

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

**YENİ TASARLANAN HAVALI KOLLEKTÖRLER
YARDIMI İLE REYHAN VE NANE KURUTULMASI**

Fevzi GÜLÇİMEN

**TEZ YÖNETİCİSİ
Doç. Dr. Aydın DURMUŞ**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

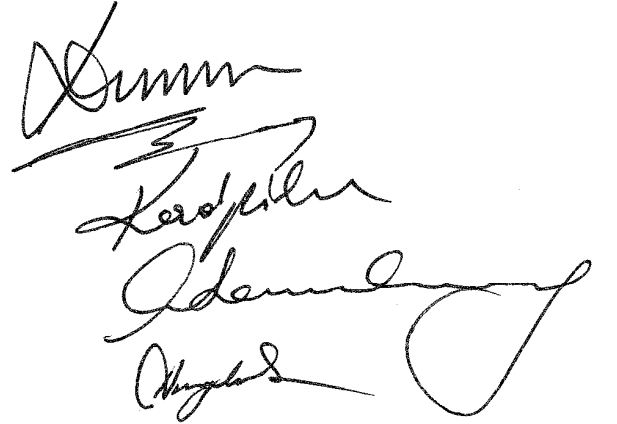
YENİ TASARLANAN HAVALI KOLLEKTORLER
YARDIMI İLE REYHAN VE NANE KURUTULMASI

Fevzi GÜLÇİMEN

DOKTORA TEZİ MAKİNE EĞİTİMİ
ANABİLİM DALI

bu tez 23/05/2008 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Aydın DURMUŞ
Üye : Prof. Dr. Cengiz YILDIZ
Üye : Prof. Dr. Kadir BİLEN
Üye : Yrd. Doç. Dr. Celal SARSILMAZ
Üye : Yrd. Doç. Dr. Haydar EREN



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/....../ tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın gerçekleşmesinde; değerli katkılarından dolayı Danışman Hocam sayın Doç. Dr. Aydın DURMUŞ'a, Yardımlarını benden esirgemeyen kardeşim Arş. Gör. Çetin ÖZAY'a, Elektrik Mühendisi dostum Mehmet YAKAN'a, Ablam Öğr. Gör. Ayla DURMUŞ'a, Kadim dostum Öğr. Gör. Mustafa Hıfzı SALER'e, Arş. Gör. Dr. Emre TURGUT'a, Yrd. Doç. Dr. Aydın DİKİCİ'ye, Yrd. Doç. Dr. İrfan KURTBAŞ'a ve daha ismini yazmadığım bütün arkadaşlarıma ve aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Fevzi GÜLÇİMEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa no</u>
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	VII
SİMGELER LİSTESİ	IX
ÖZET.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	11
2. TEORİK BİLGİLER ve KULLANILAN HESAPLAMA YÖNTEMİ.....	21
2.1. Tarım Ürünlerinde Nem.....	21
2.2. Kurutma Sıcaklıkları ve Kütle Transferi Denklemleri.....	24
2.2.1. Yayımla Kütle Transferi	25
2.2.2. Taşınım Kütle Transferi	29
2.3 Tarım Ürünlerindeki Nemin Belirlenmesi.....	31
2.3.1. Kurutma Fırını Metotları	31
2.3.2. Hava Dolaşım Fırın Metotları.....	31
2.3.3. Vakum Ortamlı Fırın Metodu.....	32
2.3.4. Desikantlar Kullanılarak Nemin Belirlenmesi.....	32
2.3.5. Toulén Damıtma Metodu.....	32
2.3.6. Elektrik-Elektronik Tip Nem Ölçme Yöntemleri.....	33
2.4.Nemlilik Ölçüsü.....	33
2.5.Kurumanın Safhaları.....	34
2.6. İnce Tabaka Kuruma Kuramı.....	36
2.6.1 Sabit Hızda Kuruma Safhası.....	36
2.6.2 Azalan Hızla Kuruma Safhası.....	38
2.7. Kalın Tabaka Kuruma Kuramı	44
2.8. Kuruma Hızına Etki Eden Faktörler.....	44
2.9. Kurutma Metotları.....	45
2.9.1. Kurutucu Seçimi.....	47
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	48
3.1. Deney Düzenekinin Tanıtılması.....	48
3.2. Ölçümler.....	59
3.2.1. Güneş Işınımı.....	59

3.2.2. Sıcaklık	59
3.2.3. Ortalama Hava Hızı	59
3.2.4. Basınç Farkı	60
3.2.5. Nem İçeriği.....	60
3.2.6. Kütle Değişimi.....	60
3.3. Hata Analizi.....	61
3.3.1. Sıcaklık Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar.....	62
3.3.2. Zaman Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar.....	62
3.3.3. Ağırlık Kayıplarının Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar.....	63
3.3.4. Hız Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar.....	63
3.3.5. Nem Miktarının Belirlenmesinde Ortaya Çıkacak Olan Hatalar.....	64
3.3.6. Basınç Ölçümünde Ortaya Çıkacak Hatalar.....	64
3.3.7. Diğer Hatalar.....	64
3.4. Ölçülen Değerlerden Kaynaklanan Toplam Hatalar.....	65
3.5. Deneyler.....	69
3.5.1. Kollektör Deneyleri.....	69
3.5.2. Kurutma Deneyleri.....	70
4. BULGULAR VE İRDELEME.....	74
4.1. Havalı Güneş kolektörleri	74
4.2. Kurutma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	84
4.3. Kurutma Parametreleri için Matematiksel Modelleme ve İstatistiksel Analiz.....	105
4.4. Nem Oranı için Regrasyon Analizi.....	107
4.5. Difzyon Katsayısının Belirlenmesi.....	127
4.6. Enerji ve Ekserji Değerlendirmesi.....	129
4.6.1. Enerji.....	129
4.6.2. Ekserji.....	139
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	142
KAYNAKLAR.....	147
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Karakteristik kuruma eğrileri.....	35
Şekil 3.1 Havalı güneş kolektörlü kabin tipi kurutucunun şematik gösterimi.....	49
Şekil 3.2 Akış alanının fotoğrafı ve boyutu.....	50
Şekil 3.3 Akış alanının farklı fotoğrafı.....	51
Şekil 3.4 Kurutma odasının fotoğrafı.....	51
Şekil 3.5 Veri toplayıcı.....	52
Şekil 3.6 ZA9000FST Bağlantı elemanının şematik görünüşü.....	52
Şekil 3.7 Thermoanemometre (FVA645TH3) akış sensörünün fotoğrafı.....	53
Şekil 3.8 FDA612MR Basınç modülünün şematik görünüşü ile detayı.....	53
Şekil 3.9 FHA6467 Nem sensörünün fotoğrafı.....	54
Şekil 3.10 K25-FKA0251 gerilme ve sıkıştırma sensörünün fotoğrafı.....	55
Şekil 3.11 K25-FKA0251 Gerilme ve sıkıştırma sensörünün (strengiş) teknik resim detayı....	56
Şekil 3.12 AMG 9054 fan.....	57
Şekil 3.13 Ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü ve bilgisayar fotoğrafı.....	58
Şekil 3. 14 Taze nanein kurutmadan önceki ölçüsü.....	70
Şekil 3. 15 Taze nanein kurutmadan sonraki ölçüsü.....	71
Şekil 3. 16 Taze reyhanın kurutmadan önceki ölçüsü.....	72
Şekil 3. 17 Taze reyhanın kurutmadan sonraki ölçüsü.....	72
Şekil 3. 18 Kurutma başlangıcında nane ve reyhan fotoğrafları.....	73
Şekil 3. 19 Kurutma sonrasında nane ve reyhan fotoğrafları.....	73
Şekil 4. 1 Kollektör deneylerinin yapıldığı günlere ait ışıınım değerlerinin günün zamanına göre değişimi	76
Şekil 4.2 $\alpha=30^\circ$ için anlık kollektör etkinliğinin günün zamanına göre değişimi.....	77
Şekil 4.3 $\alpha=45^\circ$ için anlık kollektör etkinliğinin günün zamanına göre değişimi.....	78

Şekil 4.4 $\alpha=60^\circ$ için anlık kollektör etkinliğinin günün zamanına göre değişimi.....	78
Şekil 4.5 $\dot{m} = 0.033\text{kg} / \text{s}$ için sıcaklıkların günün zamanına göre değişimi	79
Şekil 4.6 $\dot{m} = 0.026\text{kg} / \text{s}$ için sıcaklıkların günün zamanına göre değişimi.....	79
Şekil 4.7 $\dot{m} = 0.012\text{kg} / \text{s}$ için sıcaklıkların günün zamanına göre değişimi.....	80
Şekil 4.8 Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişim	81
Şekil 4.9 Boyutsuz ekserji kaybının Reynolds sayısına göre değişimi.....	84
Şekil 4.10 Kurutma deney günlerine ait ışınlım değerlerinin günün saatine göre değişimi.....	85
Şekil 4.11 Nane ve reyhan için doğal kurutma şartlarında kütlenin değişimi.....	86
Şekil 4.12 Nane ve reyhan için doğal kurutma şartlarında nem oranının değişimi.....	86
Şekil 4.13 Nane için Nem içeriğinin kurutma zamanına göre değişimi.....	87
Şekil 4.14 Reyhan için Nem içeriğinin kurutma zamanına göre değişimi.....	88
Şekil 4.15 Reyhan ve Nane için Nem içeriği değişiminin karşılaştırması.....	89
Şekil 4.16 Nane için kuruma hızının zamana göre değişimi	90
Şekil 4.17 Reyhan için kuruma hızının zamana göre değişimi	91
Şekil 4.18 Nane ve Reyhan için kuruma hızının karşılaştırması.....	92
Şekil 4.19 Nane için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi.....	93
Şekil 4.20 Reyhan için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi.....	93
Şekil 4.21 Nane ve Reyhan için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi.....	94
Şekil 4.22 Nane için nem oranının zamana göre değişimi.....	95
Şekil 4.23 Reyhan için nem oranının zamana göre değişimi.....	95
Şekil 4.24 Nane ve Reyhan için nem oranının zamana göre değişimi.....	96
Şekil 4.25 Nane için nem değişiminin zamana göre değişimi.....	97
Şekil 4.26 Nane için nem değişiminin zamana göre değişimi.....	97
Şekil 4.27 Nane ve Reyhan için nem değişiminin zamana göre değişimi.....	98
Şekil 4.28 Nane kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.033\text{kg/s}$).....	99
Şekil 4.29 Nane kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.026\text{kg/s}$).....	100

Şekil 4.30 Nane kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.012\text{kg/s}$).....	100
Şekil 4.31 Reyhan kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.033\text{kg/s}$).....	101
Şekil 4.32 Reyhan kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.026\text{kg/s}$).....	102
Şekil 4.33 Reyhan kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.012\text{kg/s}$).....	102
Şekil 4.34 Nane için ekserji kaybının kuruma zamanı ile değişimi.....	103
Şekil 4.35 Reyhan için ekserji kaybının kuruma zamanı ile değişimi.....	104
Şekil 4.36 Nane için EKO'un kuruma zamanı ile değişimi.....	104
Şekil 4.37 Reyhan için EKO'un kuruma zamanı ile değişimi.....	105
Şekil 4.38 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Modified Page 1 Model).....	110
Şekil 4.39 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Modified Page 1 Model).....	110
Şekil 4.40 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Newton Model).....	113
Şekil 4.41 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Newton Model).....	113
Şekil 4.42 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Page Model).....	115
Şekil 4.43 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Newton Model).....	115
Şekil 4.44 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Modified Page II Model).....	118
Şekil 4.45 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Modified Page II Model).....	118
Şekil 4.46 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Henderson and Papis Model).....	120

Şekil 4.47 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Henderson and Papis Model).....	120
Şekil 4.48 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Diffusion Model).....	122
Şekil 4.49 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Diffusion Model).....	122
Şekil 4.50 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Wang and Singh Model).....	124
Şekil 4.51 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Wang and Singh Model).....	124
Şekil 4.52 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Bu çalışma).....	126
Şekil 4.53 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Diffusion Model).....	126

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1 Kuru meyvelerin bazı özellikleri.....	8
Tablo 1.2 Kuru sebzelerin bazı özellikleri.....	10
Tablo 2.1 Bazı sebze ve meyvelerin ilk ve son nem içerikleri.....	22
Tablo 2.2 Bazı meyvelerin kuruma sıcaklıkları.....	24
Tablo 2.3 Bazı sebzelerin kuruma sıcaklıkları.....	24
Tablo 2.4 Literatürde bulunan kuruma eğrisi modelleri.....	43
Tablo 3.1 Thermoanemometre (FVA645TH3) akış sensörünün teknik özellikleri.....	53
Tablo 3.2 Basınç modülünün teknik özellikleri.....	54
Tablo 3.3 FHA6467 tip nem sensörünün teknik özellikleri.....	55
Tablo 3.4 Gerilme ve sıkıştırma sensörünün teknik özellikleri.....	56
Tablo 3.5 Sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	62
Tablo 3.6 Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	63
Tablo 3.7 Kütle kaybının ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	63
Tablo 3.8 Hız ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	63
Tablo 3.9 Nem ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	64
Tablo 3.10 Basınç ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	64
Tablo 3.11 Diğer ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri.....	64
Tablo 3.12 Kurutma deneylerinde yapılan hataların toplam değerleri.....	68
Tablo 4.1 Modified Page I Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	109
Tablo 4.2 Newton Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	112
Tablo 4.3 Page Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	114
Tablo 4.4 Modified Page II Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	117
Tablo 4.5 Henderson and Papis Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	119
Tablo 4.6 Diffusion Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	121
Tablo 4.7 Wang and Singh Model için bağımlı parametrelerin değerleri.....	123

Tablo 4.8 Bu çalışmada tasarlanan bağıntı için bağımlı parametrelerin değerleri.....	125
Tablo 4.9 Nane ve reyhan için farklı kütleli debilerde difüzyon katsayısı.....	128
Tablo 4.10 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri.....	132
Tablo 4.11 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri.....	133
Tablo 4.12 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri.....	134
Tablo 4.13 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri.....	136
Tablo 4.14 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri.....	137
Tablo 4.15 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri.....	138
Tablo 4.16 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kurutma odasındaki ekserji ve etkinlik verileri.....	142
Tablo 4.17 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kurutma odasındaki ekserji ve etkinlik verileri.....	143
Tablo 4.18 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kurutma odasındaki ekserji ve etkinlik verileri.....	144
Tablo 4.19 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kurutma odasındaki ekserji ve etkinlik verileri.....	146
Tablo 4.20 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kurutma odasındaki ekserji ve etkinlik verileri.....	146
Tablo 4.21 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kurutma odasındaki ekserji ve etkinlik verileri.....	148

SİMGELER

A_s	Ürün yüzey alanı (m^2)
A_k	Kollektör yüzey alanı (m^2)
c	Özgül ısı (kJ/kgK)
$c_{\bar{u}}$	kurutulacak ürünün özgül ısı kapasitesi (kJ/kgK)
C	Mol derişikliği ($kmol/m^3$)
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
D_h	Hidrolik çap (m)
E	Buharlaşma için gerekli enerji (kW)
EKO	Enerji kullanım oranı
E_x	Ekserji (kW)
E_{x_k}	Ekserji kaybı (kW)
F_R	Isı kazanç faktörü
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{fg}	Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)
h_m	Taşınilma kütle geçiş katsayısı (m/s)
I	Eğik düzlem üzerine gelen toplam ışınlm (W/m^2)
J_A	Kütlesel akı (kg/sm^2)
J^*	Ortalama karışım mol hızına göre yayılım akısı ($kmol/s.m^2$)
k	İletimle ısı transfer katsayısı (W/mK)
K,k	Kuruma sabiti ($1/s$, $1/saat$)
L	Kurutulan ürün kalınlığı (m)
$\dot{m}$	Havanın kütlesel debisi (kg/s)
$\dot{m}_s$	Birim zamanda üründen ayrılan su buharı (kg/s)
M_1	Kurutmadan önceki nem (%)
M_2	Kurutmadan sonraki nem (%)
M_e	Kurutulan ürünün denge nem içeriğı ($kg_{su}/kg_{katımadde}$)
M_o	Ürünün başlangıçtaki nem içeriğı ($kg_{su}/kg_{katımadde}$)
M	Ürünün t anındaki nem içeriğı ($kg_{su}/kg_{katımadde}$)
$M_{y,b}$	Ürünün yaş baza göre nem oranı (%)
$M_{k,b}$	Ürünün kuru baza göre nem oranı (%)
M_h	Kuru havanın molekül ağırlığı ($kg_{su}/kg_{katımadde}$)
M_s	Suyun mol ağırlığı ($kg/kmol$)
n	Kullanılan modeldeki katsayı adeti

$\dot{n}$	Kimyasal reaksiyon nedeniyle bileşenin birim zamanda birim hacimdeki kütle artışı (kg/s.m ³)
n''	Sabit eksen takımına göre ısı akısı (kg/s.m ²)
N	Deneyisel veri sayısı
$\dot{N}$	Kimyasal reaksiyon nedeniyle bileşenin birim zamanda birim hacimdeki mol artışı (kmol/s.m ³)
N''	Mol akısı (kmol/s.m ²)
N_A	Sabit eksen takımına göre A bileşenin mol debisi (kmol/s)
p	Basınç (N/m ²)
$\dot{Q}$	Birim zamandaki ısı akısı (kW)
q_b	Suyun buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
Q_u	Faydalı enerji (kW)
R	Evrensel gaz sabiti (J/molK)
R_b	Su buharının gaz sabiti (J/kgK)
t	Zaman (s, saat)
T_a	Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (K)
T_m	Ortalama hava sıcaklığı (K)
T_w	Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı (K)
u	Kurumada ürünün çekme hızı (m/s)
U_L	Toplam ısı kayıp katsayısı (W/m ² K)
v	Akışkan hızı (m/s)
v^*	Karışımın ortalama molekül hızı (m/s)
x_A	A bileşenin mol oranı (C_A/C)
α	Isı yayılma katsayısı (m ² /s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)

Boyutsuz Sayılar

∇	Del operatörü
Le	Lewis sayısı
m_A	Bileşenin kütle oranı
MR	Nem oranı
Nu	Nusselt sayısı

Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
η	Etkinlik
η_{ex}	Ekserjetik verim
$(\tau\alpha)$	Yutma geçirme oranı

Alt İndisler

o	Çevre
A,B	İkili bir karşımda bileşenler
ç	Kollektör çıkış
d	Doğal şartlar
g	Kollektör giriş
h	Hava
k	Katı
kç	Kurutucu çıkış
kçek	Kurutucu tarafından çekilen
kg	Kurutucu giriş
m	Örneğin merkez şartları
nü	Nemli ürün
s	Su
sat	Doyma hali
ü	Üretilen
y	Kollektör yüzeyi
∞	Serbest akış

ÖZET

Doktora Tezi

YENİ TASARLANAN HAVALI KOLLEKTÖRLER YARDIMI İLE REYHAN VE NANE KURUTULMASI

Fevzi GÜLÇİMEN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
2008, Sayfa 152

Bu çalışmada, yeni geliştirilen havalı güneş kolektörleri kullanılarak reyhan ve nane kurutulması sağlanmış ve kurutma parametreleri deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır.

Çeşitli yüzey profillerine sahip havalı güneş kolektörleri, hava sirkülasyonu sağlayan radyal fan ve kurutma odasından oluşan, deney düzeneği kurulmuş ve deneyler yapılmıştır. Kurutma deneylerinde nane ve reyhana uygun kurutma sıcaklıkları seçilmiş ve farklı debilerde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarından yararlanarak, nane ve reyhan için ayrı ayrı deneysel bağıntılar elde edilmiş. Elde edilen deneysel bağıntılar literatür ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca nane ve reyhan kurutulması için matematik modelleme geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havalı Kolektörler, Gıda Kurutma, Matematik Modelleme, Nane, Reyhan, Güneş Altında Kurutma, Zorlanmış Taşınım, Difüzyon Katsayısı, Enerji, Ekserji.

ABSTRACT

PhD Thesis

DRYING OF THE MINT AND SWEET BASIL WITH NEW DESIGNED AIR COLLECTORS AND DETERMINING OF THE DRYING PARAMETERS

Fevzi GÜLÇİMEN

Fırat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Education
2008, Page: 152

In this study, drying parameters of mint and sweet basil were investigated as experimental and theoretical using solar drying system.

A forced convection solar dryer system consisting of new designed solar air collectors with different surface profiles, a circulation fan and a drying cabinet are used for the experiments. The drying experiments were conducted at different air mass flow rates at the selected appropriate drying temperatures of mint and sweet basil.

For the drying data obtained by experimental results of mint and sweet basil, new mathematical drying model which was developed as a function of none dimension numbers, was compared with ten different drying models in the literature. It was shown that the results were in good agreement.

Key Words: Solar Air Heater, Drying of Food, Mathematical Modeling, Mint, Sweet Basil, Sun Drying, Forced Convection, Diffusion Coefficient, Energy, Exergy.

1. GİRİŞ

Gıdaların saklanması için geçici veya kalıcı koruma yöntemleri uygulanır. Geçici yöntemler, gıdayı soğutmak veya soğutucuda saklamak, gıdanın nem ve hava ile temasını kesmek gibi özetlenebilir. Kalıcı veya daha uzun süre koruma yöntemine en iyi örnek ise gıdaların kurutulmasıdır.

Kurutma, maddelerin ihtiva etikleri sudan uzaklaştırılması olayına denir. Gıda kurutması da aynı şekilde meyve ve sebzelerin bünyesindeki % 80-95 oranlarındaki suyun % 10-20 oranlarına düşürülerek uzun süre dayanmasını sağlama işlemidir. Bu nedenle kurutma, ürünlerdeki nem miktarını bozulmayı önleyecek seviyeye düşürdüğü için nem miktarının azalması olarak da tanımlanabilmektedir.

Ülkemizde tarım ürünlerinin önemli bir kısmı kurutularak saklanmak veya depolanmaktadır. Aksi takdirde tarım ürünlerinin hızlı bir sürede bozulması, belirli bir kısa zaman aralığında tüketilmesi zorunluluğu doğurmaktadır. Ülkemizin büyük bir tarımsal potansiyeline karşın, tarımsal ürünlerinin işlenmesinden, depolanmasından, tüketime sunulmasında kullanılan teknolojisi istenilen düzeyde değil. Ancak güneş enerjisinin kullanıldığı kurutma sistemlerinin geliştirilmesi kalite ve hijyenik yönden önem taşıyabilmektedir. Yine bazı ürünlerin kurutulmasında, enerji tüketen yapay kurutucuların kullanıldığı bilinmektedir. Kurutma teknolojisinde enerji ekonomisi sağlanması bakımında güneş enerjili kurutucuların geliştirilmesi de önem kazanmaktadır. Kurutma yöntemleri arasında, doğal kurutmadan sonra en ekonomik olanı güneş enerjisi ile ısıtılan havanın kullanılarak yapılan kurutmadır.

Ancak bu sırada tat, görünüş, renk, besin değeri gibi kalite özellikleri mümkün olduğunca az değişmeli, ayrıca pişirmek üzere su ilave edildiğinde taze iken içerdikleri miktara yakın su alabilmelidir.

Kurutarak meyve ve sebzeleri uzun süre saklama yönteminin uygulanmasındaki işlemler şöyledir.

- Ön işlemler
- Kurutma işlemi
- Son işlemler
- Ambalajlama
- Depolama

Kurutma tekniği, insanoğlunun doğadan öğrendiği ve gıdaların bozulmalarını engelleyebilmek için çok eskiden beri uyguladıkları bir saklama yöntemidir.

Kurutma tekniğinin uygulamasında elde edilen gelişmelere bağlı olarak sebze ve meyve kurutma sektörü ortaya çıkmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Günümüzde birçok kurutma yöntemi kullanılmaktadır. Bunlara birkaç örnek verecek olursak;

Güneşte Kurutma; Güneş enerjisinden yararlanarak açık havada yapılan kurutma işlemidir. Tabii kurutma olarak da isimlendirilir.

Meyveler güneş enerjisinden yararlanarak açık havada kurutulurken toz, toprak, yağmur ve sergi yerlerinde dolaşan çeşitli böcek ve hayvanlar ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedirler.

Bu zararları en aza indirmek için şu hususlara dikkat etmelidir.

- Kurutulacak meyveler kurutma olgunluğunda hasat edilmelidir. Hasat usulüne uygun olarak yapılmalıdır.
- Yabancı maddeler sap, çöp, yaprak, taş ile bereli olanlar ayrılmalıdır.
- Gerek temizlemek, gerekse tarım ilâcı artıklarından arındırmak üzere yıkanmalıdır.
- Boylama yapılmalıdır.
- Bütün parça ve dilim meyveler ayrı ayrı işleme tabi tutulmalıdır.
- Kükürtleme usulüne uygun olarak yapılmalıdır.
- Kükürtleme odaları usulüne uygun olmalıdır.
- Meyveler kükürtlenme odalarına kerevetler üzerinde konmalıdır.
- Kurutma toprak üzerinde değil meyvenin cinsine göre kerevetler veya yüksek sergilerde yapılmalıdır.
- Kurutma mahallinin üzerleri yağmura karşı korunmak üzere tenteli olmalı veya kerevetler raflı olup üst üste yerleştirilmelidir.
- Kuruyan meyveler temizleme, seçme, boylama işlemlerine tabi tutulmalıdır.
- Meyveler terletilerek nem dengelenmesi sağlanmalıdır.
- Kükürtlenmeyen meyveler zararlılara karşı fümige edilmelidir.
- Meyvenin özelliğine uygun olarak ambalajlanmalıdır.
- Ambarların serin, havadar, loş, kuru, korumalı olmasına dikkat edilmelidir.
- Mevsim başlamadan önce en yakın Tarım İl Müdürlükleri, Araştırma Enstitüleri, İl Kontrol Laboratuar Müdürlüklerine başvurularak bilgi ve yardım istenmelidir. (<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>).

