiyel bir biçimde denge nem değerlerine yakınsayacağı bilinmektedir. Bununla ilgili ince tabaka kurutma karakteristiklerini veren çeşitli yaklaşım modelleri vardır ve fındık vb. yemişler için iki terimli model uygulamalarının olumlu sonuçlar verdiği bilinmektedir.

Fındık kavurma, bilinen kullanılan ve tercih edilen bir işleme yöntemidir. Fındık kavurma işlemi çoğunlukla şimdiye kadar, klasik yürüyen bantlı kavurma fırınlarında yapılmıştır. Kavrulmuş fındıkların kavurmayı takiben beyazlatma veya daha bilinen adıyla zar ayırma işlemine tabii tutulması istenmektedir. Bu ise döner fırçalar ve bunu takip eden optik renk ayırıcı düzenekler vasıtasıyla zarı ayrılmayan ürün gruplarının el gücü ile seçilip alınması ile mümkün olmaktadır.

Yapılan bu çalışmada akışkan yataklarda fındık kavurma işleminin olabileceği gösterilmiştir. Bu işlemin sıcaklık değişimiyle farklı olmakla birlikte, ortaklaşa olarak ilk 10 ile 15 dakikadaki gelişimlerinin klasik kavurma fırınlarına kıyasla daha hızlı olduğu görülmektedir. Böylelikle yüksek kurutma hızlarına ulaşılmakta ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yapılan tüm ısı işlemler gibi, kavurma işleminin de ürün yapısında süre uzunluğuna bağlı olarak istenmeyen etkilerde bırakabileceği bilinmektedir. İşlem süresinin kısaltılması ürün kalitesinde de olumlu değişimlere yol açması beklenmelidir.

İç fındık partiküllerinin yüksek hava hızlarından ve akışkan yatak havası içinde sürekli hareket etmelerinden dolayı beyazlatma yani zar ayırma işlemi de kendiliğinden olmaktadır. Bu ise beyazlatma işleminin bertarafı ve önemli işgücü tasarrufu ve daha iyi beyazlamış ürün eldesini sağlamaktadır.

Deneylerin yapılmış olduğu tesis sürekli taze hava alıp yatak çıkışında havayı serbest ortama göndermekteydi, ileriye yönelik çalışmalarda havanın iç sirkülasyonu ile çalışan bir sistem kurulması sağlanabilir. Böylelikle yüksek oranda enerji tasarrufu mümkün olacaktır ve yapılacak olan çalışmayla akışkan yataklı sistemin,; klasik konveyörlü sistemlere göre, enerji etkin kullanımı açısından avantajlı olabileceği gösterilebilir. Akışkan yatakta kavrulmuş fındıkların ürün toplam lezzetleri araştırılabilir; renk ve toplam lezzet ile birlikte istenen kurutma nem değerlerine ulaşılmasını sağlayacak optimum parametreler tayin edilebilir.

İç sirkülasyonlu sıcak havanın kullanılabilmesi için fındık partiküllerinden kendiliğinden ayrılan kahverengi iç zarların sistemi tıkamaması için önlem alınması

gerekecektir. Bu önlem filtre ile takviyeli ancak filtreden önce temiz tozsuz havayı geçiren, ancak tozları tutup sistemden ayıran bir hava kilidi veya siklon mekanizması ile olabilecektir.

Sistemin sanayide ve girişimcilerde kullanımının sağlanması için son iki paragrafta açıklanan hususların yerine getirilmesi ve enerji kayıplarının minimuma indirilmesi gerekecektir.

Ayrıca sistem kesikli (batch) tipi mi veya sürekli (continue) çalışan tip olarak dizayn edileceğine karar verilmelidir. Bu seçilen kurutma sistemi ile otomatik veya yarı otomatik ürün yükleme ve boşaltma sistemi düşünülmesi gerekecektir.

KAYNAKLAR

- [1] DEMİR, A.D. , CELAYETA,, J ,CRONİN, K ,*, KAMAL ABODAYEH B ,, “ Modelling of the kinetics of colour change in hazelnuts during air roasting” ,, Journal of Food Engineering 55 pp 283–292,, 2002
- [2] ÖZDEMİR, M. AÇKURT, F. “Effect of roasting on some nutrients of hazelnuts” ,, Food Chemistry 73 pp 185-190,, 2001b
- [3] SAKLAR, S. ,, “Optimization of hazelnut roasting process by using responsesurface methodology” ,, Ph. D. Thesis to Middle East Technical University, Department of Food Engineering, 1999
- [4] ÖZBEK, N. “ Fındık Yetiştiriciliği” Ege Üniversitesi Yayınları No:26 İzmir,, 1963
- [5] HACİİBRAHİMOĞLU, A , “ Fındığın Ekonomik Analizi” , Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü , Trabzon, 1992
- [6] YAVUZ, İ. “Giresun bölgesi fındık üretimi” İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 1984
- [7] SAKLAR, S,, UNGAN , S,, KATNAS S,, “ Microstructural changes in hazelnuts during roasting”, Food Research International ,36 pp 19–23,, 2003
- [8] LOTT AND BUTTROSE,, “Location of Reserves of Mineral Elements in Seed Protein bodies, macadamia nut, walnut and hazelnut” ,, Canadian Journal Bot 56, 2072-2082,, 1978
- [9] DURAK, İ. ,, “ Hazelnut supplementantion enhances plasma antioxidant potential and lowers plasma cholesterol levels” ,, Clinica Chimica Acta 284 113-115,, 1999
- [10] HOLLAND, B. ,, CANCE, M AND WIDDOWSON. S,, “ The Composition of Foods”, fifth edition, The Royal society and Chemistry Tübitak MAM, Cahit Arf Kütüphanesi
- [11] ÖZDEMİR, M. ,, “ Mathematical analyses of colour changes and chemical parameters of roasted hazelnuts” ,, Ph.D. Thesis to Technical University of Istanbul Institute of Science of Technology,, 2001a