Suni Kurutma; Kurutma tesislerinde dışarıdan alınan havanın bir ısıtıcı yardımıyla ısıtıldıktan sonra kurutulacak gıda maddesiyle temas ettirilmesiyle yapılan kurutma işlemidir.

Kombine Kurutma; Güneş enerjisi ve çeşitli yakıtlardan yararlanarak yapılan kurutmadır. Güneşli mevsimlerde güneş enerjisinden, güneş enerjisinin yeterli olmadığı günlerde ise katı, sıvı veya gaz yakıtla sıcak hava elde edilmektedir. Bu kurutucular küçük kapasiteli olduklarında köy tipi kurutucular olarak da isimlendirilmektedir. Fazla yatırım gerektirmediği ve kaliteli ürün elde etme imkânı olduğu için özellikle güneşte kurutmanın yerine tavsiye edilmektedir.

Dondurarak Kurutma; Bu yöntemde kurutulacak madde önce dondurulur. Sonra meydana gelen buz, vakumla buhar halinde emilir ve su buharı buz kondansatörlerinde dondurularak uzaklaştırılır. Bu yöntemle kurutulan ürün duysal özellikleri ve besin değeri yönünden üstündür. Ancak yatırım masrafı yüksektir. Daha çok su ilavesiyle hazırlanan hazır çorbaların üretiminde kullanılmaktadır.

(<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>).

Bu çalışma kombine kurutma sistemine iyi bir örnek teşkil etmektedir. Uygun bir kurutmada aşağıdaki özelliklerin bulunması gereklidir.

- Etkili ve verimli kurutucu kullanmak.
- Az kurutucu ile üründen çok miktarda su uzaklaştırmak.
- Nemi mümkün olduğunca hızla uzaklaştırmak, bu arada gıdada bozulmalara ve çatlamalara neden olmamak.
- Kurutucudan kuruyan ürünü kolayca ayırabilmek.
- Kurutucuya ürünlerin kolay yerleştirilmesi ve kullanım kolaylığı.
- Kurutulacak ürün ile etkileşmemek.
- Ekonomik olmak.

İyi bir kurutucuda ise maksimum verimi elde etmek için aşağıdaki özelliklerin bulunması istenir.

- Kurutma sisteminin kurutulacak ürüne uygun olması
- Kurutma işleminin emniyetli çalışması
- Kurutma işlemi sırasında ürünün verdiği fire
- Yıllık kurutulacak ürün miktarının belirlenmesi
- Kurutma sisteminin kuruluş maliyeti
- Kurutma sisteminin kullanacağı enerji tipinin müşteriye ve kullanılacak yere uygunluğu
- Kurutma sisteminin veya kurutma tesisinin işletme masrafları
- Kurutma sisteminin tamir bakım ve kullanım kolaylığı

- Ürün kalitesi ve besin değerinin düşmemesi.
- Ürünün dış görünüşünün güzelliği ve aromasının bozulmaması.
- Kurutma sisteminin çeşitli kapasitelerde çalışabilme esnekliği
- Çevre kirliliğine etkisi olup olmadığı

Yiyeceklerin kurutulması, toplumsal yapı ile bağlantılıdır. Göçebelik döneminde yiyecekler bol olduğu zamanlarda kurutulularak, gidilen yerlere götürülür ve daha sonra hazır yiyecek olarak tüketilirdi. Göçebelikten tarım düzenine geçildikten sonra da, yiyeceklerin kurutulmasına devam edilmiştir. Yazın bol olan yiyecekler, kışın tüketilmek üzere kurutulmuşlardır. Gıdaların kurutulması mevsimlere göre hareket etmenin bir kanıtıdır. Çünkü tarımsal ekonomik yapıda insanlar, yiyecekleri mevsimlere göre tüketirler (www.herbalistatabey.com.tr).

Hazır gıda üreten sanayinin gelişmesi ile kurutulmuş ürünlere talep her geçen gün artmaktadır. Hazır çorba ve yemekler, hazır baharat ve sos karışımları, bitkisel boyalar ve ilaçlar kurutulmuş bitkilerden elde edilerek gıda sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dünya üzerinde 750.000 – 1.000.000 arasında bitki türünün bulunduğu tahmin edilmektedir. Bunların 500.000 kadarı tanımlanıp isimlendirilmiştir. Gıda elde etmek için üretilen türler 3000 civarındadır. Buna karşılık gıda olarak kullanılan yabancı bitki türü 100.000' in üzerindedir. Tedavi amacıyla kullanılan bitkilerin miktarı antik çağdan beri devamlı artış göstermektedir. Dünya Sağlık Örgütü' nün (WHO) 91 ülkenin tıbbi bitkileri üzerinde yapmış olduğu bir araştırmaya göre, tedavi amacıyla kullanılan tıbbi bitkilerin toplam miktarı 20.000 civarındadır. Son yıllarda tıbbi bitkiler ve bunların kurutulmasıyla elde edilen aktif maddeler üzerinde yapılan çalışmalar ve bunlara karşı olan ilgi çok artmıştır. Tıbbi bitkilerin ilaç olarak kullanılan kısımları yaprak, çiçek, tohum, kök, kabuk vs. içlerindeki etkili bileşikler nedeniyle hastalıkları tedavi ettikleri ispatlanmıştır. Her bitkide içindeki etkin maddenin en yüksek olduğu bir dönem vardır. Bu da her tıbbi ilaç için özel bir toplama zamanı bulunduğunu göstermektedir. Toplanan bitkilerin bozulmasını önlemek için uygun şartlarda kurutulması gerekmektedir. Kurutulmuş tıbbi bitkilerin tedavi özellikleri bir yıl kadardır (www.herbalistatabey.com.tr).

Bir yıldan sonra tıbbi bitkilerdeki etkin madde bozulmaya ve sonuçta etkisi azalmaya başlar. Bir yıldan fazla etkisinin devamını sağlamak için tıbbi bitki özel şartlarda saklanmalıdır.

Bunun için;

1- Toplama: Genelde el ile toplama yapılmakla birlikte tarımını yapan ülkelerde özel tarım donanımları ile toplama işlemleri yapılmaktadır. Tıbbi bitkilerin hazırlanmasında kullanılacak materyal genel olarak aşağıda belirtilen zamanlarda toplanılmalıdır.

- a- Yapraklar, bitki çiçek açtığı zaman
- b- Çiçekler, tamamen açılmadan evvel ya da tomurcuk halinde
- c- Toprak altı kısımlar, bitkinin toprak üstü kısımları kuruduktan sonra
- d- Kabuklar, bitki yapraklarını döktükten sonra
- e- Meyve ve tohumlar, özel kayıtlar yoksa olgunlaştıktan sonra

Yaprak, çiçek ve otlar hiçbir zaman yağmurlu bir günde veya üzerinde çiğ veya nem varken toplanmamalıdır. Çünkü böyle şartlarda toplanan üründen kaliteli tıbbi bitki elde etmek mümkün değildir.

2- Kurutma: Taze materyal çok kısa zamanda bozulur. Bu sebeple en kısa zamanda kurutma işlemi yapılmalıdır. Kurutmada seçilecek yol kurutulacak malzemenin cinsine ve taşıdığı etki maddelerin durumuna göre yapılmalıdır. Yalnız enzimlerin en etkili olduğu ısının 50-70°C arasında bulunduğunu düşünerek kurutma esnasında malzeme, bu derecenin altına veya üstüne çıkılmamalıdır.

3- Saklama: Kurutulmuş olan malzemenin özelliklerini kaybetmeden muhafaza edilebilmesi için bazı şartlara uyulması zorunludur. Saklama sırasında tıbbi bitkilerin bozulmasına sebep olan rutubet, sıcaklık ve ışıktır. Bunun için tıbbi bitkilerin serin, kuru ve karanlık bir yerde saklanmaları gerekir. Kese kâğıdı, bez torba, mukavva kutu, teneke kutu veya cam kavanozlar saklamak için uygundur. (www.herbalistatabey.com.tr).

Meyvelere kurutulmanın yanında başka işlemlerde yapılmaktadır.

Meyvelerin Kurutulması;

Kurutulacak meyveler olgun, sağlam, yarasız beresiz, çürüksüz olmalı, böcek yeniği bulunmamalıdır. Değişik meyvelerin kurutulmasında uygulanan temel işlemler birbirine benzer olup şöyledir.

- Yıkama
- Yabancı maddelerden ayırma
- Boylama
- Meyvenin cinsine göre kabuk soyma
- Bölme, dilimleme, doğrama
- Çekirdek çıkarma

Bunlara ilave olarak gerektiğinde haşlama, alkali çözeltilere bandırma, kükürtleme gibi ön işlemler uygulanmaktadır.

Kükürtleme;

Kükürtleme kurutulacak meyveler S_0^2 (kükürt dioksit) verilmesidir. Genellikle bütün meyvelerde renk ve vitamin kaybını önlemek için yapılır. Kükürtleme ile kabukta yarıkçıklar meydana gelmekte, su daha hızlı buharlaşmakta ve meyve daha hızlı kurumaktadır.

Ayrıca zararlı böceklerin yumurta ve kurtçuklarını öldürerek meyvelerin daha uzun süre dayanmasını sağlamaktadır. Kükürtleme iki şekilde yapılır. Meyveler;

1. Kükürtleme odalarında toz kükürt yakılarak elde edilen S_0^2 gazı ile temas ettirilir.
2. Belli yoğunluktaki sodyumbisülfid, sodyumsulfid vb. çözeltilere daldırılır veya bu çözeltiler meyveler üzerine püskürtülür.

Yakma suretiyle yapılan kükürtleme daha çok kullanılmaktadır. Kükürtlemede standart; Kurutulmuş meyvelerde bulunması gereken en az ve en fazla S_0^2 miktarları yönetmeliklerle sınırlandırılmıştır. Bu miktarların dışına çıkılmasına izin verilmez. Örneğin kayısı ve şeftalide rengin zarar görmemesi için S_0^2 miktarı 2/kg olarak sınırlandırılmıştır.

En fazla kurutulan meyvelerdeki işlemleri özetlersek;

Üzümlerin kurutulması;

Üzüm, kurutularak muhafaza edilen ürünlerin başında gelir. Kurutulacak üzümlerin belli bir olgunlukta olması gerekir. Suda çözünen kuru madde miktarı % 22-23 olduğunda üzümler hasat olgunluğuna gelmiş demektir.

Üzümler kurutma mahalline geldiğinde doğrudan doğruya veya bandırılarak güneşte kurutulurlar. En çok uygulananı bandırılarak güneşte kurutulmasıdır.

- Bandırılan üzümler sergi yerlerine taşınır. Sergiler iki tiptir.

a) Yer sergileri: Toprak sergiler, beton sergiler, kağıt sergiler; propilen kanaviçe sergiler yer sergilerindendir. Bunların bir de tenteli, korumalı olanları bulunmaktadır.

b) Yüksek sergiler: Telli sistem olarak da isimlendirilmektedir. Telli sistem tek sıralı, çift sıralı ve hamak şeklinde düzenlenmektedir.

- Ülkemizde üzümler yaklaşık 10 günde kurur. Bandırılmadan kurutulan üzümlerde kuruma 20 günden fazla sürmektedir.

- Kuruyan üzümler sabah veya akşam serinliğinde toplanır. Elle tanelenerek salkımlarından ayrılır. Tanelenen üzümler kalburlardan elenerek veya üzüm savurma makinelerinden geçirilerek temizlenir. 50 kg' lık kanaviçe çuvallar içinde üzüm işleme tesislerine gönderilirler.

- Üzüm işleme tesislerinde kuru üzümler yıkanır, kükürtlenir, kurutulur, irilik ve renklerine göre sınıflandırıldıktan sonra ambalajlanır.

Kuru üzümlerde su oranı % 12-15 olmalıdır. Buna göre 3.5- 4 kg. taze üzümünden 1 kg kuru üzüm elde edilmektedir.

Ayrıca 1.5 ton kuru üzüm için 1 kg kuru kükürt yapılır. Kükürtleme süresi 10 dakikadır.

Bandırma;

Bandırma işlemi üzümün dışındaki doğal olarak bulunan mum tabakasını gidermek ve kurutmayı hızlandırmak amacıyla uygulanır. Ayrıca üzümlerin rengine de olumlu etkisi vardır.

Bandırma çözeltileri potasyum karbonat içerip çeşitli şekillerde hazırlanmaktadır. Ülkemizde "Potasa" denilen bandırma çözeltisi kullanılmaktadır.

İncirlerin kurutulması;

Ağaçta ve yerde kurutulan incirler toplanarak sandıklara ve çuvallara doldurulur ve işleme mahalline gönderilir.

İncirler fumigasyon, seçme, sınıflandırma, yıkama işlemlerinden sonra ambalajlanır. Ancak ambalajlamadan önce incirlere şekil verebilmek amacıyla buharda veya ısıtılmış deniz suyuunda 3-4 dakika bekletilmektedir.

- Bazı çeşitlere kükürtleme uygulanmaktadır. Kükürtleme süresi 4 saat veya üzerindedir.
- Tüylü incir çeşitlerinin kurutulmasında tüyleri gidermek amacıyla bandırma yapılır.

Bandırma renk ve yumuşaklık içinde tavsiye edilir.

Kayısıların Kurutulması;

Kurutmalık çeşitlerin bazı özellikleri taşıması gerekmektedir.

- Meyvenin her tarafı aynı zamanda olgunlaşmalı,
- Çekirdeğinden kolay ayrılmalı,
- Çekirdeği küçük, bademi tatlı olmalı,
- Kükürtlendikten sonra rengini uzun süre muhafaza etmeli,
- Verimi yüksek olmalıdır.

Başlıca kurutmalık kayısı çeşitleri Çöloğlu, Hasanbey, Hacıhaliloğlu, Karakubuk, Hacıköz, Çataloğlu dur. Kayıslarda suda çözünen kuru madde miktarı % 26 ya ulaştığında kurutma olgunluğuna gelmiş demektir.

- Kurutma mahalline gelen kayıslara yıkama ve boylama işlemleri uygulanır.
- Kayıslar bütün, çekirdeksiz bütün ve yarım halde kurutulur.
- Kayıslar çeşit ve olgunluk, bütün ve yarım oluşuna göre ve yakılan kükürt miktarına bağlı olarak 2-6 saat kükürtleme odalarında tutulurlar.

- Daha sonra kerevetler sergi yerlerine taşınarak kurumaya bırakılırlar. Kayısların su miktarı % 20 nin altına düştüğünde kurutmaya son verilir.

- Kuruyan kayıslara seçme, boylama, gerektiğinde kükürtleme, su miktarının dengelenmesi, ambalajlama öncesi kayıslara uygulanan işlemlerdir.

Eriklerin kurutulması;

Genellikle koyu renkli, iri, ufak çekirdekli, et kalınlığı fazla, kuru maddesi yüksek, parlak renkli çeşitler kurutmalık olarak kullanılır. Eriklere bandırma yapıldıktan sonra güneşte kurumaya bırakılır. Kuruma iyi havalarda 7 günde tamamlanır ve bunu pratik olarak anlamak için erikler iki parmak arasında sıkıldığında çekirdeği kaymamalı ve kabuğu sert olmamalıdır.

Elmaların Kurutulması;

Elmalar güneşte kurutmaya elverişli değildir. Onun için kurutma tesislerinde kurutulurlar. Elmalar soyulup dilimlendikten sonra kükürtlenir 1 ton elma için 3-4 kg. kükürt kullanılır.

Kuru meyvelere ilişkin bazı veriler Tablo 1,1’de görülmektedir.

Tablo 1.1 Kuru Meyvelerin Bazı Özellikleri

(<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>).

Meyve Türü	Verim (%)	Son Üründe Su oranı (%)	Kurutma süresi (gün)
Çekirdeksiz üzüm	25-28	12-15	8-10
Kayısı	20-30	15-20	5-6
Erik	25-30	16-19	7
Elma	11-12	3-5	15-18

Nemin dengelenmesi;

Kurutulan meyvelerde nem miktarı her partide, aynı partinin ayrı kısımlarında ve hatta değişik kısımlarında farklıdır. Ürün kalitesi ve daha sonraki işlemler bakımından nemin dengelenmesi gerekmektedir. Kurutulan meyveler büyük sandık veya kutuların içinde kapağı kapalı olduğu halde 2-3 hafta depolarda bekletilir. Böylece meyvelerin nem miktarı eşitlenmektedir.

Sebzelerin Kurutulması;

Sebzeler güneşte kurutulduklarında kalite kayıpları fazla olduğundan kırmızıbiber ve mantar dışında ticari amaçla yapılan sebze kurutmacılığında mutlaka kurutma tesislerine ihtiyaç vardır. Sebze kurutma tesislerinin bantlı, tünel, kabin vb. tipleri bulunmaktadır. Kurutulacak sebzelere sebzenin özelliğine göre ayıklama, yıkama, kabuk soyma, doğrama, haşlama, soğutma, kükürtleme vb. ön işlemler uygulanır.

Rengin esmerleşmemesi için haşlama ve kükürtleme önemlidir.

Haşlama; Sıcak su veya buharda, sebzenin türüne göre belli sürelerde yapılır. Ancak kırmızı biber, soğan, sarımsak gibi sebzelere uygulanmaz.

Kükürtleme; Meyvelerde olduğu gibi yapılır. Kükürtleme ile sebzelerin rengi korunduğu gibi C vitamini ve karoten kaybı da önlenmektedir. Kurutulan sebzeler fümige edilir, ambalajlanır ve depolanır.

Fumigasyon; Meyve ve sebzeleri zararlılara karşı korumak üzere kapalı ortamda metil bromid vb. maddeler yakılarak yapılır. 100 m³ hacim için 2-3 kg metil bromid kullanılır. Fümigasyon süresi 24 saattir. Fümigasyon ambar koşullarına göre tekrarlanabilir. Kükürtlenen meyveler fümige edilmezler, ancak SO² miktarı kontrol edilerek gerektiğinde tekrarlanmaktadır.

Ambalajlama;

Kuru meyveler: Ağaç kasalar, polietilen, propilen, selofon torbalar, karton ve metal kutulara ambalajlanmaktadır. Kasa veya kutuların içine istendiğinde kağıt yayılmaktadır.

Kuru sebzeler: Nem geçirmez polietilen, alüminyum varak kombinasyonlu kutular, mumlanmış kağıt veya karton kutular içinde ambalajlanır. Küçük ambalajlar 10–20 kg lık büyük ambalajlara yerleştirilir.

Kurutma tesislerinde kurutulan bazı sebzelere ilişkin veriler Tablo 1,2’de görölmektedir.

Kurutulmuş meyve ve sebzelerin besin değeri tazesine göre C vitamini ve karoten bakımından ve kükürtlenen ürünlerde B vitamin kaybı olmasına rağmen kurutulmuş meyve ve sebzeler iyi birer karbonhidrat ve vitamin kaynağıdır.

(<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>).

Tablo 1.2 Kuru Sebzelerin Bazı Özellikleri

(<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>).

Sebze Türü	Haşlama Süresi (dk.)	Ön kurutma (sıcak °C)	Son kurutma (sıcak °C)	Son ürün (Su %)	Madde I. Verim (%)
Fasulye	2-3	60-65	50-55	7-9	7
Havuç	6-8	65-70	55-60	7	5-7
Lahana					
Yeşil	1	60-65	55-60	7	6-8
Beyaz	1.5-2	60-65	55-60	5	4-6
Kırmızı	1.5-2	60-65	55-60	5	6-7
Karnabahar	-	60-65	-	5	4-5
Bezelye	3-4	65-70	60-65	7	9-14
İspanak	-	70	60-65	6	6-8
Kök Kereviz	2	60-65	55	5-6	5-6
Soğan	Haşlanmaz	60-65	55-60	4-5	8-10
Pırasa	-	60-65	55	5	7-10
Mantar	Haşlanmaz	60-65	55-65	12	10
Biber	Haşlanmaz	60-65	60	7-8	15

Gıdaların kurutulmasının yanında depolanarak korunması da çok önemlidir. Depolamada amaç, tarımsal ürünlerde küflenme, renk bozukluğu, acılaşıma, lezzet ve aroma kaybının önlenmesidir. Depolarda sağlanan düşük hava nemi ve düşük sıcaklıkla küflerin üremesi durdurulur. Depo olarak kullanılacak yerin özellikleri şu şekilde sıralanabilir.

- Serin ve kuru nitelikte olmalıdır.
- Doğrudan güneş ışığı almamalı, nem yapmamalıdır.
- Depo tabanı su baskınlarına karşı yerden yüksek olmalıdır.
- Depo üstü tavan ve çatılar akmayı, sızmayı önlemeli, sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyi önleyecek şekilde yalıtımlı olmalıdır.
- Kanalizasyon boruları geçen ve lavabo olan yerler depo olarak kullanılmamalıdır.
- Depo sıcaklığı 5 – 10 °C olmalı, depo bağıl neminin %70'in üzerine çıkmaması sağlanmalıdır.

Türkiye’ de bazı bölgelerde yetişen ürünler ticari amaç için yetiştirildiğinden kurutma işlemi önem kazanmakta ve Tarım ve Köy işleri Bakanlığı tarafından bu çalışmalara hız verilmektedir. Örnek olarak; Ege bölgesinde üzüm ve incir, Karadeniz’ de fındık, Trakya ve İç Anadolu’nun bir bölümünde ayçiçeği, Kahramanmaraş’ ta kırmızıbiber, Malatya’ da kayısı, Ulukale’ de (Çemişgezek) dut yalnız bulundukları bölgenin değil Türkiye’nin de başlıca ürünlerindendir. Dünya’da ticareti yapılan kurutulmuş sebzelerin %98’i kontrollü koşullarda, sıcak hava ile kurutulmuş, belirli fiziksel özelliklere sahip, görünüş ve renk bakımından üstün kalitede ve hiç yabancı madde bulundurmamasından dolayı hemen tüketilmeye hazır ürünlerdir (Akpınar, 2002).

Dünya pazarlarının kurutulmuş sebze ve meyveye olan talep fazlalığı, bu pazarın aradığı sebze türlerinin ülkemizde bol olarak yetiştirilmesi ve kurutulmuş sebze alıcısı Avrupa ülkelerine yakınlığımız gibi nedenlerden dolayı, ilk kez 1965’de Yenice’de sıcak hava ile kurutma yapabilen tesis kurulmuştur. 1982 yılından bu yana üretimde bulunan meyve-sebze kurutma fabrikalarının sayısı 4 olup üretimlerinin %95’i dış pazara yöneliktir (Bingöl, 1983).

Kurutma işlemi sırasında sürekli bir kütle ve ısı transferi gerçekleşir. Mühendislik açısından bu karmaşık işlemin kontrol parametrelerinin daha iyi anlaşılabilmesi çok önemlidir. Kurutma işleminin matematiksel modellenmesi yeni kurutma sistemlerinin tasarımında veya geliştirilmesinde kullanılabildiği gibi, kurutma işleminin kontrolü amacıyla da kullanılabilir. Bu modellerde kullanılan kurutma havası sıcaklığı ve hızı gibi tüm parametreler direkt olarak kurutma koşullarına bağlıdır. Kurutma işlemini tanımlamak için birçok matematiksel model geliştirilmiş ve pek çok ürün incelenmiştir (Akbulut, 2006).

1.1 Literatür Araştırması

Nane ve reyhan kurutmayı matematiksel olarak modellemek ve deneysel sonuçları yorumlamak için, kurutma ile ilgili olarak yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatür araştırmasında yurtiçi ve yurtdışında yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmaları havalı kolektörler ve kurutma olarak iki ayrı sınıfta incelersek havalı kolektörlerle yapılan çalışmaların birkaçını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

Yıldız ve arkadaşları (2002), yaptıkları çalışmada emici plakanın üstünde ortada ön emici olarak hizmet eden, havanın geçtiği yere diyagonal yerleştirmiş, plakanın üzerine alüminyum yün kaplatılarak değişiklik yapılmış havalı bir güneş ısıtıcısı dizayn ve test etmişlerdir. Geliştirdikleri kolektör etkinliği aynı ölçülere sahip düzlemsel güneş kolektörü ile karşılaştırmışlardır.

Bu iki kolektörün etkinlikleri sabit sıcaklık ve aynı hava hızlarında hesaplamışlardır. Havaya transfer edilen ısıнын, ön emici yüzeyin kullanıldığı havalı güneş ısıtıcısında oldukça arttığını bulmuşlardır.

Forson ve arkadaşları (2003), tek geçişli, çift boşluklu bir havalı güneş kolektörünün matematiksel modelini yapmıştır. Araştırmacılar başarılı sonuçlar elde ettiklerini, sayısal çözümleme ile deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Momin ve arkadaşları (2002), plaka şeklindeki güneş kolektörlerinin emici yüzeylerine V-şekilli kanatçıklar yerleştirmişlerdir. Bu geliştirdikleri kanatlı kolektörleri verim ve basınç kaybı yönünden düz klasik kolektörlerle karşılaştırmışlardır ve geliştirdikleri kolektörlerden deneysel bağıntılar elde etmişlerdir.

Torres-Reyes ve arkadaşları (2003), termodinamiğin I. ve II. kanununu temel alarak optimum kolektör performans parametrelerini belirlemişlerdir. Kolektörlerin ekserji analizlerini yapan araştırmacılar çeşitli deneysel bağıntılar sunmuşlardır.

Hegazy (2000), yaptığı araştırmada klasik tip kolektörler yerine yutucu yüzeylere sahip güneş kolektörleri geliştirmiştir. Araştırmacı geliştirdiği kolektörleri verim yönünden klasik kolektörlerle karşılaştırmıştır.

Naphon ve Kongtragool (2003), yaptıkları çalışmada havalı güneş ısıtıcılarının performans ve ısı transfer karakteristiklerini nümerik olarak araştırmışlardır.

Abu-Hamdeh (2003), yeni bir ince plaka kaplı bir havalı güneş kolektörü geliştirmiş ve ısı kazancını ve ısı etkinliğini araştırmıştır. Yapılan çalışmada geliştirdiği kolektörün ısı transferi ve basınç kaybı yönünden düz kolektörle karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada kolektör içi hava hızı ile kolektör dışı hava hızının kolektör verimine etkisi araştırılmıştır. Araştırmacı çalışmada çeşitli deneysel bağıntılar vermiştir.

Ammari (2003), tek geçişli düzlemsel havalı güneş kolektörünün ısı performansını hesaplamak için matematiksel bir model geliştirmiştir. Hava akışının hacimsel oranının kolektör uzunluğu ve havalı güneş ısıtıcısının ısı performansı üzerindeki etkisini, emici yüzey ve alt tabaka arasındaki boşluk için araştırmıştır. Ayrıca, en genel şekli ile sunduğu havalı güneş ısıtıcılarının bu dizaynının nümerik karşılaştırmasını yapmıştır.

Bari (2000), Malezya’da herhangi bir pozisyonda farklı işlem periyotları için güneş kolektörlerinin çevre şartlarına uyumunu ve en iyi eğim açısını belirlemek için bir metod tanımlamıştır.

Yeh ve arkadaşları (2002), geliştirdikleri kolektörün emici yüzeyinin alt ve üstüne kanatçıklar eklemişlerdir. Araştırmacılar, havanın aktığı kanalı, iki parçaya bölerek çift akış sağlamışlardır.

Çalışma hem deneysel hem de analitik olarak yapılmış ve bulgular bir birleri ile kıyaslanmıştır. Çift akışlı hava kanalını tek akışlı hava kanalından daha etkin çalıştığını tespit etmişlerdir.

Flores-Irigolen ve arkadaşları (2004), tünel şeklinde havalı bir güneş ısıtıcısının ısı transferi dinamiğinin matematiksel modellemesini yapmışlardır. Modeli bir boyutlu ve kararsız durumda incelemişlerdir.

Ürün kurutma tekniği üzerine de, literatürde yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Birçok araştırmacı çeşitli ürünlerin kurutulmasında farklı teknikler kullanmışlar ve birçok kurutucu tasarlamışlardır. Araştırmacılar, kurutma parametreleri ve matematiksel modeller geliştirmişlerdir.

Akbulut (2006) yılında yaptığı çalışmada Elazığ yöresi dutlarını kurutmuş ve kurutma parametrelerini araştırmıştır. Yapılan çalışmada Elazığ yöresinde yetişen dutların kuruma parametreleri deneysel ve teorik olarak araştırılmış ve havalı güneş kolektörü, sirkülasyon fanı ve kurutma kabininden oluşan zorlanmış taşınımlı güneş enerjili kurutma sistemi, deneyler için kullanılmıştır. Kurutma deneylerinden önce üç, beş ve yedi kademeli olarak imal edilen havalı güneş kolektörlerinin etkinlik deneyleri, farklı kurutma havası debilerinde yapılmıştır.

Karim ve Hawlader (2004), muzun kuruma karakteristiği üzerine teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Hasat döneminde tarımsal ürünlerdeki kayıplarının kurutma tekniklerinin kullanılmasıyla kesin olarak azaltılabileceğinden bahsetmişlerdir.

Can (1992), belirli kurutma koşullarında biyolojik ürünler içindeki nem geçişinin kinetiği konusunda bir çalışma yapmıştır. Patates, elma, ekmek mayası, yumurta akı gibi biyolojik ürünler içindeki nem geçişini deneysel ve teorik olarak incelemiştir.

Ficarella ve arkadaşları (2002), makarnanın kurutulmasını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Özellikle sıcaklık dağılıma açısından olayı inceleyen araştırmacılar, hava dağılımını sağlayan kolektörü sürekli modifiye etmişler ve ideal kolektöre ulaşmışlardır.

Chiang ve Petersen (1985), kızartılmış patates kurutmayı incelemişlerdir. Araştırmacılar ürünün ağırlık kaybını sürekli ölçerek matematiksel kurutma eğrileri elde etmişlerdir.

Dinçer ve Hussain (2004), sayısal ve deneysel çalışma yaparak düzgün şekilli ürünlerinin kurutulması için yeni bir matematiksel kurutma modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelle diğer modelleri karşılaştıran araştırmacılar kendi modellerinin pratik ve kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Rossello ve arkadaşları (1992), patates küplerinin sıcak hava ile kuruma kinetiklerini tanımlamak için basit bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Kurutulan 1 cm' lik patates küpleri üzerinde hava akışının ve hava sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Hesaplanan ve deneysel olarak bulunan ortalama nem oranının uyum içerisinde olduğunu görmüşlerdir.

Dinçer (1992), küresel şekilli ürünlerin merkez, merkez ile yüzey arasındaki orta nokta ve yüzey kısımları için deneysel ve teorik boyutsuz sıcaklık dağılımlarını çıkarmıştır. Elde edilen deneysel ve teorik boyutsuz sıcaklık dağılımları arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmiştir.

Midilli ve arkadaşları (1999), mantar ve polenin kuruma periyotlarını araştırmışlardır. Mantar kurutma deneylerini hem laboratuvar tip bir kurutucuda hem de atmosferik şartlarda güneşte ve gölgede yapmışlardır.

Querioz ve Nebra (2001), farklı kurutma havası hızlarında muzun kuruma kinetiği üzerine deneysel ve teorik olarak bir araştırma yapmışlardır. Sabit difüzyon katsayısı kabulüne göre muzun kurutma işlemi boyunca nem içeriğini deneysel olarak tespit etmişlerdir.

Simal ve arkadaşları (1994), küp şeklinde kesilmiş patateslerin birinci azalan kurutma periyodundaki ısı transferi katsayılarını tespit etmek için bir model önermişlerdir. Bu periyot esnasında ısı ve kütle transferini bir arada olan bir fiziksel olay olarak göz önüne almışlardır. Numune içerisindeki sıcaklık hesaplamasını makroskopik ısı transferi dengesini kullanarak yapmışlardır. Isı transfer katsayısı için tespit edilen rakamın literatürdeki diğer sonuçlarla uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Bouraoui ve Richard (1994), mikro dalga ile çalışan kurutucularda patates kurutulmasını incelemişlerdir.

Tırıs ve arkadaşları (1994), iki ayrı tip güneşli kurutucuda ve açık sergide, çeşitli tarımsal ürünleri (sivri biber, fasulye, bamya, şeftali) aynı anda kurutarak bu ürünlerin kuruma eğrilerini karşılaştırmışlardır.

Sharma ve arkadaşları (2005), enfraruj bir kurutucu geliştirmişler ve soğan dilimlerini enfraruj radyasyon ile ince tabaka şeklinde 300, 400 ve 500 W enfraruj gücü kullanarak 35, 40 ve 50°C hava sıcaklıkları ve 1, 1,25 ve 1,5 m/s hava hızlarında deneyler yapmışlardır. Kurutmanın azalan kuruma periyodunda gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Diamante ve Munro (1991), geliştirdikleri laboratuvar boyutlarındaki bir kurutucuda ince dilimlenmiş tatlı patates kurutulmasını incelemişlerdir. Araştırmacılar, kuruma hızı eğrilerinin lineer olarak azalan hız periyodunda meydana geldiğini ve hiç sabit hız periyodu içermediğini ifade etmişlerdir.

Miketinac ve arkadaşları (1992), bir tabaka arpanın kurutulmasında aynı anda meydana gelen ısı ve kütle transferi işlemini simule eden beş modeli formüle etmişlerdir. Sınırdaki konvektif ısı ve kütle transfer şartları ile ısı ve kütle transferinin bütün modellerini incelemişlerdir.

Ratti ve Crapeste (1995), yiyeceklerin kurutulması esnasında ısı transfer katsayıları, kurutma verileri ile ısı ve kütle transfer dengelemelerinden hesaplamışlardır.

Dilim ve silindir şeklinde kesilmiş elma, havuç ve patates için deneysel kuruma eğrileri, farklı kurutma şartları altında laboratuvar tipi bir kurutucuda tespit etmişlerdir.

Maroulis ve arkadaşları (1995), gıdaların hava ile kurutulmasında ısı ve kütle transferi olayını tespit edip, daha sonra ise ilgili ısı ve kütle transferi özelliklerinin hesaplanması için geliştirdikleri ampirik denklemleri patates kurutma deneylerinde geniş bir veri takımına uygulamışlardır.

Simal ve arkadaşları (1998), patates küplerinin sıcak hava ile kuruması esnasında ısı ve kütle transferini tanımlayan bir model hazırlamışlardır. Kurutma deneylerinde hava sıcaklık oranı 30-90°C ve küp boyutları 8 ile 15 mm aralığında seçmiş ve modelde istenilen hesaplamaları da bunlara göre yapmışlardır.

Akbaba (1998), laboratuvar tipi bir kurutucuda kabağın kuruma karakteristiğini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada kabağın dış kabuklarını soyup, çekirdeklerini çıkarmış 4x25x60 mm boyutlarında kurutmuştur. Deneyleri 38-60°C arasındaki hava sıcaklığında, 4 m/s hava hızında yaparak hava sıcaklığının kuruma hızı üzerindeki etkisini incelemiştir.

Üretir (1995), bilgisayar kontrollü tünel kurutucuda elmanın kuruma hızını, 1.7-3.0 m/s hava hızı, 78-94°C hava sıcaklığı ile 0.6-1.8 cm parçacık kalınlığı aralığında ölçmüştür. Kurutma deneylerinde sabit sıcaklık ve lineer olarak azalan sıcaklık kullanarak, modelleme yapmıştır.

Sarsavadia ve arkadaşları (1999), soğanın ince tabakada kurumasını tespit etmek için dijital tartım mekanizmalı yığın tipi bir deneysel bir kurutucu geliştirmişlerdir. Tuzlanmış soğan dilimlerini ince tabakada kuruma hızlarını dört değişik hava hızında (0.25-1 m/s), dört değişik kurutma havası sıcaklığında (50-80°C) ve üç değişik havanın relatif neminde (%10-20) tespit etmişlerdir.

Şahbaz ve Kayhan (1994), yarı kesikli tünel tipi kurutucuda haşlanmış patates örneklerini 20 cm çapında, 2 m uzunluğundaki, farklı hava sıcaklık (40, 50, 60 ve 70°C) ve çeşitli akış hızlarında (1.5, 2 ve 2.4 m/s) kurutarak, sıcaklık ve akış hızının kuruma hızına etkisini incelemişlerdir.

Özdemir ve Devres (1999), fındığın 100-160°C sıcaklık aralığında ince sergide kuruma karakteristiğini yarı teorik ve ampirik kurutma modelleri ile açıklamaya çalışmışlardır.

Mengeş ve Aydın (2000), laboratuvar tipi bir kurutucu kullanarak farklı kurutma havası sıcaklıkları, hızları ve kurutma öncesi uygulanan ön işlemlerin Stanley çeşidi eriklerin kuruması üzerine olan etkilerini belirlemeye çalışmışlardır.

Onat ve arkadaşları (2005), yaptıkları çalışmada karşı akışlı taşınım tipli kurutucunun tasarımını ve imalatını yapmışlardır.

İmal ettikleri bu kurutucuda Fick'in II. Kanununu kullanarak kartezyen koordinat sistemi yaklaşımına göre, b kalınlığındaki kırmızıbiber yığınlarından z eksenini boyunca meydana gelen zamana bağlı nem kaybını incelemişlerdir. Teorik sonuçlarla deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Göğüş ve Maskan (1998), 70°C sıcaklıkta ve 1.6 m/s hızında çalışan tepsili bir kurutucuda patates dilimlerindeki kuruma verilerini tespit etmişlerdir. Patates numunelerini 24x24x20 mm dilim şeklinde kesip, anti-esmerleşme solüsyonuna batırıp ve kurutma olayına numunenin nem oranı %10' a ulaşmaya kadar devam etmişlerdir.

Jain ve Pathare (2004), soğan dilimlerinin enfraj ve konvektif kuruma deneylerini farklı işlem parametrelerinde çalışmışlardır. Dokuz tane kuruma modelini ince tabaka kuruma deneylerini tanımlamak için kullanmışlardır.

Maskan ve Göğüş (1998), kuruma kinetiği ve sorpsiyon izotermini hesaba katarak dut un kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır.

Toğrul (2005), kuruma sıcaklığının elma dilimlerinin kuruma oranları üzerindeki etkisini farklı sıcaklıklar için araştırmıştır. Kuruma sıcaklığının 50°C' den 80°C' ye arttığı zaman kuruma oranları değerlerinin de hemen hemen iki kat arttığını belirtmiştir.

Balladin ve Headley (1999), metal sepet şeklinde güneş kurutucu ve fırın kurutma metodlarını kullanarak kekiğin kurutulmasını incelemişlerdir.

Goyal ve Tiwari (1999), kabin tipi bir kurutucuda tarımsal ürünlerin kurutulması için tersinir düzlemsel toplayıcı kullanılmışlardır. Tasarladıkları yeni kurutucunun ısı performansını, çeşitli enerji denge denklemlerini çözerek analiz etmişlerdir.

Bennamoun ve Belhamri (2003), tarımsal ürünler için basit, etkili ve pahalı olmayan güneş enerjili bir yığın kurutucu sistemi çalışmışlardır. Güneş ışınımı boyunca bir ısıtıcı kullanmamışlardır. Isı ve kütle transferinin, kuruma kinetiğini tanımlayan diferansiyel eşitliklere önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Ivanova ve arkadaşları (2002), geliştirdikleri meyve ve sebze kurutucusunun enerji analizini ve ekonomik etkinliğini araştırmışlardır. Etkili kuruma ısısının güneş enerjisi, jeotermal ve atık sular, dönüşümlü kaynak veya hem dönüşümlü hem de dönüşümsüz enerji kaynaklarından elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Rodivoje (2003), gıdaları kurutmak için üç orijinal dizayn gerçekleştirmiştir. İlk olarak güneş enerjisini birlikte ve direk kullanarak değişik biyolojik malzemeleri kurutmak için iki tip mobil güneş kurutucudan, ikinci olarak havalı güneş kollektörü, fotovoltaj sistem ve güneş enerjisi ve son olarak da havalı güneş kollektörü ve rüzgar motorunun birlikte kullanıldığı dizaynlardan bahsetmiştir.

Prakash ve arkadaşları (2003), güneş enerjili rafli bir kurutucu geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri kurutucularda kurutulan havuçlar için çeşitli matematiksel modellere geliştiren araştırmacılar, sayısal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğundan bahsetmişlerdir.

Doymaz (2004), dutun güneş enerjisi ile kurutulması üzerine deneysel bir çalışma sunmuştur. Güneş enerjisi ile kurutma deneylerini İstanbul'da yetişen dut numuneleri ile yapmıştır.

Ekechukwu ve Norton (1999), farklı dizaynları kapsamlı bir şekilde yeniden gözden geçirmişler, konstrüksiyon detayları ve pratik olarak gerçekleştirilmiş farklı dizaynlardaki güneş enerjili kurutma sistemlerinin kullanım ilkelerini sunmuşlardır. Güneş enerjili kurutucuları sınıflandırmak için sistematik bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

Doymaz (2005), yaptığı bir başka çalışmada incirin güneşle kuruma davranışını araştırmıştır. Kurutma deneylerini Hatay-İskenderun' da yetişen incirler için yapmıştır. Kuruma işleminin azalan hız periyot'unda gerçekleştiğini belirtmiştir.

Jannot ve Coulibaly (1998), havalı güneş ısıtıcısı ve kurutucu odasından oluşan bir güneş kurutucuda havalı güneş ısıtıcısının performansını belirlemek için buharlaşma kapasitesi olarak adlandırılan yeni bir indeks sunmuşlardır. Buharlaşma kapasitesini hesaplamak, ısıl etkinlik indeksiyle bu yeni indeksin bir karşılaştırılmasını yapmışlar ve sunulan yeni yaklaşımın üstünlüğü ispat etmek için detaylandırılmış bir metot sunmuşlardır.

Akpınar ve arkadaşları (2006), siklon tipi bir kurutucuda ince tabaka halinde balkabağı kurutma işleminin termodinamik analizlerini gerçekleştirmişler, termodinamiğin I kanununu kullanarak enerji analizini enerji kullanım oranını hesaplayabilmek için gerçekleştirmişlerdir.

Akpınar ve arkadaşları (2005), yaptıkları bir başka çalışmada siklon tipi bir kurutucu da patatesin ince tabaka kurutma işleminin enerji ve ekserji analizini sunmuşlardır.

Akpınar (2004) yaptığı bir diğer çalışmada ise, ince tabaka halinde kurutulan kırmızıbiber dilimlerinin enerji ve ekserji analizlerini araştırmıştır. Kurutma deneylerini 55, 60 ve 70 °C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1.5 m/s kurutma havası debisinde gerçekleştirmiştir. Termodinamiğin I. Kanunu kullanarak enerji kullanım oranını hesaplamıştır. Böylece termodinamiğin II. Kanunu kullanarak kuruma işlemi süresince ekserji kayıplarının değerlerini ve ekserji analizini belirlemiştir.

Kouhila ve arkadaşları (2002), sıtma ağacının kuruma kinetiğine ve kurumanın matematiksel modellemesine değinmişlerdir.

Vlachos ve arkadaşları (2002), havalı güneş kollektörlü, ısı depolama ünitesi ve bir güneş bacası ile donatılmış yeni bir tepsili kurutucu dizayn ve test etmişlerdir. Yaptıkları dizaynı, enerji dengesi ve eğik yüzeyler için ortalama günlük radyasyon değerinin azalması ilkesine göre yapmışlardır.

Ekechukwu ve Norton (1997), yaptıkları diğ er bir çalışmada güneş enerjili hava ısıtmalı kolektörlerin konstrüksiyonunu ve etkin dizaynını ya aktif ya da pasif güneş enerjili ürün kurutucuların dolaysız mod ve karışık mod performansına göre tartışmışlardır.

Hollick (1999), farklı gıda ürünlerinin kurutulmasında havayı ısıtmak için büyük ölçüde enerjiye ihtiyaç olduğu ve kurutma işleminde güneş enerjisinden yararlanma imkanı olduğuna değinmiştir. Ticari kurutmanın, çiftçiler tarafından pratikte uygulanan güneş altında doğal ortamda yapılan kurutmadan farklı olduğunu belirtmiştir. Yaptığı çalışmada yoğuşmalı güneş kollektörü kullanmış ve Hindistan da yapılmış bir uygulama çalışmasının diğ er benzer kurutma çalışmalarıyla bir araştırma özetini sunmuştur. Ticari kurutma işlemlerinin, küçük değişikliklerle güneş enerjili sistemlere dönüşebileceğini ve geri ödeme süresinin iki yıl olduğunu göstermiştir.

Ahmad (2001), bir çiftlikte kurutma işleminde kullanılmak için, hava kabarcıklı ucuz plastik kaplamadan yapılmış basit bir havalı güneş ısıtıcısı tasarlamıştır. Tek plakalı silindirik kolektörde kullanılan modeli, biraz ısı kazandıktan sonra, çevreye taşınım ile olan ısı kayıplarını azaltmak için hava boşluklu plastik film kaplı diğ er tabakanın içine eklemiştir. Silindirik kolektörlerin her birini 5m uzunluğunda ve 0,3 m çapında yapmıştır. Kolektörün i  kısmının, kolektörün içinde maksimum hava akışını sağlamak için her zaman rüzgara karşı yapılması gerektiğini belirtmiştir.

 vanova ve Andonov (2000), kurutma havasını ısıtmak için doğal ortamda güneş enerjisinin ve jeotermal enerjinin kullanıldığı bir kurutucu geliştirmişlerdir. Ayrıca güneş enerjisinin kullanıldığı kurutma ünitesinde ısıtma havasının sıcaklık-nem işleminin modelini sunmuşlardır. Sürekli durumda kurutucu, belirlenen sıcaklık dağılımı ve nem iklim şartlarına (güneş ışınımı, sıcaklık ve dış ortam havasının nemi ve rüzgâr hızı) ve çalışma şartlarına (havanın kütlesel debisi ve kurutulacak malzeme) bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer ve şahin (2004), kuruma işleminde ekserji analizi için termodinamik analiz ile yeni bir model sunmuşlardır. Ekserji etkinliğini ısı ve kütle transferinin bir fonksiyonu olarak türetmişlerdir. Sundukları modelde kurutma işleminin ekserji analizini, farklı kurutma havası sıcaklıkları, kurutma havasının özgül ekserjisi, giriş ve çıkış arasında ki ekserji farkı, ürünün ağırlığı, nem içeriği, kurutma havasının nem oranı gibi pek çok parametreyi kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Ayvaz (1992), tarımsal ürünlerin kurutulması amacıyla güneş enerjisinden yararlanan zorlanmış taşınımlı hava ısıtıcı kollektörlü endüstriyel kabinet tipi bir kurutucunun tasarımı ve imalatını yapmıştır. Deneylerde tarımsal ürün olarak, halka haline getirilmiş elmalar değişik çalışma koşullarında kurutulmuştur.

Ayrıca aynı ışınlam şartlarında ve eşzamanlı olarak açık havada kurutulan ürünün kuruma zamanı, kuruma hızı ve ürün kalitesi açısından karşılaştırılmasını yapmıştır.

Sarsılmaz ve arkadaşları (2000), güneş enerjisi destekli döner sütunlu silindirik bir kurutucu geliştirerek farklı büyüklük ve kalitedeki kayısı materyalinin optimum kurutucu hava hızı ve kurutucu devri ile homojen bir şekilde kurumasını sağlamışlardır.

Yıldız ve Ertekin (2000), sultani çekirdeksiz üzümünün ince tabaka halinde güneş enerjili kurutucular ile kurutulmasını modellemişlerdir. Kurutma havası güneş enerjili hava ısıtıcısı yardımıyla ısıtılmış ve kurutma odasında bulunan rafın üzerindeki ürünün içinden geçirilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemine kurutma havası hızının etkisini belirlemek amacıyla üç farklı hava hızı (0.5, 1, 1.5 m/s) kullanılmıştır.

Yıldız ve Ertekin (2000), yaptıkları diğer bir çalışmada Antalya koşullarında kabak, sivri biber, patlıcan, dolma biber, taze fasulye ve soğanın güneş enerjili hava ısıtıcıları ve kurutma odalarından oluşan güneş enerjili kurutucular yardımıyla kurutulmaları ve kuruma parametrelerini incelemişlerdir. Ayrıca kuruma süresine kurutma havasının hızının etkisini araştırmışlardır.

Yıldız ve Ertekin (2001), yaptıkları iki farklı çalışmada laboratuvar tipi bir kurutucuda havuç, pırasa ve patlıcanın kuruma karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Kuruma süresinin belirli bir anında ürünün nem içeriğinin saptanması için literatürde bulunan mevcut kuruma modellerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır.

Midilli (2001), yaptığı farklı bir çalışmada kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerini hem güneş enerjili bir kurutucuda hem de açıkta güneşte kurutarak bu ürünün kuruma şartlarını ve davranışlarını tespit etmiştir.

Pangavhane ve arkadaşları (2002), tarımsal ürünlerin makine ile kurutulmasının bir enerji tüketimi olduğunu belirtmişlerdir. Fosil yakıtların azalması ve yüksek maliyetleri nedeniyle kurutma işleminde güneş enerjisi kaynaklarının kullanımına büyük önem verildiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla, kurutucu ünitesi ve hava ısıtmalı güneş kurutucusu sistemi geliştirmişlerdir.

Park ve arkadaşları (2002), nanenin tıbbi ve aromatik bir bitki olarak antik çağlardan itibaren kullanıldığını ifade etmişlerdir. Yapraklarının çay gibi demlendiğini, tatlandırıcı olarak yemeklerde kullanıldığını belirterek nane yağının da çeşitli hastalıkları tedavi etme gibi bir özelliğinin bulunduğu dikkat çekmişlerdir. Bu sezonluk bitkiyi saklamak ve uzun yıllar tüketicinin kullanabilmesini sağlamak için kurutma gibi teknolojik bir uygulamaya maruz kalması gereğine değinmişlerdir. Nane yapraklarının desorpsiyon izotermelerini üç farklı sıcaklık değeri için hesaplamışlardır. All bet, GAB, Oswin ve Peleg modellerini nanenin desorpsiyon izotermelerini tanımlamak için kullanmışlardır.