- [12] AYFER, M. , UZUN, A. ve BAŞ, F. , “ Türk Fındık Çeşitleri”, Karadeniz Fındık İhracatçıları Birliği, Ankara , 1986
- [13] ÖZDEMİR, M. DEVRES, O. “The thin layer drying charecteristics of hazelnuts during roasting”. Journal of food aneengineering 42 pp 225-233, 1999a
- [14] BAŞ, F., ÖMEROĞLU,S., TÜRÜ, S. , AKTAŞ,S., “Önemli Türk fındık çeşitlerinin bileşim özelliklerinin saptanması” Gıda Dergisi II ,pp 195-203 , 1986
- [15] PALA, M., AÇKURT, F., LÜKER,M., YILDIZ,M., VE ÖMEROĞLU, S., “ Fındık çeşitlerinin bileşimi ve beslenme fizyolojisi açısından değerlendirilmesi” ,Turkish Journal of Agriculture and Forestry ,1996
- [16] SOUCİ, S., KRAUT, H. DER KLEİNE Lebensmitteltabelle für die Praxis”, "Souci-Fachmann- Kraut"Wissenschaftliche Verlag Gesellschaft WVG, in Stuttgart, 1991
- [17] TÜTER, C. “ Yiyeceklerin Saklanması”, Inkilap Kitapevi, İstanbul, 1997
- [18] SCANDRETT,C “ www.brewery.org/brewery/library/Maillard_CS0497 “ 08.06.2004
- [19] ANONYM 1,, “ Faculty of Agricultural Science, University of British Colombia” www.agsci.ubc.ca/courses/fnh/301/brown 01.02.2005
- [20] SEYHAN, F. TİSKENS, M. “ Modelling temperature and pH dependence of lipase and peroxidase activity in Turkish hazelnuts” , Journal of Food Engineering 52, pp 387-395,, 2002
- [21] WHİSTLER AND DANİEL “Carbohydrates in food chemistry” Fennema and Dekker Yayınevi, 1985
- [22] BARBOSA-CANOVAS, G. VEGA-MERCADO, H.”Dehydration of Foods NewYork Chapman & Hall, 1996
- [23] THROLLER A.CHRİSTİAN. C “Water activity in foods” , Adaptation and growth of microorganism in environments with reduced water activity in Theory and application of foods,, Academic Press ,New York 1987
- [24] BULDUK, S. “Gıda teknolojisi” Detay Yayıncılık, Ankara 2002
- [25] FALLİCO, B. , E. ARENA, M. ZAPPALA ,, “Roasting of hazelnuts. Role of oil in colour development and hydroxymethylfurfural formation” ,Food Chemistry 81 569–573 , 2003
- [26] GİONOTTİ, B , RİCHARDSON, U, SANZ “III International Congress on Hazelnut “

- [27] ANONYM 2 www.psgrill.net/Food/FoodInfo/Miscellaneous/sugar.html
05.02.2005
- [28] HOFFMANN,, “ Sugar caremalization” , 2002
www.newton.dep.anl.gov/askasci/chem00/chem00834.htm ve
[www.dep.anl.gov/chemoo/chem00834.htm] 09.10.2004
- [29] ÖZDEMİR, M. “ Analysis of internal browning of roasted hazelnurs “
„Food Chemistry 73 pp 191-196 „, 2001
- [30] LOPEZ, A. PÍQUE, M. T. CLOP, M. „, “The Hygroscopic Behaviour of
the Hazelnut” „Journal of Food Engineering 25 pp 197-208,, 1995
- [31] MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. CHÍRALT, A.,, “Water diffusivity and
mechanical changes during hazelnut hydration”„Food Research
International 32, pp 447-452,, 1999
- [32] LOPEZ & PÍQUE „,“Influence of the drying conditions on the hazelnut
quality, III Browning Drying Technology 15 (3-4) pp 982-1002]., 1997
- [33] ÖZDEMİR, M. ,DEVRES, O. “Kinetics of color changes of hazelnuts
during roasting” „, Journal of food engineering 45 pp. 17-24],, 2000
- [34] ZENTNER, C. , “Chemie and Biology”,Pabel Möwig Verlag KG, Rastatt
,2004
- [35] LABUZA „, “Stability of intermediate moisture foods Journal of food
science 37” Pp 154 -159,, 1972
- [36] BERGNER,G. “Untersuchungen über den oksidativen Fettrederb von
Hazelnusskernen” , Deutsch Lebensmittel Rundschau 70, pp 201-206,
1974
- [37] LOPEZ,A „, “Influence of drying conditions on the hazelnut quality Lipid
oxidation” „, Drying Technology 15,, pp 965-977, 1997
- [38] GROSCH , “Storage stability of roasted hazelnuts”, Review of chocolate
confectionary and bakery 8(3) 21-23]., 1983
- [39] PERREN,R & ESCHER, F. “ Optimierung der Heissluftröstung von
Hazelnüssen zur Verbesserung der Oxidationstabilitaet”, Lebensmittel
Technology 29 (1-2),, 1996
- [40] TOPUZ, A, “Akışkan Yatakta Fındık Kurutma ve Isı ve Kütle Geçişinin
İncelenmesi” ,Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Kütüphanesi ,2002
- [41] ANONYM 4 “Water activity of Dry and Dehydrated Products”
www.formulafoods.co.nz/awnews4.pdf 09.07.2004