Nane kurutma deneylerini üç farklı sıcaklık ve iki farklı kurutma havası hızında gerçekleştirmişlerdir. Difüzyon değerlerini 4.765×10^{-13} - 2.945×10^{-12} m²/sn ve aktivasyon enerjisini 82928.5 J/mol olarak hesaplamışlardır. Nananın deneysel kuruma değerlerini fick difüzyon modeli ile karşılaştırdıkları page modelinin verdiğini belirtmişlerdir.

Yapılan bu tez çalışmasında baharat olarak kullanılan nane ve reyhanın kapalı bir ortamda, yeni tasarlanan bir havalı güneş toplayıcı ile kurutulmasının yapılmasıdır.

Bu tez iki aşamalıdır birinci aşama yeni bir tip güneş toplayıcısının tasarlanması ve ikinci kısım ise bu toplayıcı ile kapalı ortamda nane ve reyhanın kurutulma işleminin yapılmasının gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesidir.

2. TEORİK BİLGİLER ve KULLANILAN HESAPLAMA YÖNTEMİ

2.1. Tarım Ürünlerinde Nem

Tarım ürünlerin tüm özellikleri, içerdikleri su miktarına ve bulundukları ortamın sıcaklığına bağlıdır. Ürünün içerdği su dikkate alınmadan hiçbir fiziksel özelliği belirlenemez (Yağcıoğlu,1999).

Kurutma işleminde kurutulacak ürünlerin ilk ve son nem değerlerini bilmek doğru bir işlem yürütmek ve uygun saklama koşullarını sağlamak açısından çok önemlidir. Tablo 2,1.'de bazı sebze ve meyvelerin ilk ve son nem içerikleri verilmiştir. Tarım ürünlerinin bünyesindeki su miktarının, ürünün depolanma süresi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ürün, bünyesinde ne kadar az miktarda su içerirse o kadar uzun süre saklanabilir. Depolama işleminde, ürünün bünyesindeki suyun yanı sıra, ortam sıcaklığının etkisi de dikkate alınmalıdır. Tarım ürünlerinde bulunan su miktarının bazı önemli etkileri vardır. Üründeki su miktarının artması neticesinde mikroorganizmalar, küf ve mantar gibi üründeki fiziksel ve kimyasal değişimleri hızlandırıcı etkiler artmaya başlar.

Kurutma tekniği açısından herhangi bir ürünün içinde bulunduğu hava şartlarına bağlı olarak içerebileceği kadar suyu bulundurması durumundaki nemine, denge nemi adı verilir. Ürün, denge neminin en küçük değerine çevre havası bağıl neminin %0 ve en yüksek değerine de çevre havası bağıl neminin %100 olması durumunda ulaşır. Bu değerler sırasıyla en küçük denge nemi ve en büyük denge nemi şeklinde tanımlanabilir. Üründeki su buharı kısmi basıncı ile çevre havasının kısmi basıncı arasındaki fark, denge nemini belirleyen en önemli unsurdur. Tarım ürünlerinin belirli sıcaklık değerinde ulaşacağı denge nemi değerinin bilinmesi, kurutma ve depolama işlemleri sırasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır (Yağcıoğlu,1999).

Tablo 2.1 Bazı Sebze ve Meyvelerin İlk ve Son Nem İçerikleri
(<http://www.kurutma.net>)

Ürün	İlk Nem İçeriği(%)	Son Nem İçeriği(%)	Ürün	İlk Nem İçeriği(%)	Son Nem İçeriği(%)
Adaçayı	62	11	Kakao	50	6–7
Armut	84	25	Kakule	80	16
Ateş çiçeği	71	11	Kaplanmış hıyar/Kırmızı turp tohumu	36	9
Bamya	81	6	Kayısı	85.3	25
Bezelye	60–70	5–10	Kekik	72.9	7.5–11,4
Biberiye	70	10	Kiraz	81	30
Dereotu	70–80	10	Lahana	90–95	5–10
Domates	93	7	Maydanoz	83	12
Elma	84.8	24	Muz	80	15
Erik	78.7	35	Nane	80	11
Fasulye	60–70	5–10	Oğulotu	77	11
Fesleğen	80	6	Patates	77	7
Frenk maydanozu	80	12	Pirekapan	70	10–13
Frenk soğanı	80–85	12	Sarıpapatya	75	7
Havuç	80–90	5–10	Sarmısak	80	4
Hindistan cevizi	45–50	5	Soğan	84	6
Hint yerelması	70	15	Şeftali	75–80	20
Hint yerelması	70	15	Şekerkamışı	40–60	20
Hurma	65	40	Şerbetçiotu	77	8
Ispanak	80	10	Üzüm	74–81,6	15–18
İncir	77.5	26	Vişne	83.7	25
K. biber	90	20	Y. biber	80	10
Kadife çiçeği	72–85	12	Yerfıstığı	45–50	13
Kahve	43–48	12	Zencefil	87–93	5

Tarım ürünlerinde nemin bir hava akımıyla ortamdan uzaklaşmasından önce, ürünün yüzeyine kadar ulaşması gerekir. Suyun ürünün içerisinden yüzeye taşınmasına, nemin iç hareketi adı verilir. Tarım ürünleri, suyun sıvı ve buhar fazında yer değiştirdiği kılcal boşluklu materyaller olarak kabul edilir(Akbulut, 2006).

Ürün içerisindeki nem iletimiyle yüzeye ulaşan su, konveksiyon yoluyla uzaklaşır. Ancak, herhangi bir hava hareketinin olmadığı ortamlarda yüzeye ulaşan su difüzyon yoluyla çevreye geçer. Tarım ürününün yüzeyinden buharlaşarak ayrılan su miktarı üzerinde, nemin yer değiştirme ve yüzeye ulaşma hızının etkileri önemlidir. Bu unsurlar arasındaki ilişkiler, üründen ürüne farklılık gösterir. Yüzeyden çevreye iletilen su miktarını belirleyen unsurlar, kabuğun nem geçirgenliği ve yüzeyde meydana gelen konveksiyonun hızıdır. Tarım ürünleri genellikle kabuklu yapıya sahiptirler.

Kabuk iç kısımlarla önemli bir yapı farkına sahip, belirli bir kalınlığı olan ve gözenekli özellikler gösteren bir yapıya sahiptir. Bu durumda su, kabuğun alt yüzeyinden üstüne difüzyon, yüzeyden de çevreye konveksiyon yoluyla geçer.

Tarım ürünlerinin bünyesinde meydana gelen su iletimi nedeniyle, ürünün iç yapısında nemlilik açısından farklılık gösteren bölgeler oluşur. Bu bölgeler,

- Üründen suyun ayrılma hızı,
- Difüzyon katsayısı,
- Bünye içinde meydana gelen sıcaklık farklılaşması,

gibi unsurlara bağlı olarak oluşmaktadır. Özellikle, ürünün yüzeyinden merkezine yönelen doğrultudaki nem farklılaşması, ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyecek öneme sahiptir. Söz konusu doğrultu boyunca oluşan nem farklılaşması, bünye içinde bir gerilim oluşturur. Bu gerilimin değeri belirli bir sınırı aştığında, ürünün kalitesini azaltan bir takım büzülmeler ve giderek çatlamlar meydana gelir. Tarım ürünlerinin kurutulması sırasında yapılan gözlemler, kurutma işleminin başlangıcında ürün içindeki nem farklılaşmasının en yüksek olduğunu, sıcaklık artışıyla farklılaşmanın azaldığını göstermektedir. Ürünün yüzeyinde veya yüzeyine yakın bölgelerde nem oranı azaldığında bu orana bağlı olarak azalan difüzyon katsayısı nedeniyle nem farklılaşması da azalmaktadır (Akbulut, 2006).

2.2. Kurutma Sıcaklıkları ve Kütle Transferi Denklemleri

Gıda kurutma işlemlerinde her ürün için ayrı bir donanım gerekli olabilir. Ayrıca her gıdayı kurutmak için farklı bir hava sıcaklığı ve nemi de gerekebilir. Tablo 2.2. ve 2.3'te bazı meyve ve sebzelerin kurutma sıcaklıkları verilmiştir. Gıdaların kurutulmasında kullanılan ön işlem maddeleri de her gıdaya göre farklılık gösterebilir. Gıdaların kurutulmadan önce o ürün için hangi işlemlerin yapılması gerektiği iyi araştırılmalıdır.

Tablo 2.2 Bazı Meyvelerin Kurutma Sıcaklıkları
(<http://www.kurutma.net>)

Meyve	Kurutma Sıcaklığı	Meyve	Kurutma Sıcaklığı
Elma	74	Hindistan Cevizi	35-40
İncir	71	Vişne	71-77
Üzüm	71	Erik	74-77
Şeftali	66	Armut	63
Kayısı	71	Muz	70

Tablo 2.3. Bazı Sebzelerin Kurutma Sıcaklıkları
(<http://www.kurutma.net>)

Sebze	Kurutma Sıcaklığı	Sebze	Kurutma Sıcaklığı
Fasulye	75	Havuç	79
Lahana	63	Soğan	88
Kırmızı biber	35-40	Biber	55
Tıbbi Bitkiler	35-50	Kakule	45-50

Bir ortamda oluşan sıcaklık farkının, ısı geçişine yol açtığı bilinmektedir. Aynı şekilde, bir karışım içinde kimyasal bileşenlerde bir derişiklik farkı varsa, kütle geçişi meydana gelir. Isı geçişinde sıcaklık gradyanı, kütle geçişinde ise derişiklik farkı olayın gerçekleşmesini sağlayan etkindir. Kütle geçişi; difüzyon ve taşınım olmak üzere iki şekilde gerçekleşir (Incropera, 2001).

2.2.1. Yayımla Kütle Transferi

Kütle difüzyon denklemi, Fick yasası olarak bilinir. Bu yasa A ve B bileşenlerinden oluşan bir karışım için vektörel olarak;

$$J_A = -\rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla m_A \quad (2.1)$$

veya

$$J_A^* = -C \cdot D_{AB} \cdot \nabla m_A x_A \quad (2.2)$$

Yazılabilir. Bu denklemler, Fourier yasasına benzerdir. Ayrıca Fourier yasası, ısı iletim katsayısını ortaya çıkardığı gibi, Fick yasası da yayılım katsayısı (D_{AB} simgesi ile gösterilen) olarak adlandırılan bir aktarım özelliğini ortaya çıkarır (Incropera, 2001).

Bu eşitlikte;

$$J_A = \text{Kütlesel akı (kg/s.m}^2\text{)}$$

$$\rho = \text{Karışımın yoğunluğu (kg/m}^3\text{)}$$

$$m_A = \text{Bileşenin kütle oranı } (\rho_A / \rho)$$

$$J_A^* = \text{A bileşeninin ortalama karışım mol hızına göre yayılım akısı (kmol/s.m}^2\text{)}$$

$$x_A = \text{Bileşenin molekül oranı } (C_A / C)$$

olarak ifade edilmektedir.

A bileşeninin kütle akısı ; A bileşenin geçiş doğrultusuna dik birim alandan, birim zamanda geçen kütle olup, karışımın yoğunluğu ve bileşenin kütle oranının gradyanı ile doğru orantılıdır. A bileşenin akısı molekül olarak ifade edildiğinde ise bu değer, karışımın toplam molekül derişikliği ile bileşenin molekül oranının gradyanı ile doğru orantılıdır (Incropera, 2001).

Kütlesel yayılım; derişiklik, sıcaklık ve basınç gradyanından veya bir dış kuvvetten kaynaklanabilse de, derişiklik gradyanı haricindekilerin ihmal edilebileceği varsayılmaktadır.

Kütlesel akı, karışımın ortalama hızı ile hareket eden koordinat sistemine göre ölçülecekse, (2.1) ve (2.2) denklemi geçerli değildir. Sabit koordinat sistemine göre n_A'' kütle akısı, A bileşeninin mutlak hızı ile ilgili olup,

$$n_A'' = \rho_A \cdot v_A \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir.

v_A Hızı, bir hacim elemanı içindeki bütün A parçacıklarının ortalama hızdır. Benzer şekilde, B bileşeninin parçacıkları için de ortalama hız göz önüne alınırsa

$$n_B'' = \rho_B \cdot v_B \quad (2.4)$$

bağıntısı yazılabilir.

Bu iki bağıntıdan yararlanarak,

$$\rho \cdot v = n'' = n_A'' + n_B'' = \rho_A \cdot v_A + \rho_B \cdot v_B$$

elde edilir. Her iki tarafı ρ ile bölersek karışım için kütleli ortalama hız,

$$v = m_A \cdot v_A + m_B \cdot v_B \quad (2.5)$$

olarak elde edilir. Burada tanımlanan hız ve akı değerlerinin mutlak değerler olduğuna dikkat edilmelidir. Karışımın kütleli ortalama hızına göre A bileşeninin kütleli akısı,

$$J_A = \rho_A \cdot (v_A - v) = \rho_A \cdot v_A + \rho_A \cdot v \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanır. Denklem (2.3)'den yararlanılarak,

$$n_A'' = J_A + \rho_A \cdot v \quad (2.7)$$

eşitliği yazılabilir. Denklem (2.1) ve (2.5) yardımıyla,

$$n_A'' = -\rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla m_A + \rho_A (m_A v_A + m_B v_B) \quad (2.8)$$

yazılabilir. Burada,

$$m_A = \rho_A / \rho$$

$$m_B = \rho_B / \rho$$

$$n_A'' = \rho_A \cdot v_A$$

$$n_B'' = \rho_B \cdot v_B$$

olduğu bilindiğine göre,

$$n_A'' = -\rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla m_A + m_A \cdot (n_A'' + n_B'') \quad (2.9)$$

elde edilebilir. Mol akıları için ise,

$$N_A'' = C_A \cdot v_A \quad (2.10)$$

ve

$$N_B'' = C_B \cdot v_B \quad (2.11)$$

olarak gösterilebilir. Ayrıca,

$$N'' = N_A'' + N_B'' = C \cdot v^* = C_A \cdot v_A + C_B \cdot v_B \quad (2.12)$$

Eşitliğinden yararlanılarak karışım için molekül ortalama hız,

$$v^* = x_A \cdot v_A + x_B \cdot v_B \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada belirtilen akılar mutlak akı olup karışımın molekül ortalama hızına göre A bileşeninin mol akısı,

$$J_A^* = C_A \cdot (v_A - v^*) \quad (2.14)$$

bağıntısından bulunabilir. Eşitlik (2.2) ve (2.12)'den,

$$N_A'' = -C \cdot D_{AB} \cdot \nabla x_A + x_A \cdot (N_A'' + N_B'') \quad (2.15)$$

yazılabilir.

Bir bileşenin mutlak akısının yayılım akısına eşit olması durumu, hareketsiz ortam şartı olarak bilinir. Bu durumda $v = 0$ ve $v^* = 0$ olur.

Yukarda verilen eşitlikler kütle veya bir bileşenin yayılım denklemini elde etmek için kullanılabilir. Burada, karışımın kütsel veya molekül ortalama hızı sıfır olup, kütle geçişinin sadece yayılımla gerçekleştiği kabul edilmektedir.

A bileşeninin yayılımla geçişi için, derişiklik dağılımından ve Fick yasasından yararlanılarak dx dy dz biçiminde tanımlanan bir diferansiyel kontrol hacim elemanından çıkan akılar;

$$n''_{A,x+dx} dydz = n''_{A,x} dydz + \frac{\partial [n''_{A,x} dydz]}{\partial x} dx \quad (2.16)$$

$$n''_{A,y+dy} dx dz = n''_{A,y} dx dz + \frac{\partial [n''_{A,y} dx dz]}{\partial y} dy \quad (2.17)$$

$$n''_{A,z+dz} dx dy = n''_{A,z} dx dy + \frac{\partial [n''_{A,z} dx dy]}{\partial z} dz \quad (2.18)$$

bağıntıları yazılabilir. Ayrıca, ortam içinde düzgün dağılımlı, hacimsel bir kimyasal reaksiyon olduğu kabul edilirse; Kontrol hacminde böyle bir reaksiyon ile üretilen A bileşeni,

$$M_{A,\dot{u}} = \dot{n}_A dx dy dz \quad (2.19)$$

biçiminde ifade edilebilir. Bu eşitlikte $\dot{n}_A$ (kg/s.m^3) karışımın birim hacminde, birim zamanda, A bileşeninin kütesindeki artıştır. Sonuç olarak bu kontrol hacmi içinde depolanan A bileşeninin kütesini değiştirebilecektir. Değişen kütle,

$$M_{A,d} = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} dx dy dz \quad (2.20)$$

şeklinde yazılabilir. Kontrol hacmine $n''_{A,x}$, $n''_{A,y}$ ve $n''_{A,z}$ akıları girmektedir. Bir kontrol hacmine giren ve çıkan bileşen kütle akılarının farkı, kontrol hacmindeki bu bileşenin kütesinin zamana göre değişimine eşittir. Bu ifadeler dikkate alındığında,

$$-\frac{\partial n''_A}{\partial x} - \frac{\partial n''_A}{\partial y} - \frac{\partial n''_A}{\partial z} + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (2.21)$$

elde edilir.

Durgun bir ortam için, v kütsel ortalama hız sıfır olduğundan $n''_A = J_A$ sonucuna ulaşılır. Buna göre eşitlik (2.1)'in x , y , z bileşenleri eşitlik (2.21)'de yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial z} \right) + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (2.22)$$

elde edilir. Aynı işlemler, molekül sel derişiklik için de yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial z} \right) + \dot{N}_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (2.23)$$

eşitliği elde edilir.

D_{AB} yayılım katsayısı ve ρ yoğunluğu A bileşeni için sabitse (2.22) denkle mi daha basitleşerek,

$$\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial z^2} + \frac{\dot{n}_A}{D_{AB}} = \frac{1}{D_{AB}} \cdot \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (2.24)$$

yazılabilir. Benzer olarak, D_{AB} yayılım katsayısı ve C toplam derişiklik sabit ise,

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + \frac{\dot{N}_A}{D_{AB}} = \frac{1}{D_{AB}} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (2.25)$$

şeklinde elde edilebilir (Incropera, 2001).

2.2.2. Taşınım la Kütle Transferi

İçindeki A maddesinin mol derişikliği $C_{A,\infty}$ (kmol/m³) olan akışkan bir yüzey üzerinden aktığında ve yüzey üzerinde A'nın derişikliği $C_{A,s} \neq C_{A,\infty}$ değerinde ise taşınım la kütle geçişı gerçekleşir. A maddesi genellikle katı veya sıvı bir yüzeyden, süblimleşme veya buharlaşma ile gaz akışı içine girer. Taşınım la kütle geçişinde önemli olan kütle geçişinin hangi hızla olduğudur. Isı geçişinde, hız taşınım katsayısı ile, kütle geçişinde ise kütle geçiş katsayısı ve derişiklik farkı ile belirlenebilir. A maddesinin mol akısı N_A'' (kmol/s.m²) aşğıdaki eşitlikle ifade edilebilir (Incropera, 2001).

$$N_A'' = h_m (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.26)$$

Burada,

h_m = Taşınım ile kütle geçiş katsayısıdır (m/s).

Tüm yüzey için kütle geçişi N_A (kmol/s), aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$N_A = h_m \cdot A_s \cdot (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.27)$$

Kütle geçişi ayrıca akı, n_A'' (kg/s.m²) veya debi $\dot{m}_s$ (kg/s) olarak da yazılabilir.

$$n_A'' = h_m (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.28)$$

ve

$$\dot{m}_s = h_m \cdot A_s \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.29)$$

Lewis sayısı (Le) taşınım ile ısı ve kütle geçişinin bir arada gerçekleştiği durumlarda kullanılan önemli boyutsuz bir parametredir. Lewis sayısı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.30)$$

Taşınım ile ısı ve kütle geçişi arasında benzerlik vardır. Diferansiyel denklemlerin her biri aynı biçimde aktarım ve yayılma terimlerinden oluşmaktadır. Bu benzeşimin bir sonucu olarak, ısıl sınır tabaka davranışını belirleyen boyutsuz ilişkiler, derişiklik sınır tabakasının davranışını da belirler. Bu durumda,

$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n} \quad (2.31)$$

Olarak ifade edilir. Boyutsuz sayılar yerine konursa,

$$\frac{hL/k}{Pr^n} = \frac{h_m L/D_{AB}}{Sc^n} \quad (2.32)$$

elde edilir veya aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} = \rho \cdot C_p \cdot Le^{1-n} \quad (2.33)$$

Eşitlik (2.33) laminar akış için olduğu kadar türbülanslı akış içinde geçerlidir ve uygulamaların birçoğunda n değeri 1/3 alınabilir.

Taşıyımınla kütle geçiş katsayısı h_m (m/s), laminar akış ve türbülanslı akış için sırasıyla aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir (Incropera, 2001).

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D} = 0.332 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (2.34)$$

ve

$$Sh = \frac{h_m \cdot L}{D} = 0.0296 Re^{4/5} Sc^{1/3} \quad (2.35)$$

2.3. Tarım Ürünlerindeki Nemin Belirlenmesi

Tarım ürünlerinin içerdikleri su miktarının bilinmesi, başta ürün depolama süresinin tam olarak belirlenmesinde kesinlik arz eder. Tarım ürünlerinin içerdiği suyun belirlenmesinde kullanılan bazı yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Yağcıoğlu, 1999).

2.3.1. Kurutma Fırını Metotları

Tarım ürünlerinin nem miktarının belirlenmesinde kullanılan bu yöntemde, ürün çeşitli tipteki fırınların içinde değişmeyen ağırlığa gelinceye kadar bekletilir. Oluşan ağırlık farkından ürünün içerdiği nem miktarı hesaplanır.

2.3.2. Hava Dolaşımli Fırın Metotları

Bu yöntem tahıl, un, nişasta, ekmek, pirinç, fasulye, mercimek, mısır ve bulgur gibi ürünler için kullanılabilir.

Yöntemin uygulanması sırasında tarımsal ürünü fazla ısıtmadan ve dış ortam etkisine kapalı bir ortamda ürünü öğüten bir değirmen, içinde havanın rahatça dolaşabildiği 130-135 °C ye kadar

sıcaklık sağlayabilen bir kurutma fırını, hava geçirmez desikatör, 1 mg'a kadar ölçüm yapabilen hassas terazi, 50-60 mm çapında ve 15-25 mm yüksekliğinde örnek alma kapları kullanılır.

2.3.3. Vakum Ortamlı Fırın Metodu

Tarım ürünlerinin nem miktarının belirlenmesinde geniş çapta uygulanan yöntemlerden birisi de vakumlu ortamlarda ürün neminin uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan vakum cihazı, 45-50 °C sıcaklık şartlarındaki kurutma ortamında 13-26 mbar değerlerinde vakum sağlanmaktadır. Nemleri belirlenecek örnekler, belirtilen şartlara getirilmiş ortamda 100 saat bekletilir. Sıcaklık 98-100 °C olduğunda bekletme süresi 5 saate kadar düşebilir.

2.3.4 Desikantlar Kullanılarak Nem Belirlenmesi

Desikant maddeler kullanılarak tarım ürünlerindeki nem miktarı belirlenebilir. Nem içeriği belirlenmek istenen üründen alınan örnek, öğütülüp tartıldıktan sonra çok miktarda desikantın bulunduğu ortama konur. Desikant olarak kullanılacak maddenin seçimi sırasında, kurutulan örnekteki nemin buhar basıncından daha düşük buhar basıncına sahip olmasına dikkat edilmelidir. Numuneden yavaş yavaş buharlaşan nem, desikant madde tarafından emilir. Numunenin ağırlığı sabit duruma gelinceye kadar tartılır. Ölçülen ağırlık kaybından yararlanarak nem değeri hesaplanır.

2.3.5 Toulén Damıtma Metodu

Bu yöntem, kaynama noktaları farklı olan iki sıvının bir arada kaynatılması ve yoğunlaşan sıvı hacminin ölçülmesi esasına dayanır. Çok ince öğütülen ürün, uçucu maddelerin birikebileceği bölümlere sahip bir düzenek içinde toulén içine katılarak kaynatılır. Toulénin kaynama sıcaklığı 111 °C olduğundan, yaklaşık 100 °C de kaynayan su, daha önce buharlaşarak ölçekli bir tüpte yoğunlaştırılır. Yoğuşma sürdükçe kaynatmaya devam edilir ve tüpte su birikmesi sona erdiğinde kaynatmaya son verilerek biriken su hacminden örneğin nem içeriği belirlenir.

2.3.6 Elektrik-Elektronik Tip Nem Ölçme Metotları

Ürünün elektriksel özellikleri, içerdikleri nem miktarıyla yakından ilgilidir. Bu özelliklerin bir ya da bir kaçından yararlanılarak, ürünün nem içeriği bulunabilir.

Günümüzde kullanılan elektrikli nem ölçerler kondüktans ve kapasitans esaslı olmak üzere iki tipte yapılmaktadır. Kondüktans tipi nemölçerlerde, nemi ölçülecek taneler, bir güç kaynağı ve galvanometreye seri bağlanarak iki elektrodun arasına sıkıştırılır ve göstergeden nem değeri direkt okunur. Kapasitans tipi nemölçerlerde ise, tanelerin dielektrik özelliklerinin içerdikleri su miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermesinden yararlanılarak yapılmışlardır.

2.4 Nemlilik Ölçüsü

Tarım ürünlerinde bulunan nem miktarı, bünyede tutulmuş bulunan su miktarı olarak bilinmektedir. Su miktarı, % olarak oransal biçimde tanımlanır.