- [42] TREYBAL, ROBERT E. "Mass Transfer Operation," Mc Graw Hill Book Company in London 1981
- [43] SCHÖNHERR, M., "Thermische Trocknung Grundlagen", „www.drying.de/trocknung_1.htm „,08.06.2004,, 2002a
- [44] KNEULE, F. Das Trocknen Verlag Sauerlander Aarau and Frankfurt am Main, 1975
- [45] SCHÖNHERR, M. , Trockner bauarten, www.drying.de/trocknung_3.htm „,09.08.2004,, 2002b
- [46] OKOS,, " Food Dehydration" „, Handbook of food engineering,, Heldman Lund and Marcel Dekker,, 1992
- [47] VAN DEN BERG, C. and BRUÏN, S. "Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects," In Water Activity: Influences on Food Quality,, Academic Press, New York, pp.1-61, 1981
- [48] ANONYM 5 "Drying Theory", Agriculture and Food Engineering, University college Dublin, ww.ucd.ie/food/html/homepage/newdrying.doc 21.08.2004
- [49] HELLEVANG, KENNETH „, Grain Drying AE-701, North Dakota State University, November 1994, www.ext.nodak.edu/extpubs/plantsci/smgrains/ae701-1.htm#Influence 8.07.2005
- [50] COMAPOSADA BERÍNGUES, J „, "Sorption Isotherms and Water Diffusivity in Muscles of Pork Ham at Different NaCl",„ Department Maquines I Motors Termics,1999,, www.tdx.cesca.es/TESIS-UPC/AVAILABLE/TDX-0430101-81810/15AWIntroductio.PDF 02.02.2005
- [51] GRIESSER, U,, DILLENZ, J.,, " Examples for water vapor sorption isotherm of some auxilary substances" , Institute of Pharmacy, University of Innsbruck,, www.project-messtechnik.de/Sorptionisotherme_e.html 10.02.2005
- [52] BURGSCHWEIGER, J. , TSOTSAS, E. "Experimental investigation and modelling of continuous fluidized bed drying under steady state and dynamic conditions" , Chemical Engineering Science 57,, pp 5021-5028, 2002
- [53] HENNEBERG,M. HEINRICH, A, " Fluidized bed air drying: Experimental study and model development" „, The canadian journal of chemical engineering, Volume 81, pp 176-184, 2003
- [54] STECLE, B , , Water Activity in Fact Sheet Document,, 2000

- [55] MONSALVE-GONZALES,, “Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods “ ,Journal of food science 58 pp 1118-1124,, 1993 b
- [56] BOBIC, Z. BAUMAN I AND ´ CURI ´C D. “ Rehydration ratio of fluid bed- dried vegetables S⁺ adhan Vol. 27, Part 3, June, pp. 365–374, 2002
- [57] BUDINGER S. “Particle Technology: Practical Exercises Fluidization” Library of Technical University Harburg, Hamburg ,1999
- [58] HAGEN, K, “Heat Transfer with Applications”, Prentice Hall Inc.,pp 175-190 New Jersey 1999
- [59] PATANGAR, S. “Numerical heat transfer and fluid flow”, Taylor and Francis Publishing, page 52-53, Hemisphere ABD, 1980
- [60] ARPACI, V. KAO, S.,SELAMET, A.,,”Introduction to heat transfer” ,Prentice Hall Inc.,pp 184-236, New Jersey 1999
- [61] ÖZDEMİR, M., SEYHAN, F.G., BODUR, A.Ö. & DEVRES, Y.O. , Effect of initial moisture content on the thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting, Drying Technology, (2000), 18 (6), 1465-1479
- [62] DUNCAN, J. MARC MCANDREW, AND RAFFAELLA O, Mass Transfer Coefficient for Drying of Moist Particulate in Bubbling Fluidised Bed,, Chemical Engineering, Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS, United Kingdom, <http://aiche.confex.com/aiche/2006/techprogram/P65362.HTM> 05/01/2007
- [63] FIGLIOLA F. ,BEASLEY D .,,”Theory and Design for Mechanical Measurement” ,, ,John Wiley &Sons, pp327-334, New York 2000
- [64] KIRKUP L, Department of Applied Physics, Faculty of Science, University of Technology, Sydney, New South Wales 2007, Australia. 25.06.2007 www.science.uts.edu.au/physics/uncertainty.pdf

EKLER

Ek A.Çözümlenen Denklemler

1. $X_g=X_g(y,t)$ denklemi;

$$\begin{aligned} X_{gn}^{i+1} \left[1 + \frac{U_g \Delta t}{\Delta y} + \frac{6k_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\varepsilon_g d_p} + \frac{K_{gp} \varepsilon_b \Delta t}{\varepsilon_g} \right] - X_{gn-1}^{i+1} \left[\frac{U_g \Delta t}{\Delta y} \right] - X_{gn}^i \\ = X_{py}^{i+1} \left[\frac{6k_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\varepsilon_g d_p} \right] + X_b^{i+1} \left[\frac{K_{gp} \varepsilon_b \Delta t}{\varepsilon_g} \right] \end{aligned}$$

Giriş şartı:

$$t=0 \text{ da } X_g=X_g(y,0)=st$$

Sınır şartı;

$$t>0 \text{ da } X_g(0,t)=st$$

2. $X_b=X_b(y,t)$ denklemi;

$$X_{bn}^{i+1} \left[1 + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} + K_{gb} \Delta t \right] - X_{bn-1}^{i+1} \left[\frac{u_b \Delta t}{\Delta y} \right] - X_{bn}^i - X_{gn}^{i+1} [K_{gb} \Delta t] = 0$$

Giriş şartı;

$$t=0 \text{ da } X_b=X_b(y,0)=st$$

Sınır şartı;

$$t>0 \text{ da } X_b(0,t)=st$$

3. $M_p=M_p(r,t)$ denklemi,

Giriş şartı;

$$t = 0 \quad \text{da} \quad 0 \leq r \leq R \quad M_p = M_{po}=\text{sabit}$$

Sınır şartı;

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r=r_{i\check{c}} \text{ ise} \quad m_{kon} = 0$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{dış} \text{ ise} \quad M_p(r_d,t) = f(X_{py})$$

3.1 Ürün dış yüzeyinde

$$M_R^{i+1} \left[1 + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - M_{R-1}^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - M_R^i + \frac{\rho_{bu}}{\rho_p} \frac{k_{gp} \Delta t}{\Delta r} \frac{r_d^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) = 0$$

3.2 Ürün orta düğümlerde,

$$M_m^{i+1} \left[1 + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \left(2 + \frac{\Delta r^2}{2r_m^2} \right) \right] - M_{m-1}^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_m - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{r_m^2} \right] - M_{m+1}^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{\left(r_m + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{r_m^2} \right] - M_m^i = 0$$

3.3 Ürün iç boşluk yüzeyinde

$$M_0^{i+1} \left[1 + \frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_{iç} + \Delta r)^2}{\left(r_{iç} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - M_1^{i+1} \left[\frac{D\Delta t}{\Delta r^2} \frac{(r_{iç} + \Delta r)^2}{\left(r_{iç} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - M_0^i = 0$$

4. $T_g = T_g(y, t)$ denklemi,

$$\begin{aligned}
& T_{gn}^{i+1} \left[1 + \frac{U_g \Delta t}{\Delta y} + \frac{12h_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\rho_h C_g \varepsilon_g d_p (Bi + 2)} + \frac{12k_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\varepsilon_g C_g d_p (Bi + 2)} C_{bu} (X_{py}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) \right] \\
& + \frac{H_{gp} \varepsilon_b \Delta t}{\rho_h \varepsilon_g C_g} + \frac{K_{gb} \varepsilon_b \Delta t}{\varepsilon_g C_g} C_{bu} (X_{bn}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) + \frac{h_{gd} \Delta t (1 - \varepsilon_p)}{\rho_h \varepsilon_g C_g d_t} \\
& - T_{gn-1}^{i+1} \left[\frac{U_g \Delta t}{\Delta y} \right] - T_{gn}^i - T_{bn}^{i+1} \left[\frac{H_{gp} \varepsilon_b \Delta t}{\rho_h \varepsilon_g C_g} + \frac{K_{gb} \varepsilon_b \Delta t}{C_g \varepsilon_g} C_{bu} (X_{bn}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) \right] \\
& - T_{Rn}^{i+1} \left[\frac{12h_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\rho_h C_g \varepsilon_g d_p (Bi + 2)} - \frac{12k_{gp} \varepsilon_p \Delta t}{\varepsilon_g C_g d_p (Bi + 2)} C_{bu} (X_{py}^{i+1} - X_{gn}^{i+1}) \right] \\
& - T_{dn}^{i+1} \left[\frac{h_{gd} \Delta t (1 - \varepsilon_p)}{\rho_h C_g \varepsilon_g d_t} \right] = 0
\end{aligned}$$