Nem miktarının belirlenmesinde “Yaş baz” (y.b.), “Kuru baz” (k.b.) olmak üzere iki tanımdan biri kullanılmaktadır. Yaş baza göre nem, üründeki su ağırlığının ürünün tüm ağırlığına oranı olarak tanımlanır (ASAE,1983).

$$\%M_{y.b} = \frac{W_s}{W_s + W_k} * 100 = \frac{M_s}{M_s + M_k} * 100 \quad (2.36)$$

Kuru baza göre nem ise, üründeki su ağırlığının ürünün kuru ağırlığına oranıdır.

$$\% M_{k.b} = \frac{W_s}{W_k} * 100 = \frac{M_s}{M_k} * 100 \quad (2.37)$$

Bu eşitliklerde,

W_s = Su ağırlığı (gr)

W_k = Ürünün kuru ağırlığı (gr)

$\%M_{y.b}$ = Yaş baza göre nem oranı (%)

$\%M_{k.b}$ = Kuru baza göre nem oranı (%)

dır. Kuru ve yaş baza göre saptanan nem oranları aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla birbirine çevrilebilir.

$$\%M_{k.b} = \frac{M_{y.b}}{100 - M_{y.b}} \cdot 100 \quad (2.38)$$

Yaş baza göre saptanan nem miktarı genel olarak ürün alım satımlarında, kuru baza göre saptanan değerler ise kurutma çalışmalarında kullanılmaktadır (Akpınar, 2002).

Kurutma sırasında ürün nem kaybedeceğinden ağırlığı azalacaktır. Nem kaybı nedeniyle oluşacak ağırlık azalması aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir (Yağcıoğlu, 1999).

Ürünün ilk ağırlığı biliniyorsa,

$$W = W_1 \frac{M_1 - M_2}{100 - M_2} \quad (2.39)$$

Ürünün son ağırlığı biliniyorsa,

$$W = W_2 \frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \quad (2.40)$$

Bu eşitliklerde,

W = Ağırlık kaybı (gr)

W_1 = İlk ağırlık (gr)

W_2 = Son ağırlık (gr)

M_1 =Kurutmadan önceki nem (%)

M_2 =Kurutmadan sonraki nem (%)

olarak verilir.

2.5 Kurumanın Safhaları

Kurutmada esas, kurutulacak malzemenin içindeki suyu buhar haline getirip uzaklaştırmaktır. Suyu sıvı halden buhar hale getirmek için, buharlaştırma gizli ısısı kadar bir ısı vermek gerekmektedir. Bu ısı, normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak her gram su için yaklaşık 2.5 kJ' dür.

Malzemeye bu ısıyı vermek için klasik ısı transfer yöntemleri ile di-elektrik ısıtma metotları kullanılır. Klasik ısı transfer yöntemleri iletim, taşınım ve ışımadır. Bu ısının verilmesi sırasında ısı transfer metotlarından biri veya birkaçı etkili olabilir.

Isıtmada, ısı akışı dokunun dışından hücrelere doğru olurken, buharlaşan su hücreden dışa doğrudur. Di-elektrik yolla ısı transferi ise bunun tam tersi olup, ısı içeriden dışa doğrudur. Su buharının ürünü terk edişi difüzyon, kapillar veya her iki mekanizma ile olur.

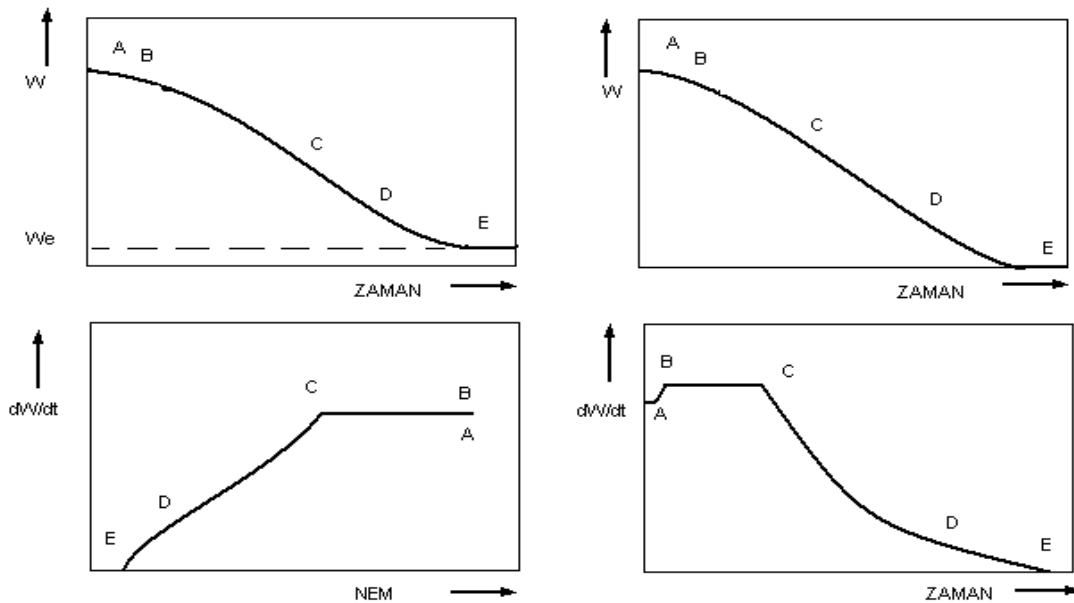
Kuruma amacıyla yeterli ısının bulunduğu bir ortama konulan nemli bir maddenin kuruma sürecinde genel olarak üç evre vardır. Bunlar ısınma evresi, sabit kuruma hızı ve azalan kuruma hızı evreleridir (Doğantan, 1986).

Kurumakta olan bir maddenin nemliliğinde olan değişim Şekil 2.1’ de verilmiştir. Şekillerde AB ile gösterilen ısınma evresinde, ürünün sıcaklığı kurutma havasının sıcaklığı ile dengeye ulaşmaya kadar sürer. Ürün kalınlığı azaldıkça, ısınma evresi süresince oluşan nem kaybı dikkate alınmayacak ölçüde azalır.

Sabit kuruma hızı evresi, şekillerde BC çizgisiyle belirtilmiştir. Burada ürünün üzeri ince bir su tabakası ile kaplı olduğundan, önce bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Aslında bu durgun bir su yüzeyinden olan serbest buharlaşmaya benzer.

Başlangıçta çok hızlı olan bu buharlaşma, bir süre sonra yüzeyin hemen üzerinde oluşan buhar tabakası nedeniyle yavaşlar. Kurumanın devam etmesi için, bu buhar filminin, hareketli bir hava akımı ile dağıtılıp taşınması gerekir.

Şekildeki C noktası (ürünün yüzeyindeki serbestçe buharlaşabilen nem sona erdiği zaman), sabit hızdaki kurumanın sona erdiğini belirtmekte olup, bu noktadaki nem “kritik nem” olarak bilinir. C noktasının görülebilmesi için, ürünün başlangıç nemi, kritik nem değerinden daha yüksek olmalıdır. Meyvelerde ve sebzelerde sabit kuruma hızı evresi, genellikle çok kısa sürer (Doğantan, 1986).



Şekil 2.1 Karakteristik kuruma eğrileri

Şekildeki CDE eğrisi, sabit kuruma evresinden sonra başlayan azalan hızda kuruma evresini göstermektedir. Bu evrede buharlaşma ürünün içinde başladığından su yüzeye difüzyon ile ulaşır. Yüzeye yakın bölümler, hem doğrudan doğruya yüzeye ve hem de kapillarla nem verdiklerinden, iç katmanlara göre daha çok su kaybederler. Bunun sonucu olarak ürünün dış yüzeyinde kabuk bağlama, buruşma, çatlama ve yarılmalar görülür. Bu evrede kuruma süresi uzadıkça, birim zamanda buharlaşan nem miktarı azalmaktadır. Bu nedenle bu evreye azalan hızda kuruma evresi denir ve nem uzaklaşması sona erene kadar (E) devam eder. Birinci azalan hız evresinde, hem yüzeyden serbest buharlaşma ve hem de iç kısımlardaki buharlaşan suyun hareketi etkili olmaktadır. Bu bölüm bir geçiş aşamasıdır (CD arası). Hava hızı, sıcaklık ve nem bu bölümde etkili olmaktadır. İkinci bölümde kuruma hızı, bütünüyle içsel nem hareketine bağlı olarak oluşur. DE ile gösterilen bu bölüm denge nemine ulaşınca kadar devam eder (Doğantan, 1986)

2.6 İnce Tabaka Kuruma Kuramı

İnce tabaka kuruma kuramı, kurutulacak ürünün yalnızca bir tanesinin kalınlığına sahip olacak şekilde serilmesiyle elde edilen, kuramsal bir ürün tabakasını belirtir. Kurutma havasının bu tabakanın içinden geçerken sıcaklık ve nem değerlerinde bir değişikliğin olmadığı kabulünün yapılabilmesini sağlamaktadır. Tarım ürünlerinin ince tabaka halinde kurutulması sırasında ısı ve kütle iletimi sabit ve azalan kuruma evreleri için ayrı ayrı incelenir (Hall, 1980).

2.6.1 Sabit Hızda Kuruma Safhası

Sabit hızda kuruma evresi, ürünün içerdiği nem kritik nem değerinden daha fazla olduğunda görülebilir. Sabit hızla kuruma evresi süresince,

- Ürün yüzeyinin ince bir su filmiyle kaplı olduğu,
- Kuruma hızının kurutma havasının sıcaklığından, bağıl neminden ve hızından etkilendiği,
- Kuruma hızının, ürünle ilgili unsurlardan etkilenmediği,
- Ürün yüzey sıcaklığının, kurutma havasının yaşı termometre sıcaklığına eşit olduğu,
- Ürün yüzeyindeki su buharı basıncının, yüzey sıcaklığına eşit sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına eşit olduğu,

Kabul edilir. Bu ön kabullerden de anlaşılacağı gibi, sabit hızla kuruma evresinde buharlaşan su miktarının aynı koşullardaki serbest su yüzeyinden buharlaşan su miktarına eşit olduğu

varsayılmaktadır. Oysa, yapılan gözlemler, bu evrede üründen buharlaşan suyun serbest su yüzeyinden buharlaşan %30 daha az olduğunu göstermektedir.

Bu evre sırasında, ürün yüzeyi ince bir su filmiyle kaplı ve sıvı üzerinden kurutma havası akışı gerçekleştiği için buharlaştırmalı serinletme işlemi gibi düşünülebilir. Buharlaşma sıvı yüzeyinden olur ve faz değişimi için gerekli enerji, sıvının buharlaşma gizli ısıdır. Yüzeye yakın sıvı moleküllerinin çarpışmaları sonunda moleküllerin enerjisi yüzey bağlanma enerjisini yenebilmek için gerekli enerjinin üzerine çıkar ve buharlaşma olur. Buharlaşmayı sürdürebilmek için gerekli enerji sıvının iç enerjisinden gelir, bu durumda sıvının sıcaklığı azalır. Sıvı yakınında bir kontrol yüzeyine enerjinin korunumunun uygulanmasıyla birim yüzey alanı için (Yağcıoğlu,1999)

$$q''_{kon} + q''_{add} = q''_{buh} \quad (2.41)$$

Burada q''_{buh} , buharlaşma gizli ısı ile buharlaşan su debisinin çarpımıdır. Şöyle ki,

$$q''_{buh} = \dot{m}_s \cdot h_{fg} \quad (2.42)$$

yazılabilir. Eğer başka yollarla ısı enerjisi eklenmesi, q''_{add} yoksa (2.41) eşitliği taşınım ile ısı geçişi ve sıvıdan buharlaşmayla ısı kaybı arasında bir eşitliğe dönüşür. Bu eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$h \cdot A_s \cdot (T_{\infty} - T_s) = A_s \cdot h_{fg} \cdot h_m [\rho_{A,sat}(T_s) - \rho_{A,\infty}] \quad (2.43)$$

Bu eşitlikte;

h = Isı taşınım katsayısı (W/m² K)

T_{∞} = Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (K)

T_s = Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı (K)

A_s = Ürünün yüzey alanı (m²)

olarak tanımlanmaktadır.

$$(T_{\infty} - T_s) = h_{fg} \cdot \left(\frac{h_m}{h} \right) \cdot [\rho_{A,sat}(T_s) - \rho_{A,\infty}] \quad (2.44)$$

(h_m/h) ve mükemmel gaz yasasından buhar yoğunluğu denklemde yerine yazılırsa,

$$T_{\infty} - T_s = \frac{M_A \cdot h_{fg}}{R \cdot C_p \cdot Le^{2/3}} \left[\frac{p_{A,sat}}{T_s} - \frac{p_{A,\infty}}{T_{\infty}} \right] \quad (2.45)$$

Daha kullanışlı bir denklem T_s ve T_{∞} sıcaklıklarının, T_m 'e eşit olduğu varsayımıyla elde edilebilir.

$$T_{\infty} - T_s = \left[\frac{M_A \cdot h_{fg}}{R \cdot C_p \cdot Le^{2/3} \cdot T_m} \right] \cdot [p_{A,sat} - p_{A,\infty}] \quad (2.46)$$

2.6.2 Azalan Hızla Kuruma Safhası

Azalan hızla kuruma evresi sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi, sabit hızla kuruma evresine göre daha karmaşıktır.

Yalnızca materyalin yüzeyinden taşınım ısı ve kütle geçişi söz konusu değildir. Bu evrede ürün içindeki sıvı ve kütle difüzyon'un da dikkate alınması gerekmektedir.

Azalan hızla kuruma evresi sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden yararlanmak mümkündür(Akbulut, 2006).

Azalan hızla kuruma evresiyle ilgili teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin geliştirilmesi sırasında, işlemleri biraz daha kolaylaştırmak amacıyla, bazı ön kabuller yapılır. Bu kabuller aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir (Yağcıoğlu,1999).

- Ürün içindeki nem dağılımı tek düzedir.
- Kuruma, madde içindeki nemin su ve buhar fazında difüzyonu sonucu oluşur.
- Difüzyon
 - Nem konsantrasyonu farkı,
 - Sıcaklık konsantrasyonu farkı,
 - Buhar basınçları konsantrasyonu farkı,

gibi etkenlere bağlıdır.

- Kurutma havasının özellikleri (sıcaklık, hız, bağıl nem) kuruma süresince değişmez.
- Ürün ince bir tabaka şeklinde serilir.

Luikov ve arkadaşları, herhangi bir materyalde suyun iletimi ve buharlaşarak ayrılmasını kontrol eden unsurları dikkate alarak kılcal borulu yapıya sahip, gözenekli materyaller için teorik bir model geliştirmişlerdir.

Bu matematiksel model üç kısmi diferansiyel denklem takımından oluşmaktadır (Incropera, 2001).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \quad (2.47a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \quad (2.47b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P \quad (2.47c)$$

Yukarıdaki (2.47,a,b,c) eşitliklerinde yer alan M nemi, T sıcaklığı, P basıncı, t zamanı ve K ürün ve çevre ile ilgili doğal katsayıları belirtmektedir. Günümüzde, bu katsayıların tarım ürünleriyle ilgili olanlarının pek azı belirlenebilmiştir. Bu nedenle, yukarıdaki denklem takımlarını kullanılabilir duruma getirebilmek amacıyla bazı terimlerden vazgeçilip, sadeleştirme yapılır. Örneğin, toplam basınç farkı nedeniyle oluşacak nem iletimi, tarım ürünlerinin kurutulması sırasında söz konusu dahi olmayacak derecede yüksek sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek büyüklüğe geleceğinden, denklem takımlarındaki basınç terimi ihmal edilir. İkinci bir sadeleştirme, sıcaklık konsantrasyonu farkından ötürü meydana gelen nem iletiminin ihmal edilmesiyle yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, nem konsantrasyonu farkına bağlı olarak meydana gelen nem iletimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık farkına bağlı iletim, dikkate alınmayabilecek ölçülerdedir (Brooker, 1974).

Yukarıda sıralanan sadeleştirmeler sonucunda, azalan hız evresi sırasındaki kuruma hızı, yalnızca bir kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilebilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M \quad (2.48)$$

(2.48) numaralı eşitlikte “K” katsayısı yerine, difüzyon katsayısı “D” kullanılabilir. Bu durumda elde edilen denklem kartezyen ve küresel koordinat sistemlerine göre yazılırsa sırasıyla,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right)}{\partial z} \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r^2 \cdot D \cdot \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2.50)$$

ifadeleri elde edilir.

(2.49) numaralı denklem kartezyen koordinat sistemine göre üç boyutlu nem oranının zamana göre değişimini vermektedir. L kalınlığındaki üründen z eksenini boyunca meydana gelen nem oranının değişimi şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (2.51)$$

Ürünün yerleştirildiği tepsinin her iki yüzeyi T_∞ sıcaklığındaki bir akışkan ile temas etmesi halinde geçici rejimde ısı geçişinin kütle transferindeki karşılığı gibi düşünülerek çözüm yapılabilir. Sistemin başlangıç ve sınır şartları yazılırsa,

Başlangıç şartı:

$t=0$ da $M=M_0$

Sınır şartları:

$$t>0 \text{ da, } z=L \text{ de, } -D \cdot \frac{\partial M}{\partial z} = h_m \cdot M$$

(2.51) numaralı denklemin çözümü, birisi z koordinatına bağlı diğeri ise t zamanına bağlı iki fonksiyonun çarpımı şeklinde göz önüne alınabilir. Bu durumda,

$$M(z, t) = Z(z) \cdot T(t)$$

yazılabilir. Değişkenlerine ayırma metodunu kullanarak, eşitliği $-\lambda^2$ gibi bir sabite eşitlemek mümkündür. Bu durumda,

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = \frac{d^2 Z}{dz^2} + \lambda^2 \cdot Z = 0 \text{ ve } \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{d^2 T}{dt^2} + D \cdot T \cdot \lambda^2 = 0$$

şeklinde yazılabilir ve denklemin kökleri,

$$Z = C_2 \sin(\lambda z / D) + C_3 \cos(\lambda z / D)$$

$$T = C_1 e^{-D\lambda^2 t}$$

Yukardaki eşitliklerde C_1, C_2, C_3 ve λ başlangıç ve sınır şartlarına göre bulunarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$M = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{\sin(\lambda_n L)}{\lambda_n L + \sin(\lambda_n L) \cos(\lambda_n L)} \cdot \cos(\lambda_n z) e^{-D\lambda_n^2 t}$$

(2.50) numaralı eşitliğin küre ve sonsuz silindirik cisimlerin, herhangi bir “t” anındaki ortalama nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan genel çözümü aşağıda verilmektedir (Akbulut, 2006).

Bu çözümde, difüzyon katsayısının sabit olduğu, katıyı çevreleyen ortamda kütle transferine karşı direnç olmadığı ve katı ve çözünen arasında kimyasal bir reaksiyon olmadığı kabulleri yapılmaktadır.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\beta_n^2 Fo)$$

bu eşitlikte küre için,

$B_n = 6/\pi^2$ ve $\beta_n = n\pi$ olarak alınır

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-n^2 \pi^2 \frac{D \cdot t}{L^2}\right] \quad (2.52)$$

şeklindedir. Burada,

D, tüm azalan kuruma dönemine ait su buharının havaya difüzyon katsayısı (m²/saat)

L, Kurutulan ürün kalınlığının yarısı (m)

M_e, Kurutulan ürünün denge bağıl nemi (kg_{su}/kg_{kurumadde})

M_o, Ürünün başlangıçtaki nem oranı (kg_{su}/kg_{kurumadde})

olarak verilmektedir.

(2.52) eşitliğinde serinin yalnızca ilk teriminin dikkate alınmasıyla yapılan çözümde hata %5’ i geçmez. Bu hata tarım ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili işlemler için kabul edilebilir

olduğundan seri açılımının ilk terimi alınıp ayrıca $\left[\pi^2 \frac{D}{4L^2} \right]$ yerine k yazılarak

Küre için bir boyuttaki durum için aşağıda belirtilen eşitlikler elde edilir.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (2.53)$$

Difüzyon katsayısı gerçekte sabit değildir, nem içeriği ile değişir. D değeri küçük nem içeriklerinde daha azdır ve kuruma yüzeyi yakınında çok küçük olabilir. Pratikte kurutulan materyalde ortalama bir D değeri deneysel olarak hesaplanabilir. Bu amaçla aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{6(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)} \quad (2.54)$$

Eğer yassı düz levha için $\ln \frac{6(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)}$ ifadesine karşı zaman grafiği çizilirse bir doğru elde

edilir ve bu doğrunun eğiminden D difüzyon katsayısı hesaplanır (Crank, 1975).

Difüzyon yavaş kuruyan materyallerin karakteristik davranışdır. Katı yüzeyinden havaya su buharının kütle transferi direnci genellikle ihmal edilir ve bütün kuruma hızını katıdaki difüzyon kontrol eder. Böylece yüzeydeki nem içeriği denge değerindedir veya denge değeri çok yakındır. Sıcaklıkla difüzyon katsayısı arttığından, katıdaki sıcaklığın artmasıyla kuruma hızı artar.

Azalan hızla kuruma evresi sırasında materyalin içinde oluşan nem iletimi, Newton' un soğutma yasasına benzetilerek açıklanmaya çalışılır. Söz konusu yasa, cisim ile çevre arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmaması şartıyla, sıcaklığı değişmez kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişim miktarının, cisim ve çevre sıcaklıkları arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir. Bu yasa matematik olarak aşağıdaki eşitliklerle gösterilebilir.

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_e) \quad (2.55)$$

Nem içeriği değişmez kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir materyalin neminde meydana gelen değişim, 2.22 denkleminin analoguyla aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (2.56)$$

veya

$$\frac{dM}{M - M_e} = -k dt \quad (2.57)$$

Denklem 2.57' de ki diferansiyel eşitliğin çözümü aşağıdaki şekildedir,

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt) \quad (2.58)$$

(2.55)-(2.58) numaralı eşitliklerde yer alan “k” kuruma sabiti olarak adlandırılır. Birimi h^{-1} veya s^{-1} dir.

Kuruma sabiti kurutulacak ürün ve kurutma şartlarına göre deneysel verilerden yararlanılarak belirlenir. Kuruma eğrilerini açıklamak için bazı araştırmacılar tarafından yarı teorik ve ampirik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller Tablo 2.1 de sunulmuştur(Akbulut, 2006).

Tablo 2.4 Literatürde bulunan kuruma eğrisi modelleri

Model Adı	Model	Kaynak
Newton	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt)$	(Mujumdar, 1987)
Page modeli	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt^n)$	(Karathanos ve Belessiotis, 1993)
Geliştirilmiş Page	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp[-(kt)^n]$	(White vd., 1978)
Henderson ve Pabis	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-kt)$	(Akpınar vd., 2003)
Logaritmik	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-kt) + c$	(Yaldız, vd., 2001)
Wang and Singh	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = 1 + at + bt^2$	(Wang, vd., 1978)
Fick difüzyon	$MR = a \cdot \exp(-c(t/L^2))$	(Diamante vd., 1991)
Difüzyon yaklaşımı	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$	(Yaldız vd., 2001)
Geliştirilmiş page-II	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-c \cdot (t/L^2)^n)$	(Diamante vd,1991)
Midilli	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-k \cdot (t^n)) + b \cdot t$	(Midilli ve Küçük 2002)

2.7. Kalın Tabaka Kuruma Kuramı

Kurumakta olan ürünün oluşturduğu tabakanın kalınlığı, bir tane kalınlığını aştığında, ince tabaka formundaki kuruma için geliştirilen eşitlikler yetersiz kalır. Bunun en önemli nedeni, kurutma havası özelliklerinin, kalın ürün tabakasından geçerken sürekli olarak değişime uğramasıdır. Kalın tabaka formundaki ürün yığınının kurumasına ilişkin olarak geliştirilen yöntemler, ürün tabakasının hareketli ve hareketsiz olmasına göre de farklılık gösterir (Brooker, 1974).

2.8. Kuruma Hızını Etki Eden Faktörler

Kuruma hızını etkileyen faktörlerin başlıcaları; sıcaklık derecesi, havanın nemi, kurutucudaki hız, kurutulacak ürünün maksimum yüzey alanı kazandıracak geometrik düzenleme (parça iriliği, şekli, yığın kalınlığı vb.) gibi fiziksel faktörlerle kurutulan materyalin başta bileşimi olmak üzere kendine özgü nitelikleridir (Van Arsdel, 1963)

En önemli faktör; kurutulacak ürünün kendine özgü fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Bu özellikler kuruma boyunca değişkendir. Özellikle ürünün kimyasal bileşimi önem taşır. Şeker, tuz ve vb. gibi küçük moleküllü maddelerce zengin bir ürün, bu maddelerce daha fakir olan bir ürünle kuruma açısından kıyaslanırsa, maddelerce zengin olanın daha zor kuruduğu görülür. Çözülmüş maddeler suyun buhar basıncını düşürmekte dolayısıyla suyun buharlaşmasını zorlamaktadır. Benzeri durumda, ortamda yağ bulunması kuruma hızını sınırlayıcı önemli bir faktördür. Su molekülleri yağ tarafından adeta izole edilmiş bulunduğundan böyle bir durumda suyun buharlaştırılarak uzaklaştırılması zordur. Serbest su, gıdalarda kolaylıkla uzaklaştırılabilen su olduğu halde, katı parçacıklarla adsorbsiyonla bağlanan su daha zor buharlaştırılır. En zor uzaklaştırılan su ise hidrat formunda kimyasal bağlı sudur. Böylece ürün bileşiminin suyu bağlama şekli bakımından kuruma hızına etki edildiği görülmektedir. Meyve ve sebze hücrelerden oluşmuş doğal dokulardır ve bunlarda su hem hücre içinde hem de hücreler arasında bulunur. Hücreler arasındaki suyu uzaklaştırmak daha kolaydır. Ancak hücre ölünce hücre zarı daha fazla geçirgenlik kazanarak, hücre içindeki suyun uzaklaştırmasını kolaylaştırır. Eğer doku haşlanmışsa geçirgenlik çok hızlanır. Bu nedenle haşlanmış ürünler daha hızlı kururlar (Van Arsdel, 1963).