Giriş şartı:

$$t=0 \text{ da } T_g = T_g(y,0) = st$$

Sınır şartı;

$$t>0 \text{ da } T_g(0,t) = st$$

5. $T_b = T_b(y,t)$ denklemi,

$$\begin{aligned}
& T_{bn}^{i+1} \left[1 + \frac{u_b \Delta t}{\Delta y} + \frac{H_{gb} \Delta t}{\rho_h C_b} + \frac{K_{gb} \Delta t}{C_b} (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) C_{bu} \right] - T_{bn-1}^{i+1} \left[\frac{u_b \Delta t}{\Delta y} \right] - T_{bn}^i \\
& - T_{gn}^{i+1} \left[\frac{H_{gb} \Delta t}{\rho_h C_b} + \frac{K_{gb} \Delta t}{C_b} (X_{gn}^{i+1} - X_{bn}^{i+1}) C_{bu} \right] = 0
\end{aligned}$$

Giriş şartı:

$$t=0 \text{ da } T_b = T_b(y,0) = st$$

Sınır şartı;

$$t>0 \text{ da } T_b(0,t) = st$$

6. $T_p = T_p(r,t)$ denklemi,

$$t = 0 \quad \text{da} \quad 0 \leq r \leq R$$

$$T_p = T_p(r,0) = \text{sabit}$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{iç} \text{ ise}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \dot{q}_{kon} = 0$$

$$t > 0 \quad \text{da} \quad r = r_{dış} \text{ ise}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \dot{q}_{kon} = h_{gp} (T_g - T_{py}) - \rho_h k_{gp} b (X_{py} - X_g)$$

6.1 Ürün dış yüzeyinde,

$$\begin{aligned}
 & T_R^{i+1} \left[1 + \text{Fo} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + \text{FoBi} \left(\frac{2}{\text{Bi}+2} \right) \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} - (M_{R-1}^{i+1} - M_R^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] \\
 & - T_{R-1}^{i+1} \left[\text{Fo} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_{R-1}^{i+1} - M_R^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{(r_d - \Delta r)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - T_R^i \\
 & - T_g^{i+1} \left[\text{FoBi} \left(\frac{2}{\text{Bi}+2} \right) \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - \frac{\rho_{bu} k_{gp} b \Delta t}{\rho_p C_p \Delta r} \frac{(r_d)^2}{\left(r_d - \frac{\Delta r}{2}\right)^2} (X_{py}^{i+1} - X_g^{i+1}) = 0
 \end{aligned}$$

6.2 Ürün orta düğümlerde,

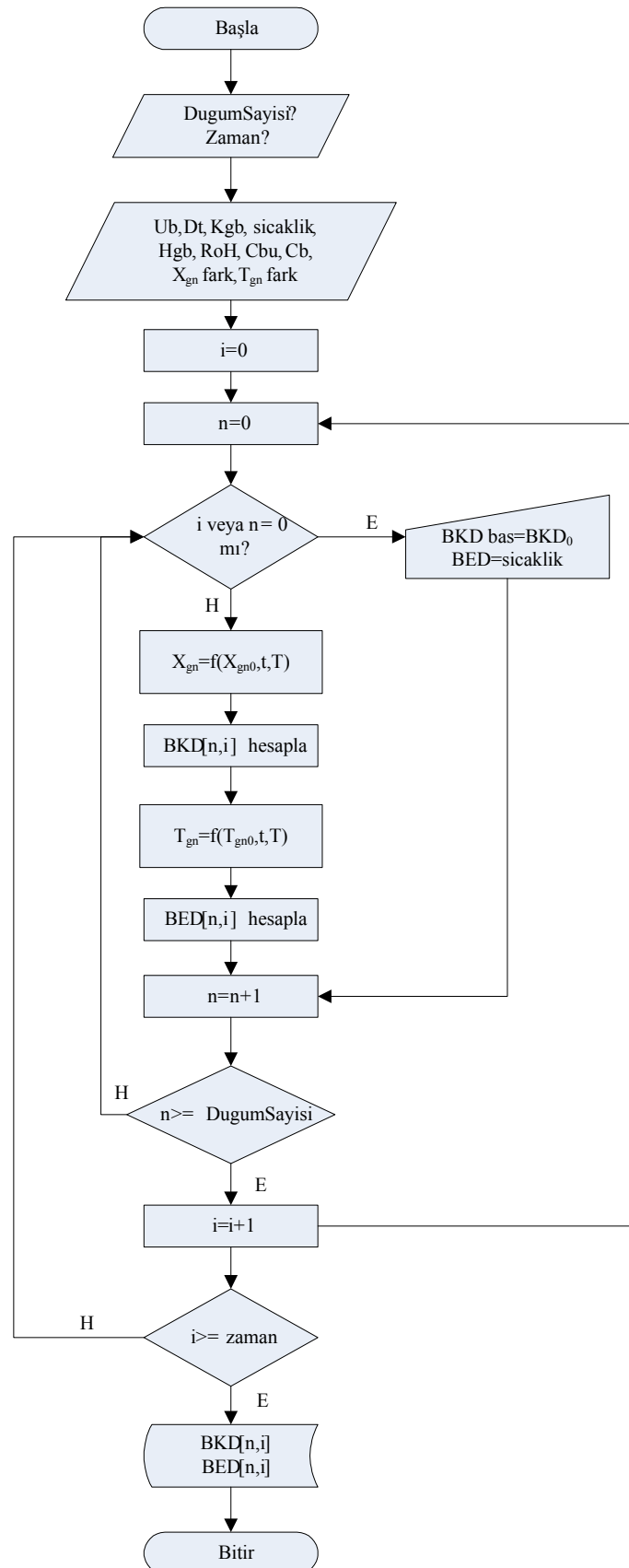
$$\begin{aligned}
 & T_n^{i+1} \left[1 + \text{Fo} \left(2 + \frac{\Delta r^2}{2r_n^2} \right) - (M_{n-1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right. \\
 & \quad \left. + (M_{n+1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right] \\
 & - T_{n-1}^{i+1} \left[\text{Fo} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} + (M_{n-1}^{i+1} - M_n^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{\left(r_n - \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right] \\
 & - T_{n+1}^{i+1} \left[\text{Fo} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} + (M_n^{i+1} - M_{n+1}^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{\left(r_n + \frac{\Delta r}{2}\right)^2}{(r_n)^2} \right] - T_n^i = 0
 \end{aligned}$$

6.3 Ürün iç boşluk yüzeyinde

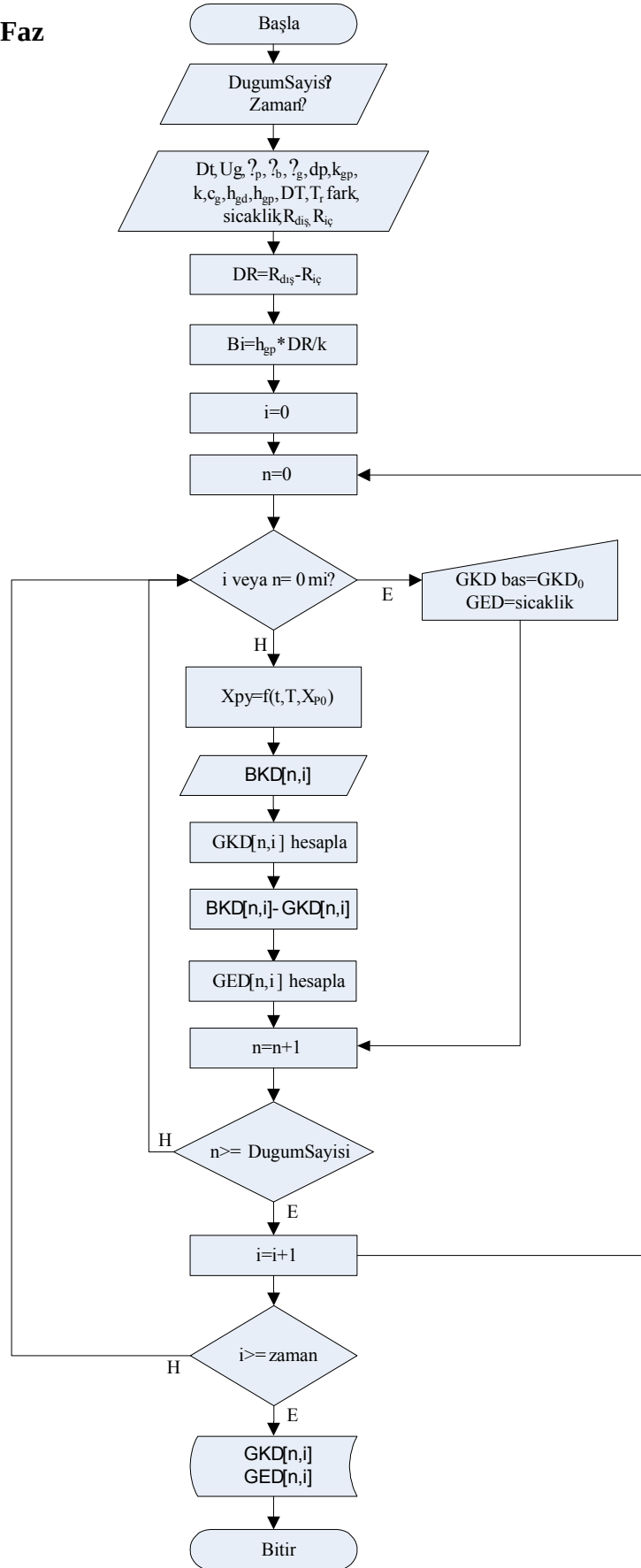
$$\begin{aligned}
 & T_1^{i+1} \left[1 + \text{Fo} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] + \\
 & T_2^{i+1} \left[-\text{Fo} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} + (M_1^{i+1} - M_2^{i+1}) \frac{D\Delta t}{2\Delta r^2} \frac{(r_{i\zeta} + \Delta r)^2}{\left(r_{i\zeta} + \frac{\Delta r}{2}\right)^2} \right] - T_1^i = 0
 \end{aligned}$$