Kuruma hızı; kurutulacak ürünün yüzey alanı ile doğru, kalınlığıyla ters orantılıdır. Bu nedenle kurutulacak maddeler ne kadar yüzey alanı büyükse ve kalınlığı ne kadar az ise kuruma hızı artmaktadır. Püskürtülerek kurutma tekniğinde, sıvı ve ezme halindeki maddelerin, ince zerrecikler haline getirildikten sonra birkaç saniyede kurutulabilmesi bu nedendendir.

Kurutulan parçaların iriliğinin kuruma hızına önemli etkide bulunmasına karşın meyve ve sebze gibi ürünlerde kurumanın başlangıç aşamasında iri ve daha küçük parçalar halinde doğranmış dokular arasında, kuruma hızı bakımından belirgin bir fark görülmez. Ancak zaman ilerledikçe kuruma hızı parça iriliğine göre önemli ölçüde değişir. Çünkü özellikle azalan kuruma hızı döneminde iç tabakalardaki suyun yüzeye difüzyonu, iri parçalarda zorlaşmakta ve kuruma hızı düşmektedir.

Parça iriliğinin kuruma hızına bu önemli etkisi yüzünden, kurutulacak meyve ve sebzelerin küçük parçalar halinde doğranması yararlıdır. Ancak bu her zaman mümkün değildir. Tüketim alanı bakımından bazı ürünlerin bütün halinde kurutulması gerektiği gibi, doğranan ve kıyılan ürünlerde de belli bir irilik beklenir (Akbulut, 2006).

Kuruma hızına etki eden diğer bir faktör, kurutucudaki hava hızıdır. Hava hızı arttıkça kuruma hızı da artmaktadır. Kurutulan maddenin yüzeyinde kuruma sırasında daima durgun bir buhar filmi oluşur. Bu film sürekli olarak uzaklaştırılırsa, suyun buharlaşmasında bir hızlanma görülür. İşte hava hızı bu buhar filmini devamlı olarak sürüklemek suretiyle kuruma hızını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Ancak bu etki belli bir hava hızına ulaşılan kadar görülmektedir. Diğer taraftan hava hızının olumlu etkisi, kurumanın bulunduğu aşamaya göre değişmektedir. Kurumanın başlangıç aşamalarında hava hızı çok etkiliyse de kurumanın ileriki aşamalarında kuruma hızı artık, alt tabakalardaki suyu yüzeye taşınma hızı ile sınırlandırıldığından, hava hızının yüksek olmasının bu konuda bir etkisi bulunmamaktadır (Akbulut, 2006).

2.9. Kurutma Metotları

Tarım ürünlerinin kurutulmasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmasının yanında, kurutma işleminde beklenen nitelikleri sağlayacak uygunlukta olmak zorundadır. Bundan dolayı, birbirinden farklı tiplerde kurutucular geliştirilmiştir.

İnsanoğlunun tarım ürünlerinin kurutmaya başladığı günden günümüze kadar, güneş ışınlarının altına sermekten, dielektrik kurutma tekniklerine kadar geliştirilmiş birçok metod bulunmaktadır. Temel kurutma metotları aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir:

1-Kontakt kurutma: Yaş materyalin, ısıtılmış bir yüzeye direkt olarak değdirilerek ısı transferinin sağlanması ve suyun buharlaştırılarak uzaklaştırılarak buharlaştırılması esasına dayanır.

2-Konvektif kurutma: Genellikle gaz halindeki bir maddedeki(örneğin havadaki) ısının bu gazın kurutulacak olan ürüne temas ederek geçmesi sırasında mamuldeki su buharının da kurutma gazına transferidir.

Bu kurutma sırasında, sıcak kurutma gazının nemli mamule teması sonucu, iki taraflı bir ısı ve kütle transferi meydana gelmektedir. Tünel kurutucular (tepsili kurutucular), akışkan yataklı kurutucular, püskürtmeli kurutucular bu yöntemin değişik uygulamalarıdır.

3-Işınım ile kurutma: Işıma yoluyla kurutmanın esasını, ısıнын elektromagnetik dalgalar halinde daha sıcak olan maddeden daha soğuk olan maddeye transferi oluşturmaktadır. Su en çok 3000 nm civarındaki elektromagnetik dalgaları adsorbe ettiğinden kurutma işlemlerinde daha çok emisyon maximumu 2000-3000 nm olan kızgın (kor) IR ışınlayıcıları kullanılır.

4-Di-elektrik kurutma: Bu kurutucuların esası, kurutulacak mamulün yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki adet kondansatör levhası arasından geçirilmesi prensibine dayanmaktadır. Saniyede milyonlarca kez tekrarlanan bu değişme sırasında moleküllerin sürtünmesi sonucu açığa çıkan ısı, suyun buharlaşmasını sağlamaktadır.

5-Donmalı Kurutma: Bu metotta donmuş suyun süblimasyonundan yararlanılır. Kurutulacak yaş materyal önce hızla -25, -30 °C değerlerine kadar soğutularak dondurulur. Daha sonra, ürünlerdeki donmuş suyun serbest buhar basıncına göre biraz daha düşük değerlerdeki vakum ortamında, gerekli süblimasyon ısısı verilir. Sonuçta, donmuş suyun sıvı fazı atlayarak, doğrudan buhar fazına geçmesi sağlanır. Yüksek kaliteli kurutulmuş ürün elde edebilen modern bir kurutma yöntemidir.

6-Ozmotik kurutma (Dehidrasyon): Bu yöntemde, yarı geçirgen zarla kaplı olan bitki hücresi duvarının iç kısmı ile dış çevre arasında, ozmotik basınç farkı yaratılarak, materyalin nemi azaltılmaya çalışılır. Kurutulacak materyal ozmotik basıncı yüksek bir eriyiğın içine bandırılarak nemin azalması sağlanır. Ürünün içindeki bandırılacağı ozmoaktif ortam, çeşitli sıcaklık ve konsantrasyonlarda olmak üzere genellikle, meyveler için şeker, sebzeler için tuz (NaCl) eriyiğinden hazırlanır.

Yukarıda özetlenen yöntemler içinde, günümüzde en yaygın kullanılanı ürünlerin, hava akımı yardımıyla konvektif kurutulmasıdır. Son yıllarda, ürünlerin dondurularak kurutulması, alım gücü yüksek toplumlarda giderek daha yaygın kullanılmaya başlamıştır.

Di-elektrik kurutma teknikleri ise (kızılötesi ışınlar, mikrodalga ışınlar, radyo dalgalar vb.) henüz ticari açıdan söz edilebilecek boyutta bir uygulama alanı bulamamışlardır. Şekerli şurup içinde ozmotik basınç farkından yararlanılarak kurutma tekniğı ise özellikle meyvelerin kurutulmasına uygun gibi görülmekle birlikte, istenen nem değerine ulaşamamak, pahalılık gibi nedenlerle yaygınlaşmamışlardır.

Kurutucu tipinin seçimi sırasında, kurutulacak materyalin özellikleri, kurutmanın yapılacağı mevsim, kurutma süresi, iş gücü ve enerji gereksinimleri ile işletmede kurutucu için ayrılabilir yer dikkate alınmalıdır (Akbulut, 2006).

2.9.1. Kurutucu Seçimi

Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi gerekse işletmenin karlılığı açılarından başarısı, uygun bir kurutucunun seçilip kullanılmasına doğrudan bağlıdır. İlk adım olarak, kurutma yöntemi ve kurutucunun seçimine en üst düzeyde önem vermek gerekir.

Yapmak istediğimiz kurutma için uygun kurutucu seçimi, birçok faktörün dikkate alınması gerektiren çok zor ve karmaşık bir işlemdir.

Seçim sırasında teknolojik gereksinimler, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli kriterler olarak ele alınmalıdır. Kurutucu seçiminde ilk hareket noktası materyal özelliklerinin belirlenmesiyle başlar.

Kurutucuların seçiminde dikkat edilecek hususlar;

- a- Yıllık kurutulacak ürün miktarı
- b- Tesisi kuruluş maliyeti.
- c- Tesisin işletme masrafları.
- d- İşlem sırasında materyalin verdiği fire.
- e- Emniyetli çalışma.
- f- Kurumuş ürünün kalitesinin uygunluğu.
- g- Kurumuş ürünün dış görünüşünün isteğe uygunluğu.
- h- Kurutucunun çeşitli kapasitelerde çalıştırılabilme esnekliği.
- i- Çevre kirliliğine etkisi olup olmadığı.
- j- Çalışma sırasında etkin kontrollerin yapılmasına olanak vermesi.
- k- Tamir ve bakım kolaylığı.
- l- Görünüş güzelliği.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Düzeneginin Tanıtılması

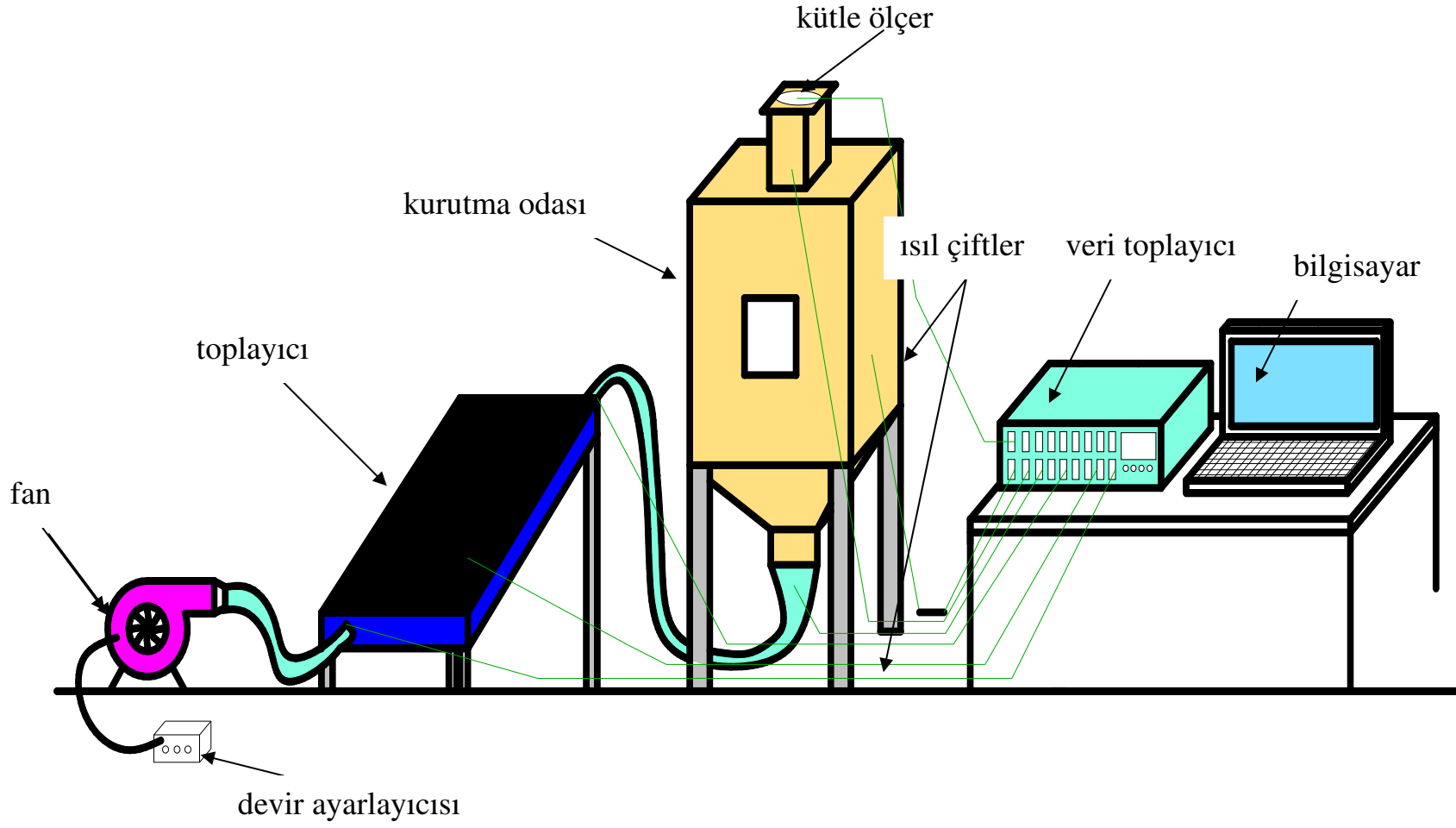
Bu çalışmada, Elazığ iklim şartlarında, yenilenebilir enerji kaynakları yardımıyla tarımsal ürünlerin kurutulması ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi kullanılmıştır. Bu amaçla, akım ortamına üç farklı açı ile kanatçıklar yerleştirilen özgün bir havalı güneş kollektörü modeli tasarlanmıştır. Kurutulacak tarımsal ürün olarak nane ve reyhan kullanılmıştır. Böylece, kurutma işlemi maliyetini azaltarak, geniş bir kullanım alanına sahip nane ve reyhanın fiziksel özelliklerini bozmadan yıl boyunca kullanımını sağlamak amaçlanmıştır. Ele alınan çalışmada, deney düzeneğinin ve kurutma yönteminin sanayide kolaylıkla uygulanabilmesi için sistemin tasarımı basit, mali olarak ekonomik ve aynı zamanda etkin bir kurutucu modeli olmasına özen gösterilmiştir.

Deney düzeneği esas olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

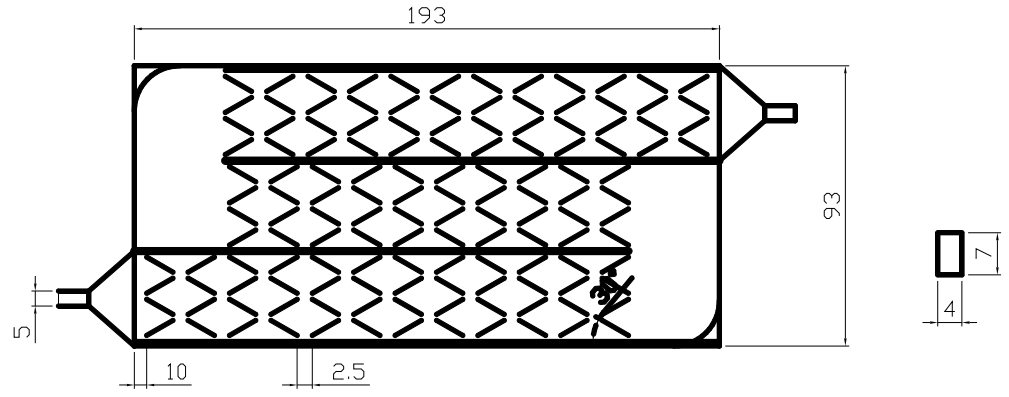
- Isıtma ünitesi
- Kurutma ünitesi
- Ölçüm ve Kontrol ünitesi

Isıtma ünitesi; havalı güneş kolektörlerini içermektedir. Kurutma ünitesi; kabin tipi kurutma (şartlandırma) bölümünden oluşmaktadır. Ölçüm ve kontrol ünitesi ise ölçüm ve kontrol ünitesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Ölçüm ünitesi; veri toplayıcı ve buna bağlı bulunan sıcaklık, hız, basınç, nem ve kütle problemlerini içermektedir. kontrol ünitesi; havanın kütsel debisi için fan, ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü ve Pentium IV bilgisayardan oluşmaktadır. Deney setinin şematik görünüşü ve ayrıntıları Şekil 3,1’de gösterilmiştir.

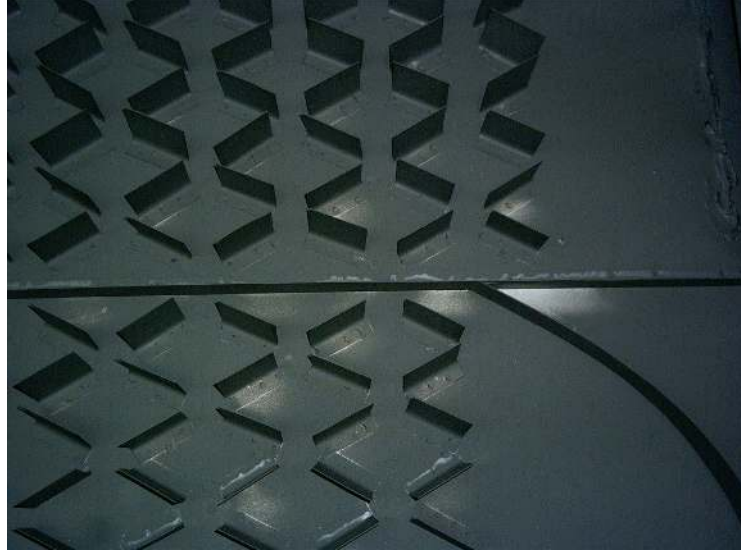
Isıtma ünitesi: kurutucu havanın ısıtılması için havalı güneş kollektörleri kullanılmıştır. Güneş kollektörleri standart kollektör ölçülerinde ($0.93 \times 1.93 \text{ m}^2$) imal edilmiştir (Şekil 3.2). Kollektör hava akış kanalı yüksekliği 10 cm, içerisinde aynı yükseklikte 30° , 45° ve 60° açıyla yerleştirilmiş kanatçıklar olacak şekilde tasarlanmıştır. Kanatçıklar arası mesafe 10 cm dir. Toplayıcı yüzeyi 0.6 mm kalınlığında galvanizli sacdan imal edilmiştir. Toplayıcı yüzeyinden ısı kayıplarını önlemek için saydam tabaka olarak 4 mm kalınlığında cam kullanılmıştır. Kollektör yan ve alt yüzeyleri standart (10 cm kalınlığında cam yünü) izolasyon malzemesiyle kaplanmıştır. Toplayıcı yüzey, mat siyah boya ile boyanmıştır. Şekil 3.2, ve 3.3’de havalı güneş kollektörü ve akış kanalı görüntüleri verilmiştir. Ayrıca, akış kanalı içerisine yerleştirilen açılı kanatçıkların kanal içerisindeki pozisyonları açıkça verilmektedir.



Şekil 3.1 Havalı güneş kolektörlü kabin tipi kurutucunun şematik gösterimi



Şekil 3.2 Akış alanının fotoğrafı ve boyutu



Şekil 3.3 Akış alanının farklı fotoğrafı

Kurutma ünitesi: kurutucu şartlandırma odası amaçlı imal edilen kabin tip kurutucu bölümü yüksekliği 1.5 m'dir. Kabin şartlandırma odası tabanı kare şeklinde ve 0.74 m iç genişliğindedir. Alt orta kısmından açılmış olan ($\varnothing D= 20$ cm) dairesel kesitten şartlandırma odasına giren ısıtılmış hava, 20x20 cm ebatlarındaki kare kesitten dış ortama atılmaktadır. Şartlandırma odasına giren sıcak ve nispeten kuru havanın ortama ısı kaybını ve sıcaklık farkından dolayı şartlandırma odası içerisinde yoğunlaşmasını engellemek için şartlandırma odası dikkatlice izole edilmiştir. Kurutma işleminin devam ettiği süreçte, kurutma ürününün gözlenmesi için kabin ön tarafına çift çamlı pencere yerleştirilmiştir. Şekil 3.4'de verilen kurutma odası; homojen hava dağılımı, sıcaklık ve kütle değişimi ölçmek için optimum şartlar göz önüne alınarak imal edilmiştir.



Şekil 3.4 Kurutma odasının fotoğrafı

Ölçüm ünitesi; ölçüm problemleri ve bunların bağlandığı veri toplayıcı, çok noktadan ölçüm alabilen Almemo 5990-0 modelidir. Ayrıca, veri toplayıcı aşağıda verilen ekipman ve özelliklere sahiptir.

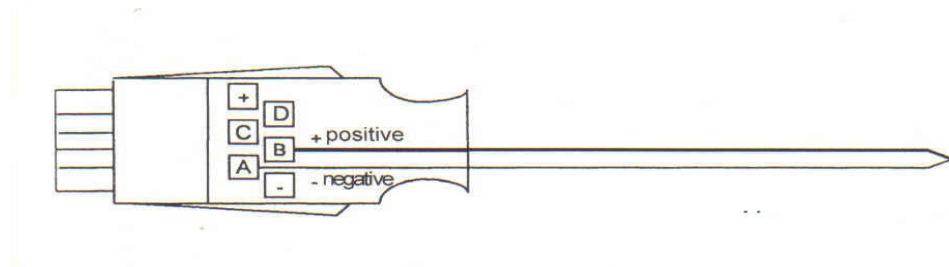
- 12 VDA (ZB3093NA) güç kaynağı
- Bilgisayar destekli online bağlantı elemanı
- 27 adet giriş soketi,
- 2 adet çıkış soketi,
- 99 ölçüm kanalı,
- ZA9000FST bağlantı elemanı,

Veri toplayıcı ve bağlantı elemanları kalibre edilmiş olarak ve standart hata ölçüm değerlerinde temin edilmiştir. Şekil 3,5’de, veri toplayıcı ve bağlantı elemanları verilmektedir.



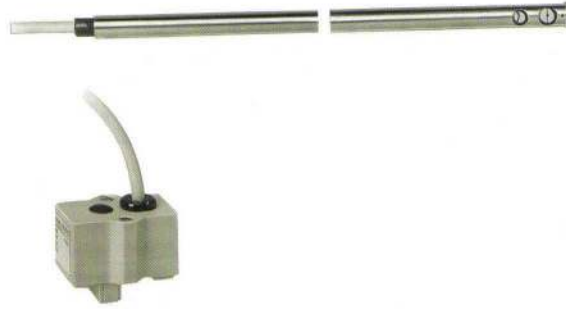
Şekil 3.5 Veri toplayıcı

Deney düzeneğinde sıcaklıklar 0.5 mm çapındaki T-tipi bakır-constant (Cu-CuNi) ısıl çiftler ile ölçülmüştür. Isıl çiftler, ZA9000FST bağlantı elemanı ile veri toplayıcıya bağlanabilmektedir. Kullanılan ısıl çiftler -200 ila +400 °C arasında, 0.1 K kararlılıkta ve % ± 0.1 hata ile sıcaklık ölçümü yapabilmektedir. Sıcaklık bağlantı elemanının şematik görünüşü ve ısıl çiftlerin bağlanma şekli, Şekil 3.6’de verilmiştir.(Ahlborn, 2005,Almemo product Catalog, Germany).



Şekil 3.6 ZA9000FST Bağlantı elemanının şematik görünüşü

Deneylerde, şartlandırma odası girişinde ısıtıcı hava hızı ölçülmüştür. Bu amaçla, FVA645TH3 Termoanemometre Akış Sensörü kullanılmıştır. Almemo firmasından satın alınan akış sensörünün fotoğrafı Şekil 3.7’de, teknik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

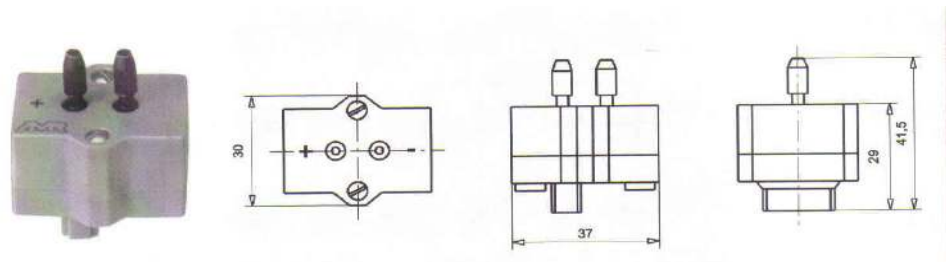


Şekil 3.7 Termoanemometre (FVA645TH3) akış sensörünün fotoğrafı

Tablo 3.1 Termoanemometre (FVA645TH3) akış sensörünün teknik özellikleri

Ölçüm aralığı	0.1-15 m/s
Sıcaklık aralığı	(-20)-(+80) °C
Etkili aralık	(0)- (+70) °C
Telafi aralığı	(+10)-(+36) °C
Nominal sıcaklık	+22 °C $\pm$ 2 K
Hava nemi	0-90% r.H.
Çalışma gerilimi	6-13 V
Akım	50 mA
Boyutlar	300 mm uzunluk, 8 mm çap
Kablo uzunluğu	1.5 m

Havalı kollektör giriş ve çıkışındaki basınç farkını belirleyebilmek için Almemo 5990-0 veri toplayıcı ile uyumlu, FDA612MR basınç modülü kullanılmıştır. Basınç modülünün fotoğrafı ve şematik görünüşü ile detayı Şekil 3.8’de görülmektedir.