Ek B. Akış Diyagramları

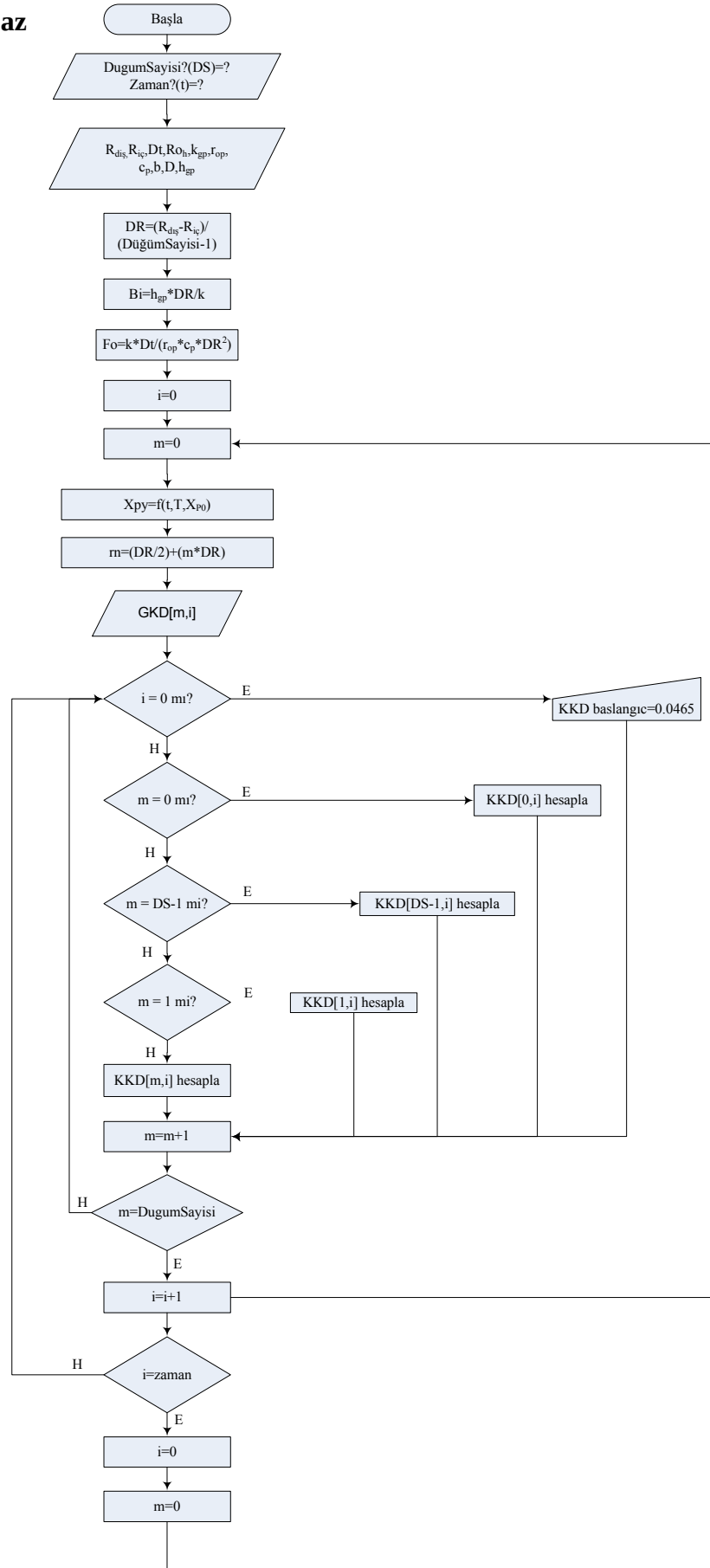
1.Baloncuk Fazı

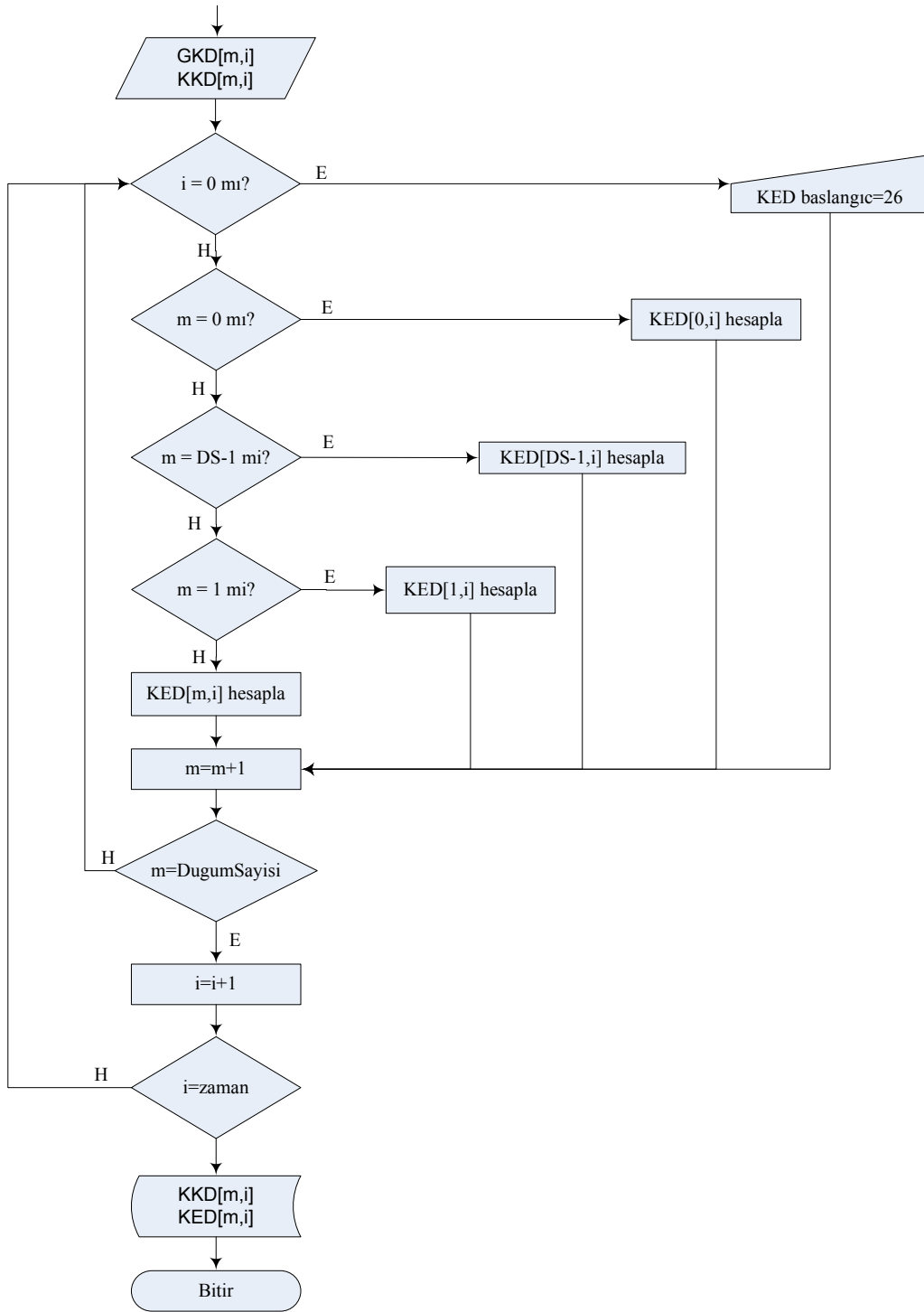


2. Gaz Faz

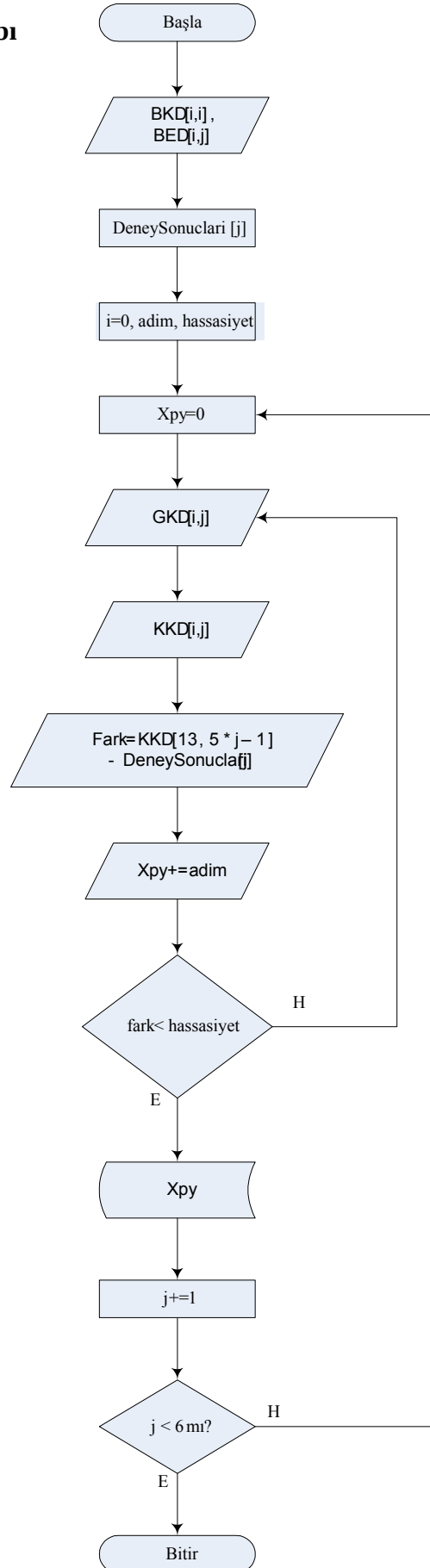


3. Katı Faz





4. Xpy Hesabı



ÖZGEÇMİŞ

1964 yılında Ordu’da doğan Mükrimin Şevket GÜNEY ilkokul, ortaokul ve lise eğitimini aynı ilde tamamladıktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji bölümünden 1987 yılında mezun olmuştur. 1988-1989 yılları arasında Köln Üniversitesinde Almanca dil kursuna katılmış ve dil yeterlilik sınavını başarıyla vermiştir. 1990 yılında özel sektörde başlamış olduğu çalışma yaşamı, 1998 yılından bu yana kamu iktisadi teşekkülü olan Türkiye Vagon Sanayi A.Ş.nde devam etmektedir. 1999- 2000 güz döneminde Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2001 Ağustos döneminde mezun olmuştur. 2001 yılında Sakarya Üniversitesinde başlamış olduğu Doktora eğitimine halen aynı üniversite Makine Mühendisliği Enerji bölümünde devam etmektedir. Çok iyi Almanca, iyi İngilizce ve temel Fransızca bilmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.