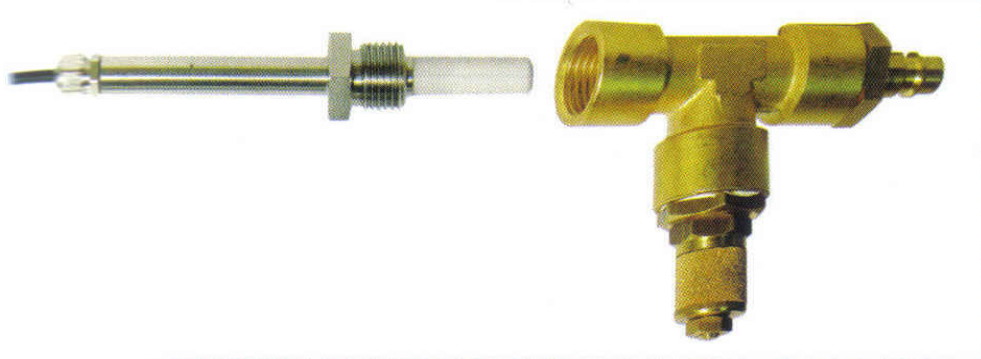
Şekil 3.8 FDA612MR Basınç modülünün şematik görünüşü ile detayı

Deneysel çalışmaların en dikkatle ele alınması gereken bölümlerden birisi basınç kayıplarını tespitidir. Bu nedenle, kollektör giriş ve çıkış bölümüne yerleştirilen basınç prizleri ile basınç modülü şeffaf hortum ile bağlanmıştır. Basınç modülünün teknik özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Basınç modülünün teknik özellikleri

Ölçüm aralığı	± 1000 mbar
Yükleme kapasitesi	Maksimum 3 kat ölçüm aralığı
Nominal sıcaklık	22 °C $\pm$ 2K
Çalışma sıcaklığı	(-10)-(+60) °C
Hava nemi	10-90 % r.H.
Boyutlar	37 mm x 36 mm x 22 mm
Sensör malzemesi	Alüminyum, naylon, silikon, silika jel

Kurutma işlemi göz önüne alınırsa; kurutulacak üründen nispeten daha kuru ve daha sıcak havanın ürün üzerinden geçirilmesi sonucu kütle değişiminin meydana gelmesi, kurutmanın temel fiziksel davranışı olarak görülür. Bu sistemde itici kuvvet kurutucu ile kurutulan ürün arasındaki yoğunluk farkıdır. Yoğunluk farkını ortaya çıkaran ise nem farkıdır.



Şekil 3.9 FHA6467 Nem sensörünün fotoğrafı

Bu çalışmada, havanın şartlandırma odasından çıkışında nem ölçümü yapılmıştır. Bu amaçla, Şekil 3.9’da verilen FHA6467 nem sensörü, FHA646-E7C bağlantı elemanı ile kullanılmıştır. nem sensörünün teknik özellikleri Tablo 3.4’de verilmektedir.

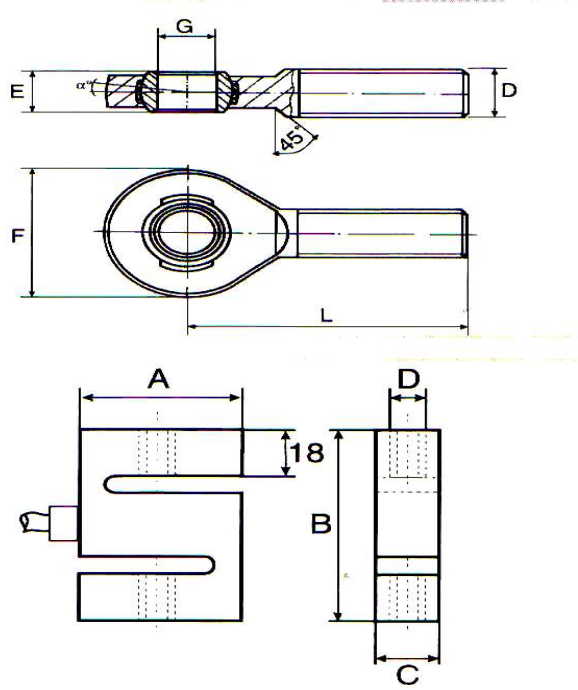
Tablo 3.3 FHA6467 tip nem sensörünün teknik özellikleri

Çalışma aralığı	(-20) - (+80) °C/5-%98 r.H.
Nem ölçme devresi	
Ölçüm aralığı	0-100% r.H.
Doğruluk aralığı	Nominal sıcaklıkta ± 2 r.H.
Nominal sıcaklık	25 °C $\pm$ 3 °C
Sensör çalışma basıncı	Maksimum 16 bar
Sıcaklık ölçme devresi	
Sensör	NTC N Tip
Doğruluk aralığı	(-20) – (0) °C aralığında ± 0.4 °C (0) – (+70) °C aralığında ± 0.1 °C (+70) – (+80) °C aralığında ± 0.6 °C
Mekanik konstrüksiyon	
Sensör tüpü	140 mm uzunluğunda, 12 mm çapında
Tesisat	Vida adımı G 1/2", derinliği 47 mm
Bağlantı kablosu	1.5 m uzunluğunda



Şekil 3.10 K25-FKA0251 gerilme ve sıkıştırma sensörünün fotoğrafı

Alışlagelmiş kurutma işlemlerinde, kurutma işlemi boyunca kütle değişimi hassas terazi ile yapılmaktadır. Ancak bu çalışmada, kütle değişimini ölçmek için veri toplayıcı ile uyumlu çalışabilen gerilme ve sıkıştırma sensörü (K25 tip-FKA0251 model), ZA9612-FS bağlantı elemanı ile kullanılmıştır. Gerilme ve sıkıştırma sensörünün fotoğrafı Şekil 3.10, detay resmi Şekil 3.11’de verilmektedir. Gerilme ve sıkıştırma sensörünün teknik özellikleri Tablo 3,4’de verilmiştir.



Şekil 3.11 K25-FKA0251 Gerilme ve sıkıştırma sensörünün (streng  ) teknik resim detayı

Tablo 3.4 Gerilme ve sıkıştırma sensörünün teknik özellikleri

��l��m aralığı	0.02-10 kN
Maksimum yükleme limiti	Son değerin %150' si
Maksimum dinamik yükleme	Son değerin %70'i
Kablo uzunluğu	3 m
Gerilme için doğruluk aralığı	$\leq \pm 0.1$ (son değerin)
Gerilme ve sıkıştırma için doğruluk	$\leq \pm 0.2$ (son değerin)
Nominal ��l��m aralığı	≤ 0.15 mm
Çalışma aralığı	-10- +70 ��C
Sürekli yüklemede ki sürüklenme hatası	Her 30 dakika için $\leq 0.07\%$
��zin verilebilir yanal kuvvet	��lk değerin $\pm \%60$ 'ı
Malzeme	Paslanmaz ��elik
Boyut	A=50mm, B=75mm, C=20mm, D=M12

Kurutma işleminde kurutucu havanın aktarılması için AGM 9054 model fan kullanılmıştır. Maksimum 0.086 kg/s kütle debi ile hava   fleyebilen fan, dakikada 1380 devir yaparak, 1.1 kWh güç üretebilmektedir. Kullanılan fanın fotoğrafı   ekil 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.12 AMG 9054 fan

Isıtılacak havanın kollektöre gidişte ve kollektörden çıktıktan sonra kurutma odasına girinceye kadar sıcaklık değişimine uğramaması için bu amaçlar için tasarlanmış olan bağlantı borusu kullanılmıştır. Bağlantı borusu dışı izolasyonlu, iç çapı 8.2 cm olan ISOAFS-ALU 70 tip, alüminyum flexible bir borudur. İzolasyon malzemesi olarak 3 cm kalınlığında camyünü kullanılmıştır.

Bu çalışmada, nane ve reyhanın güneş enerjisi ile kurutulması ve kurutma parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kurutma parametrelerinden birisi de kurutucu havanın kütesel debisidir. Fan motorunun devir sayısı değiştirilerek değişik hava debileri elde edilebilmektedir. Motor devrini değiştirmek için ayarlanabilir AC Frekans Dönüştürücü kullanılmıştır. Ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü olarak Telemecanique Altivar 31(ATV31HU15M2) tip, nominal gücü 1.5 kW, giriş gerilimi 220 volt, giriş frekansı 50/60 Hz, çıkış frekansı 0.5 Hz ile 500 Hz aralığında, nominal çıkış akımı 8 A olan bir AC hız frekans dönüştürücü tercih edilmiştir. AC frekans dönüştürücü yardımıyla fan'ın devri ayarlanarak kollektör ve kurutma odasında geçen hava miktarı kontrollü olarak değiştirilmiştir. Veri toplayıcı, Pentium IV bir bilgisayara bağlanarak hem kontrolü yapılmış hem de veriler istenen periyotlarda kaydedilmiştir. Ayarlanabilir AC Frekans dönüştürücü ve bilgisayarın fotoğrafı Şekil 3.13'de verilmektedir.



Şekil 3.13 ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü ve bilgisayar fotoğrafı

3.2. Ölçümler

3.2.1. Güneş Işınımı

Güneş ışıınımı, kollektör etkinliği, ortam sıcaklığı ve nem değeri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kipp-Zonen Solarimetresi, yatayla 38° açı yapacak şekilde, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi ana bina çatısına yerleştirilmiştir. 2004-2005 yılı boyunca, anlık ışıınım değeri ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen verilerin doğrularını kanıtlamak için deney günlerine ait ışıınım değeri Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

3.2.2. Sıcaklık

Kurutma işleminde sıcaklık tespiti büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, 5 adet ısı çift kollektörde, 4 adet kurutucuda olmak üzere toplam 9 noktadan sıcaklık tespiti yapılmıştır. Kollektör yüzeyinde 3 farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapılarak bu sıcaklık değeri aritmetik ortalaması kollektör yüzey sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, 1 adet kollektör girişine, 1 adet kollektör çıkışına yerleştirilen ısı çiftleriyle hava giriş-çıkış sıcaklığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, şartlandırma odası girişinde 1, çıkışında 1 ve içerisinde 1 noktadan olmak üzere toplam 3 noktadan sıcaklık tespiti yapılmıştır. Bilindiği gibi kurutma işleminde çevre sıcaklığı son derece önemli bir parametredir. Bu nedenle deney düzeneğinde tespit edilen sıcaklık değeriyle eş zamanlı olarak ortam sıcaklığı da belirlenmiştir. Isı çift olarak 0,5 mm kalınlığında Bakır Konstant kullanılmıştır.

3.2.3. Ortalama Hava Hızı

Deneysel çalışmada, AC frekans dönüştürücü yardımıyla fan motoru devri değiştirilirken kollektör çıkış kesitinden havanın hız kontrolü yapılmıştır. Hava hızının ölçümü için ALMEMO firmasından satın alınan FVA645TH3 Termoaneometre Akış Sensörü (TAS) kullanılmıştır. TAS, 0.1 ile 15 m/s aralığndaki hızları maksimum $\pm$ %3 hatayla tespit edilmektedir. TAS'ın deney düzeneğinde uygun bir şekilde hız ölçümü yapmasını sağlamak için kollektör çıkışında ölçüm noktasının tam merkezine gelecek şekilde ve akışa tam dik olacak şekilde bir sabitleme aparatı yapılmıştır. Kollektör ve kurutma deneyleri birbirinden bağımsız yapıldığı için kurutma deneylerinde şartlandırma odası girişine sabitlenen TAS yardımıyla hava hızı ölçülmüştür. Hava hızı ve sıcaklık ölçümleri eşzamanlı olarak yapılmıştır.

3.2.4. Basınç Farkı

Kollektör gibi deneysel çalışmaların en önemli parametrelerden birisi basınç kayıplarıdır. Tasarlanan kollektörlerde basınç kayıplarını tespit etmek için kollektör giriş ve çıkışlarına yüzeye dik olacak şekilde prizler yerleştirilmiştir. Prizlerle basınç ölçer arasında bağlantı elemanı olarak 5 mm kalınlığında şeffaf hortum kullanılmıştır. Basınç ölçer olarak yine ALMEMO firmasından satın alınan FDA612MR Basınç ölçer kullanılmıştır. Basınç ölçer maksimum ± 0.05 hatayla ölçüm yapabilmektedir. Kollektör deneylerinden sonra şartlandırma odasındaki basınç kayıpları da tespit edilmiştir.

3.2.5. Nem İçeriği

Bu çalışmada, kurutucu havanın nem oranı belirlenmiştir. Bilindiği gibi kurutma işleminde, ürün içerisindeki nem oranı uygun seviyeye düşürülmektedir. Bu işlem sırasında kurutucu havanın nem içeriği önemli bir parametredir. Deneylerde, şartlandırma odası çıkışına yerleştirilen FHA6467 model hem sıcaklık hem de %r.H. olarak nem değişimini veren bir nem sensörü kullanılmıştır. Bağlantı elemanı olarak FHA646-E7C tip eleman kullanılmıştır. Deneyler sırasında, yalnız şartlandırma odası çıkışında nem ölçümü yapılmıştır. Şartlandırma odası girişinde ölçülen sıcaklık değerlerine göre hava giriş nem değeri tespit edilmiştir.

3.2.6. Kütle Değişimi

Kurutma işleminde, değişik kurutma parametrelerinde ve periyodik zaman aralıklarında kütle değişimi tespit edilerek kütle transferi belirlenir. Kütle değişiminin belirlenmesinde ölçü aletinin etkisi büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, kütle değişimi; ALMEMO firmasından satın alınan K25 Tip FKA0251 model gerilme ve sıkıştırma sensörü (strengaç) yardımıyla tespit edilmiştir. Burada, kütle değişiminin hassas bir şekilde belirlenmesinin yanı sıra diğer parametrelerle eş zamanlı olarak ölçülmesi de önemlidir. Gerilme ve sıkıştırma sensörü, 0.02 kN ile 10 kN aralığında maksimum %0.2 hata oranında hem kg hem de kN biriminde ölçüm yapabilmektedir. Gerilme ve sıkıştırma sensörü şartlandırma odasının üst bölümüne sabitlenmiştir. Sensör üzerinde bulunan kanca yardımıyla tepsi içerisindeki ürün tutturulmaktadır. Her bir kütleli debi için dara ve ürün başlangıçta kalibre edilmekte ve periyodik zaman aralıklarında ölçüm yapılmaktadır.

3.3. Hata Analizi

Uygulamada değerlendirmeler ya teorik yada deneysel olmaktadır. Teorik değerlendirmeler analitik veya nümerik olarak ele alınabilir. Her iki incelemenin geçerliliği deneysel çalışmalarla kanıtlanmalıdır. Yani, teorik çalışmalar için ne kadar uygun yaklaşımlar kullanılırsa kullanılsın çalışmanın geçerliliği ancak deneysel verilerle kanıtlanırsa sağlanabilir. Bu durum, deneysel verilerin istisnasız doğru olduğunu göstermez. Bir deneysel çalışmanın geçerliliği öncelikle yöntemin daha sonra ise ölçülen sonuçların doğruluğuyla ilişkilidir. Deneysel yöntemin doğruluğu, deney düzeneğinin tasarlanması, deneylerin yapılması ve deneysel verilerin değerlendirmesi sırasında kişisel hataları içermektedir. Ölçümlerin doğruluğu ise deney setinin ve deneysel çalışmada kullanılan ölçü aletlerinin doğruluğunu kapsamaktadır.

Deney seti ve ölçü araçlarından kaynaklanan birinci tür hataları üç ana grupta toplamak mümkündür.

- 1- Deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar,
- 2- Aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar,
- 3-Deney ve gereçlerinde rasgele elektronik salınımlardan, sürtünme etkilerinden kaynaklanan hatalardır.

Hata analizi sadece deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların yorumlanmasında değil, aynı zamanda uygun ölçüm metodunun ve ölçü aracının seçiminde önemli rol oynamaktadır. Ölçülecek büyüklük ve ölçü araçlarının seğiminden önce hata analizinin yapılması ve buna uygun büyüklük ve ölçüm aracının seğilmesi, sonuçların içinde yer alabilecek belirsizliğin minimuma indirilmesine yardımcı olacaktır [Akpınar E.K. 2002].

Deneysel çalışmalarda, yaklaşık aynı şartlarda ve birden fazla deneysel sonuç elde edilerek sabit hatalar belirlenir. Sabit hataların ortadan kaldırılması için ölçüm aletlerinin uygun bir kalibrasyonu yapılır. Elde edilen bu sabit hataların rasgele hatalarla birlikte deneysel verilerin değerlendirilmesinde kullanılması hata analizi olarak adlandırılabilir.

Bilindiği gibi deneysel çalışmaların geçerliliği hata analizi ile sağlanmaktadır. Deneysel alışmalar için geliştirilmiş olan uygun hata analizi bağıntısı literatürde mevcuttur. Kütle transferi için yapılmış olan deneysel çalışmalar başta olmak üzere hemen hemen bütün deney çalışmalar için hata analizi yapılmaktadır. Bununla birlikte, son zamanlarda deneysel çalışmalara bağlı olarak elde edilen hata oranları için kabul edilebilir sınırlar standardize edilmektedir. Ayrıca, hata analizinin uygulanmadığı deneysel çalışmalar literatür tarafından kabul görmemektedir.

Tez çalışmasının bu kısmında kabinet tipi kurutucuda yapılan kurutma deneyleri için hata analizi yapılmıştır. Ölçülen büyüklüklerin hata değerleri, ölçü araçlarını üreten üretici

firmalar tarafından önerilen hata değerleri ve kalibrasyon çalışmaları ile deneysel tecrübelerle ilgili olarak teorik olarak belirlenmiştir. Ayrıca deneyler esnasında kullanılan ölçüm aletlerinin imalatları aşamasında kaynaklanan hataların olmadığı kabul edilmiştir. Bütün bu değerlendirmelerin sonucunda her bir bağımsız değişken için ortaya çıkabilecek hata değerleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

3.3.1. Sıcaklık Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar

Yukarıda da bahsedildiği gibi ölçüm aletlerine bağlı hatalar sıcaklık ölçümünde de ortaya çıkmaktadır. Ölçüm aletleri için Tablo 3,5’de verilen hata değerleri ölçüm aletlerinin katalog değerlerinden elde edilmektedir. Deneysel çalışmada, farklı noktalardan yapılan sıcaklık ölçümlerinden kaynaklanan hatalar;

Tablo 3.5 Sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a	Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
b	Bağlantı elemanları ve noktalardan kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
c	Kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
d	Kollektör yüzey sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
e	Kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
f	Kurutma havasının kurutucuya giriş sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
g	Kurutma havasının kurutucudan çıkış sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
h	Örneğin merkez sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
i	Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ölçülmesinden kaynaklanan	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.3.2. Zaman Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar

Deneysel çalışmalarda ölçümler, Almemo 5990-0 model veri toplayıcı ile yapılmıştır. Böylece ölçüm değerleri veri toplayıcıya da programlanan periyodik zaman aralıklarında belirlenmiştir. Dolayısıyla hem istenilen ölçüm değerleri hem de zaman periyodik olarak ölçülmüştür. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, kütle transfer deneylerinde kütle değişiminde zaman adımının ve ölçüm zaman periyodunun önemli olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle Tablo 3,6’de verilen zaman periyodunda ortaya çıkabilecek hata oranları;

Tablo 3.6 Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a ₁	Periyodik olarak tartım alınmasında yapılabilecek ortalama	±0.10 dakika
b ₁	Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin okunmasında yapılabilecek	±0.10 dakika

3.3.3. Ağırlık Kayıplarının Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar

Tablo 3,7’da verilen ağırlık kayıplarının ölçümünde ortaya çıkabilecek hata oranları, deneyler esnasında kullanılan K25 Tip FKA0251 model gerilme ve sıkıştırma sensörüne bağlı değişmektedir. Deneyler sırasında ağırlık ölçümlerinden kaynaklanan hatalar;

Tablo 3,7 Kütle kaybının ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a ₂	Gerilme ve sıkıştırma sensöründen kaynaklanan	±0.2 gr
b ₂	Gerilme ve sıkıştırma sensörünün sürekli yüklenmesi durumunda meydana gelebilecek olan sürüklenme	30 dakika için ±0.07 gr
c ₂	Hassas teraziden kaynaklanan	±0.01 gr
d ₂	Hassas terazide okumaktan kaynaklanan	±0.01 gr
e ₂	Ağırlık kayıplarının Datalogger cihazında okunması sırasında ortaya çıkabilecek olan	±0.01 gr

3.3.4. Hız Ölçümünden Kaynaklanan Hatalar

Akış sensörünün hata değeri Almemo katalog verilerine göre belirlenmiş ve tablo 3.8’de verilmiştir. Deneyler sırasında kurutma havasının hız değerleri FVA645TH3 Termoaneometre Akış Sensörüyle tespit edilmiştir. Ölçülen kurutma hava hızının belirlenmesinde ortaya çıkabilecek hatalar;

Tablo 3,8 Hız ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a ₃	Akış sensörünün hassasiyetinden kaynaklanan	±0.03 m/s
a ₄	Debi kaçaklarından kaynaklanan	±0.1 m/s
b ₃	Hız değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında ortaya çıkabilecek	±0.01 m/s

3.3.5. Nem Miktarının Belirlenmesinde Ortaya Çıkacak Olan Hatalar

Tablo 3,9’de görüldüğü gibi nem için a_5 ve a_6 olarak tanımlanan hata çeşitleri ve değerleri, FHA6467 model hem sıcaklık hem de % r.H. olarak nem değişimini ölçebilen nem ölçer için verilmektedir. Kurutulacak ürünün başlangıç ve son neminin belirlenmesinde ortaya çıkabilecek hatalar;

Tablo 3.9 Nem ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a_5	Nem ölçerin hassasiyetinden kaynaklanan	± 0.2 r.H
a_6	Nem değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında kaynaklanacak	± 0.01 r.H

3.3.6. Basınç Ölçümünde Ortaya Çıkacak Hatalar

Basınç ölçümlerinin deneysel çalışmalar içerisinde nasıl bir öneme sahip olduğu ve uygulama zorlukları yukarıda bahsedilmiştir. Bu deneysel çalışmada kullanılan ölçüm aletleri kabul edilebilir bir doğruluktadır. FDA612MR Basınç modülü için basınç değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında kaynaklanan hata Tablo 3.10’da verilmiştir.

Tablo 3.10 Basınç ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a_7	Kolektörlerin giriş ve çıkışında ki basınç farkını belirlemede basınç sensörünün hassasiyetinden kaynaklanan	± 0.05 mbar
a_8	Basınç değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında kaynaklanacak	± 0.01 mbar

3.3.7. Diğer Hatalar

Deneyler verilerin değerlendirilmesi işleminde ortalama sıcaklıklar için elde edilen fiziksel büyüklüklerin tablo değerlerinden okunmasında oluşabilecek hata a_9 ile gösterilmiş ve Tablo 3.11’da verilmiştir.

Tablo 3.11 Diğer ölçümünden kaynaklanan hatalar ve değerleri

	Hata	Değer
a_9	Fiziksel özelliklerin okunmasında ortaya çıkabilecek	% $\pm 0.1-0.2$

3.4. Ölçülen Değerlerden Kaynaklanan Toplam Hatalar

Havalı güneş kolektörlü kabinet tipi kurutucuda yapılan kurutma deneylerinde sıcaklık, hız, ağırlık kaybı, zaman, hava neminin ölçülmesi sırasında sabit hatalardan, imalat hatalarından ve rasgele hatalardan kaynaklanan hataların etkili olduğu bilinmektedir. Ölçümü yapılan herhangi bir parametredeki toplam hatanın belirlenmesi için sabit hataların, imalat hatalarının ve rasgele hataların dikkate alınmasıyla toplam hata değeri (Akbulut 2006),

$$W_{th} = \left[(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots (x_n)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

Havalı güneş Kolektörlü kabinet tipi kurutucuda yapılan ölçümlerdeki toplam hatalar aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

a) Sıcaklık ölçümünden dolayı ortaya çıkabilecek toplam hatalar

Kollektör girişinde hava sıcaklığının (T_g) ölçülmesindeki toplam hata (W_{Tg}),

$$W_{Tg} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (c)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2a)$$

Kollektör çıkışında hava sıcaklığının (T_c) ölçülmesindeki toplam hata (W_{Tc}),

$$W_{Tc} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (e)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2b)$$

Kollektör yüzey sıcaklığının (T_y) ölçülmesindeki toplam hata (W_{Ty}),

$$W_{Ty} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (d)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2c)$$

Kurutucuya giriş hava sıcaklığının ($T_{k,g}$) ölçülmesindeki toplam hata ($W_{Tk,g}$),

$$W_{Tk,g} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (f)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2d)$$

Kurutucudan çıkış hava sıcaklığının ($T_{k,c}$) ölçülmesindeki toplam hata ($W_{T,c}$),

$$W_{T_{k,\zeta}} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (g)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2e)$$

Numunenin merkez sıcaklığının T_m ölçülmesindeki toplam hata (W_{T_m}),

$$W_{T_m} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (h)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2f)$$

Çevre sıcaklığının ($T_{\zeta ev}$) ölçülmesindeki toplam hata ($W_{T_{\zeta ev}}$),

$$W_{T_{\zeta ev}} = \left[(a)^2 + (b)^2 + (l)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2g)$$

b) Zaman ölçümündeki toplam hata

$$W_t = \left[(a_1)^2 + (b_1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2h)$$

c) Ağırlık kayıplarının ölçümündeki toplam hata

Kurutma deneyleri hem doğal ortamda hem de kurutucu içerisinde iki ayrı şekilde gerçekleştiği için ağırlık ölçümleri, hassas terazi ve gerilme-sıkıştırma strengesi ile ayrı ayrı yapılmıştır. Kurutucu içerisindeki her bir tartım periyodunda meydana gelebilecek toplam ağırlık ölçüm hatası ($W_{w,k}$), (3.2i) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{w,k} = \left[(a_2)^2 + (b_2)^2 + (e_2)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2i)$$

doğal kurutma işleminde ağırlık ölçümlerinin okunmasında kaynaklanabilecek toplam ağırlık ölçüm hatası ($W_{w,d}$), (3.2k) numaralı eşitlik kullanılarak tespit edilmiştir.

$$W_{w,d} = \left[(a_2)^2 + (b_2)^2 + (c_2)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2k)$$

d) Hız ölçümündeki toplam hata

$$W_v = \left[\left(a_3^2 + a_4^2 + b_4^2 \right) \right]^{1/2} \quad (3.2m)$$

e) Numunenin bünyesindeki nem ölçümündeki toplam hata

$$W_M = \left[\left(a_5^2 + a_6^2 \right) \right]^{1/2} \quad (3.2n)$$

f) Basınç ölçümünden kaynaklanabilecek toplam hatanın tespiti

$$W_p = \left[\left(a_7^2 + a_8^2 \right) \right]^{1/2} \quad (3.2p)$$

Tablo 3.12’de deneylerde yapılan ölçümlerden kaynaklanan hataların toplam değerleri sayısal olarak verilmiştir.

Tablo 3.12 Kurutma deneylerinde yapılan hataların toplam değerleri

Deneyleerde Hata Oluşturan Parametreler	Birim	Toplam Hata
Sıcaklık Ölçümünden Kaynaklanan Toplam Hata		
$W_{T,g}$	°C	± 0.173
$W_{T,\phi}$	°C	± 0.173
$W_{T,y}$	°C	± 0.173
$W_{Tk,g}$	°C	± 0.173
$W_{Tk,\phi}$	°C	± 0.173
W_{Tm}	°C	± 0.173
$W_{T\phi ev}$	°C	± 0.173
Zaman ölçümünden kaynaklanan toplam hata		
W_t	dakika	± 0.141
Ağırlık kaybından kaynaklanan toplam hata		
$W_{W,k}$	gr	± 0.212
$W_{W,d}$	gr	± 0.014
Hız ölçümünden kaynaklanan toplam hata		
W_v	m/s	± 0.104
Nem ölçümünden kaynaklanan toplam hata		
W_M	r.H.	± 0.200
Basınç ölçümünden kaynaklanan toplam hata		
W_P	mbar	± 0.0025

3.5. Deneyler

3.5.1. Kollektör Deneyleri

Deneyisel çalışma kollektör ve kurutma deneyleri olmak üzere iki aşamada ele alınmıştır. 2005 tarihinde Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Ek Binası arkasına deney düzeneği sabitlenmiştir. İlk olarak kollektör etkinlik deneyleri yapılmıştır. Havalı güneş kollektörleri, akış kanalı modifiye edilmiş $0.93 \times 1.93 \text{ m}^2$ ebatlarında standart kollektör kasalarından imal edilmiştir. Kollektör akış kanalına, akış kanalı yüksekliğine sahip fakat üç farklı açıda kanatçıklar yerleştirilmiştir. 30° , 45° ve 60° açıyla yerleştirilmiş kanatçıkların öncelikle kollektör etkinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre en etkin kollektör tipi belirlenerek kurutma deneylerinde kullanılmıştır. Kollektör deneylerinin değerlendirilmesi için deney günlerine ait anlık ısıtım değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu amaçla Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Ana Binası çatısına 38° ile yerleştirilen Kipp-Zonen marka solarimetre yardımıyla deney günlerine ait anlık ısıtım değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Havalı kollektör yüzeyine 3 adet olmak üzere, 1 adet kollektör giriş ve bir adet kollektör çıkış noktasında toplam 5 noktadan ısıt çiftler yardımıyla sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu sıcaklık değerleri 0.5 mm kalınlığında T-tipi Bakır-Konstant ısıt çiftler kullanılarak belirlenmiştir. Isıt çiftlerin bir ucunda bakır ve kanstant uç birleştirilirken diğer tarafı uygun bir şekilde ZA9000FST bağlantı elemanına monte edilmiştir. Bu bağlantı elemanı ALMEMO 5990-0 model veri toplayıcıya bağlanarak sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Pentium III kişisel bilgisayara bağlantılı olan veri toplayıcının ölçmüş olduğu sıcaklık değerleri 30 dakika aralıklarla bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca, tasarlanan havalı kollektörlerde basınç kayıpları da ölçülmüştür. FDA612MR model basınç modülü kullanılarak basınç kayıpları elde edilmiştir. Sıcaklık değerleriyle eş zamanlı olarak kaydedilen basınç kaybı değerlerinin ortalaması alınarak her bir hava kütleli debisi için basınç kaybı değerleri belirlenmiştir. Isıtılacak havanın kütleli debisi fan devri ayarlanarak değiştirilmiştir. Fan devrinin isteğe bağlı olarak değiştirilmesi için ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü olarak Telemecanique Altivar 31(ATV31HU15M2) tip, gücü 1.5 kW, giriş gerilimi 220 volt, giriş frekansı 50/60 Hz, çıkış frekansı 0.5 Hz ile 500 Hz aralığında, nominal çıkış akımı 8 A olan bir AC hız frekans dönüştürücü kullanılmıştır. Bir kütleli debi için ayarlanan fan devri gün boyunca sabit tutulmuştur. Daha önce kalibre edilmiş debi-hız değerlerine göre fan devri ayarlanmıştır FVA645TH3 Termoaneometre akış sensörü kullanılarak ölçülen hava hızına göre fan deri değiştirilmiştir.

3.5.2. Kurutma Deneyleri

Kurutma deneyleri, kollektör deneylerinden hemen sonra yapılmıştır. Kollektör deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre en verimli kollektör tipi belirlenmiş ve kurutma deneylerinde kullanılmıştır. Kollektör deneylerinde 30° kanat açısına sahip havalı kollektörün en verimli kollektör tipi olduğu belirlenmiş ve kurutma deneylerinde kullanılmıştır. Kurutma ve kolektör deneyleri üç farklı hava kütleli debisinde yapılmıştır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ olarak belirlenen kütleli debiler için nane ve reyhan kurutma parametreleri belirlenmiştir. Deneylerde şartlandırma odası alt kısmından giren nispeten kuru ve sıcak hava tepsi içerisindeki yaş ürünler üzerinden geçerek şartlandırma odasının üst kısmından ortamı terk etmektedir. Hem nane hem de reyhan doğal ortama bırakılarak havalı kolektör yardımıyla kurutmaya göre karşılaştırılmıştır. Doğal ortamda kurutmaya bırakılan nane ve reyhanın kütle değişimi hassas terazide ölçülerek kaydedilmiştir. Doğal ortamda kuruma nane için yaklaşık 2 gün reyhan için yaklaşık 3 gün sürmüştür. Doğal kurutma işleminde, gün ışınının olmadığı saatlerde nane ve reyhan şartlandırma odasının giriş ve çıkış kanalları kapatılarak içerisinde bırakılmıştır. Böylece bir sonraki gün, başlangıç değerleri bir önceki günkü değerlerle yaklaşık aynı olmuştur.



Şekil 3. 14 Taze nanenin kurutmadan önceki ölçüsü

Havalı güneş kolektörleri yardımıyla kurutma yapıldığında ürün kütle değişimi, K25 Tip FKA0251 model gerilme ve sıkıştırma sensörü yardımıyla ölçüm yapılmıştır. Yukarıda teknik özellikleri verilen gerilme-sıkıştırma sensörü kurutma odasının üst kısmında sabitlenerek bir kanca yardımıyla tepsilere bağlanmıştır. Kurutulacak ürün tepsilere serilerek yerleştirildikten sonra fan çalıştırılarak istenen kütleli debi ayarlanmıştır. Sistem bu şartlarda iken gerilme-sıkıştırma sensörünün okumakta olduğu ağırlık değeri sıfırlanarak darası alınmış oldu. Daha sonra zamana bağlı olarak kütle değişimi ölçülmüştür. İlk olarak nane deneylerine başlanmıştır. Şekil 3.14’de görüldüğü gibi hassas terazide 200 gr taze nane tartılarak kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Kurutma deneyleri için şartlandırma odası içerisine yerleştirilen 3 farklı noktadaki sıcaklık değerleri kütle değişimi ve ortalama hava hızı ile birlikte ölçülmüştür. 15 dakika aralıklarla ölçülen bu parametreler Pentium IV bilgisayarda kaydedilmiştir. Kurutma deneyleri sonunda nanenin 45 gram olduğu görülmüştür (Şekil 3.15).



Şekil 3. 15 Taze nanenin kurutmadan sonraki ölçüsü

Nane kurutma deneylerinde uygulanan işlem sırası reyhan deneylerinde de aynen uygulanmıştır. Ancak, kurutma deneylerinde 200 gr nane kurutması yapılırken 250 gr reyhan kurutmaya tabii

tutulmuştur (Şekil 3.16). Deneylerde görülmüştür ki; kurutma işlemi sonunda reyhan daha fazla kütle kaybına uğramaktadır. Şekil 3.17’de görüldüğü gibi 250 gr kurutmaya tabii tutulan reyhan 29 gr kalıncaya kadar kütle kaybına uğramaktadır.



Şekil 3. 16 Taze reyhanın kurutmadan önceki ölçüsü



Şekil 3. 17 Taze reyhanın kurutmadan sonraki ölçüsü



Şekil 3. 18 Kurutma başlangıcında nane ve reyhan fotoğrafları



Şekil 3. 19 Kurutma sonrasında nane ve reyhan fotoğrafları

Kurutma işleminin başlangıcında ve sonunda nane ve reyhan fotoğrafları Şekil 3.18 ve 3.19’de verilmiştir. Görüldüğü gibi kurutma işlemi sonunda reyhan daha fazla nem kaybetmektedir. Ayrıca, başlangıçta daha fazla hacim kaplayan reyhan kurutma işleminden sonra naneye göre daha fazla büzülmekte ve daha az bir hacme sahip olmaktadır. Kurutma işlemleri boyunca Elazığ iline ait ışıınım değerleri de alınmıştır. Kipp-Zonen marka Solarimetrenin yatayla 38° açı yapacak şekilde yerleştirilmesiyle ışıınım değerleri tespit edilmiştir. Kurutma işlemi sırasında bütün parametrelerin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde azami itina gösterilmiştir. Yaklaşık eşit şartlar oluştuğunda bağımlı parametreler ayarlanarak aynı deneyler birkaç defa tekrarlanarak deneysel verilerin geçerliliği sağlanmıştır.

4. BULGULAR VE İRDELEME

4. 1. Havalı Güneş Kollektörleri

Deneyisel çalışmamızda, havanın ısıtılması için havalı güneş kolektörleri kullanılmıştır. Bilindiği gibi kurutma işleminde, kurutucu havanın debisi ile birlikte sıcaklığında ürünün kuruma hızı üzerinde önemli parametrelerdir. Bununla birlikte, kurutma işleminde, kurutucu hava sıcaklığının geniş bir zaman aralığında deneyler yapılarak kurutucu havanın uygun sıcaklığı saptanmaktadır. Böylece, uygun bir kütsel debide ve sıcaklıkta yaş ürün üzerinden geçirilen hava ile daha verimli ve sağlıklı kurutma yapılmaktadır. Bilindiği gibi havalı güneş kolektörlerinde, hava giriş-çıkış sıcaklık farkı (ΔT);

$$(\Delta T) = f(V, I, A_k, \tau\alpha, Fr, U_L) \quad (4.1)$$

fonksiyonu olarak değişmektedir. bununla birlikte denklem (4.1)'de verilen bu bağımlı ve bağımsız değişkenlerde kendi içlerinde farklı parametrelere bağlı olarak değişmektedirler. Bu çalışmada, geniş bir sıcaklık farkında (ΔT) kurutma deneyleri yapmak için kolektör etkinliğini pasif yöntemler artırma yoluna gidilmiştir.

$$\eta = \frac{Q_u}{I \cdot A_k} = \frac{F_R I (\tau\alpha) - F_R U_L (T_g - T_c)}{I} \quad (4.2)$$

Burada;

η = Kolektörün etkinliği

Q_u = Alınan Enerji (W)

I = Eğik düzlem üzerine gelen toplam ışınlam (W/m^2)

A_k = Kollektör yüzey alanı (m^2)

$(\tau\alpha)$ = Kollektör toplayıcı yutma-geçirme oranı (-)

F_R = Isı kazanç faktörü (-)

U_L = Kollektör toplam ısı kayıp katsayısı (W/m^2K)

Kollektör etkinliğini belirlemede kullanılan (Alınan Enerji) faydalı enerji Q_u aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_c - T_g) \quad (4.3)$$

Burada;

$\dot{m}$ = Havanın kütleli debisi (kg/s)

C_p = Havanın sabit basınçta özgül ısısı (J/kgK)

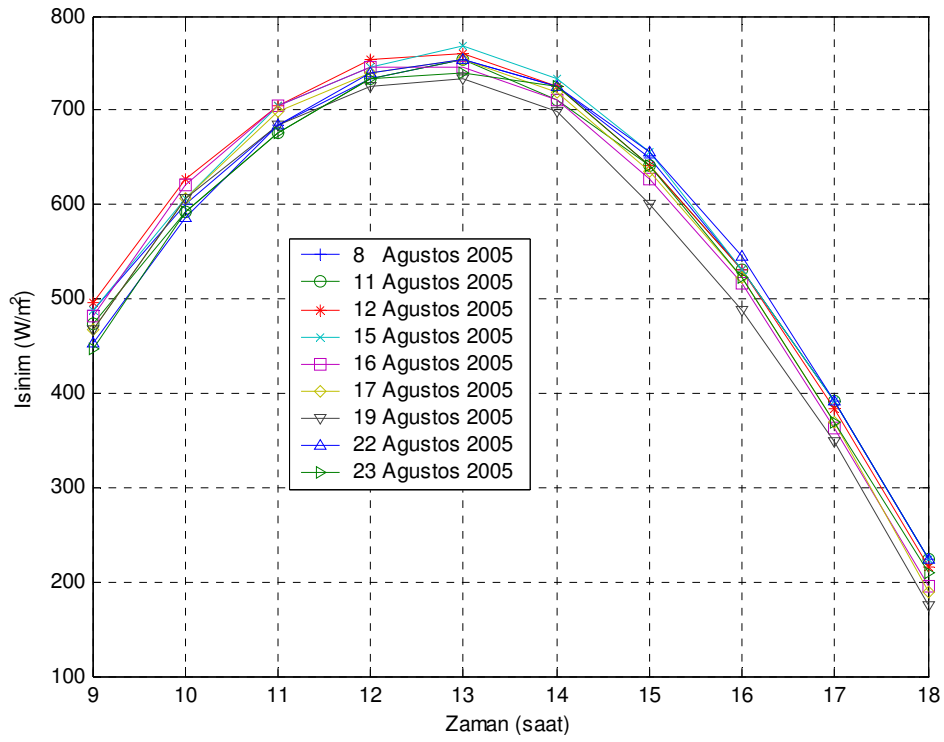
T_c = Havanın kolektörden çıkış sıcaklığı (K)

T_g = Havanın kolektöre giriş sıcaklığı (K)

Bölüm 3’de bahsedildiği gibi kolektör etkinliğini artırmak amacıyla akım ortamına $\alpha=30^\circ$, 45° ve 60° olacak şekilde kanatçıklar yerleştirilmiştir. Bilindiği gibi akım ortamına kanatçıklar yerleştirilmesi, akış kanlında sınır tabakanın oluşumunu engelleyerek akım yolunu uzatmaktadır. Ayrıca, kanatçıkların etkisiyle genişletilmiş yüzey etkisi oluşmakta ve havanın çıkış sıcaklığı artmaktadır.

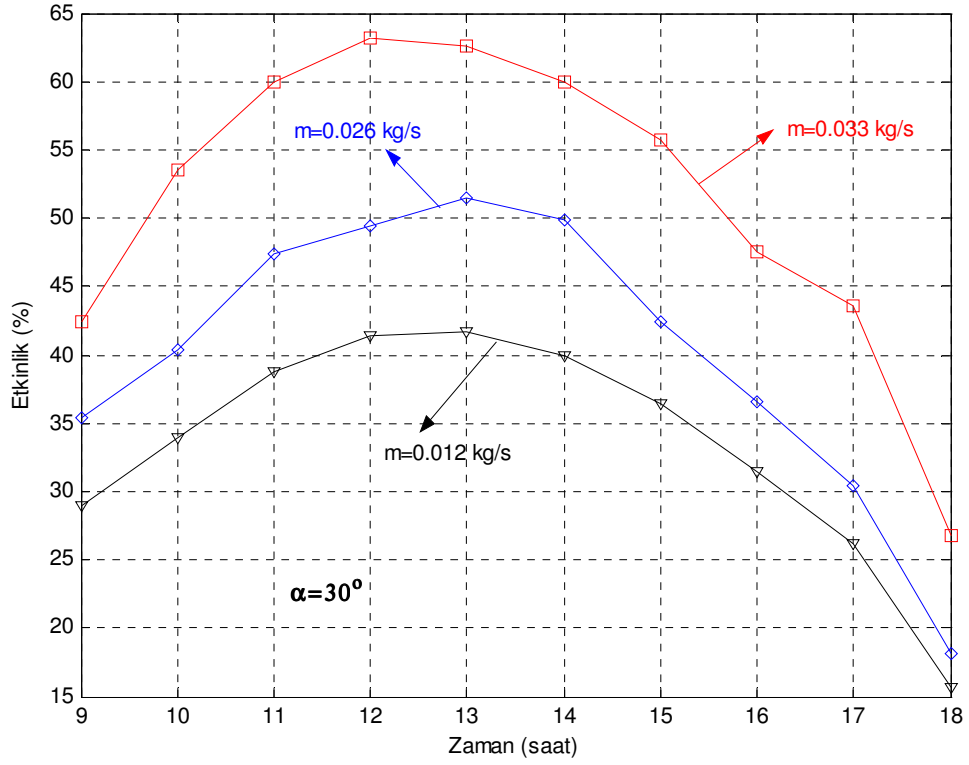
Kurutma deneylerine başlamadan önce kolektör etkinliklerini belirlemek ve kurutma deneyleri için en uygun kolektör tipi tespit edilmiştir. Bu amaçla ilk olarak her üç kolektör için üç farklı debide ısı transfer deneyleri yapılmıştır. Kolektör deneylerinin yapıldığı günlere ait ısıtım değerleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Öncelikle vurgulanmalıdır ki; her bir debi için en az üç gün deney yapılmıştır. Ancak, yaklaşık aynı ısıtım değerlerinde olan günler için karşılaştırmalar yapılmış ve burada sunulmuştur. Görüldüğü gibi 8-23 Ağustos 2005 tarihleri arasında Elazığ bölgesi ısıtım değerleri sabah saatlerinde $450 \text{ W/m}^2\text{K}$ ’den başlamakta ve saat 12-14 arasında maksimum değerine ulaşarak yaklaşık $760 \text{ W/m}^2\text{K}$ olmaktadır. saat 16’dan sonra ısıtım değerleri hızlı bir şekilde düşmekte ve saat 18’de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ civarında olmaktadır.

Denklem 4.2’de elde edilen verilere göre $\alpha=30^\circ$ için kolektör etkinliği Şekil 4.2’de verilmiştir. Görüldüğü gibi havanın debisi ile kolektör etkinliği doğru orantılıdır. ısıtım değerlerine bağlı olarak $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için kolektör verimi saat 9’da %29 olurken, saat 13’de %42’ye kadar çıkmaktadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için elde edilen bu maksimum etkinlik değeri $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için %51 ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için %63 olmaktadır. Klasik düzlem yüzeyli güneş kolektör etkinlik değerlerinin %20-25 arasında değiştiği göz önüne alınırsa, bizim geliştirdiğimiz kolektörler için elde edilen etkinlik değerlerinin önemli oranda arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 1 Kollektör deneylerinin yapıldığı günlere ait ışınlm değerlerinin günün zamanına göre değişimi

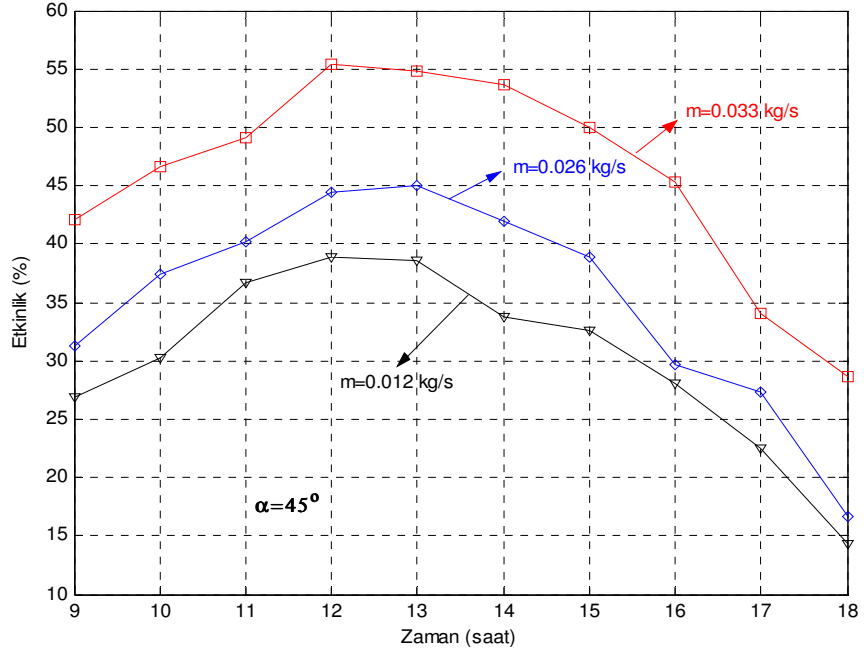
Kanat açısı $\alpha=45^\circ$ olduğunda, $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için maksimum etkinlik değeri %38 olurken, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için %45 ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için %55 olmaktadır. Şekil 4.3 ve 4.4’de dikkatle incelendiğinde, etkinlik değerinin günün saatlerine göre tam bir parabol oluşturmadığı ve bazı saatlerde sapmalar görülmektedir. Bu durum, deney günlerinde yerel bulutlanmalar olduğunu göstermektedir. $\alpha=60^\circ$ olduğunda, kollektör maksimum etkinliği $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için %47 olmaktadır.



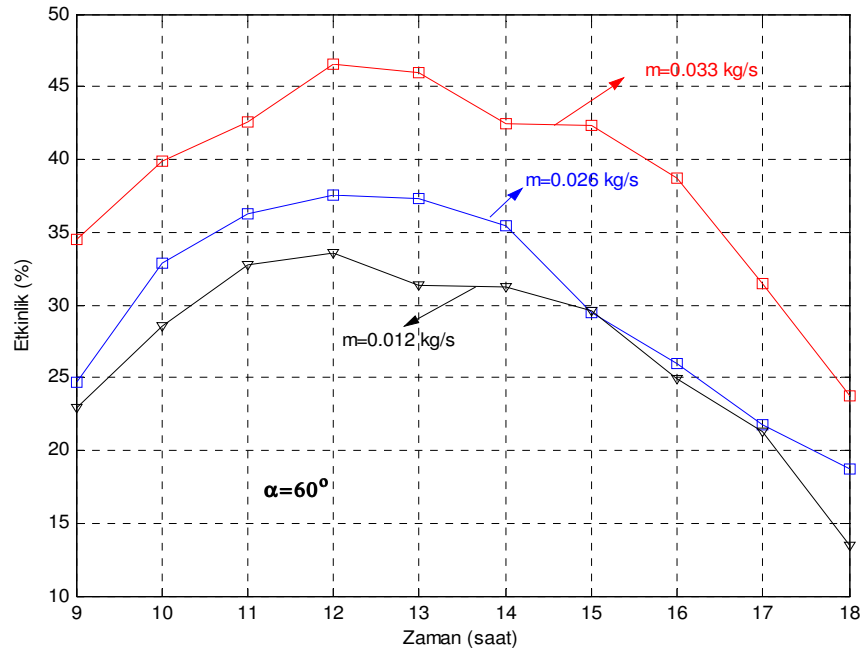
Şekil 4.2 $\alpha=30^\circ$ için anlık kolektör etkinliğinin günün zamanına göre değişimi

Görüldüğü gibi, kanat açısı azaldıkça kolektör anlık verimi artmaktadır. Bu durum, kolektör akış kanalına yerleştirilen kanatçıkların yerleştirme şeklinin önemini göstermiştir. Yani, akım ortamına yerleştirilen kanatçık yüzeyleri akım yönüne ne kadar dikleşirse kolektör verimi o oranda artmaktadır. Akım ortamındaki kanatçıkların kolektör hava çıkış sıcaklığı üzerindeki göz önüne alınırsa, kanat açısı azaldıkça kolektör etkinliğinin artacağı görülecektir. Hava giriş-çıkış ve kolektör yüzey sıcaklıklarının günün zamanına göre değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir.

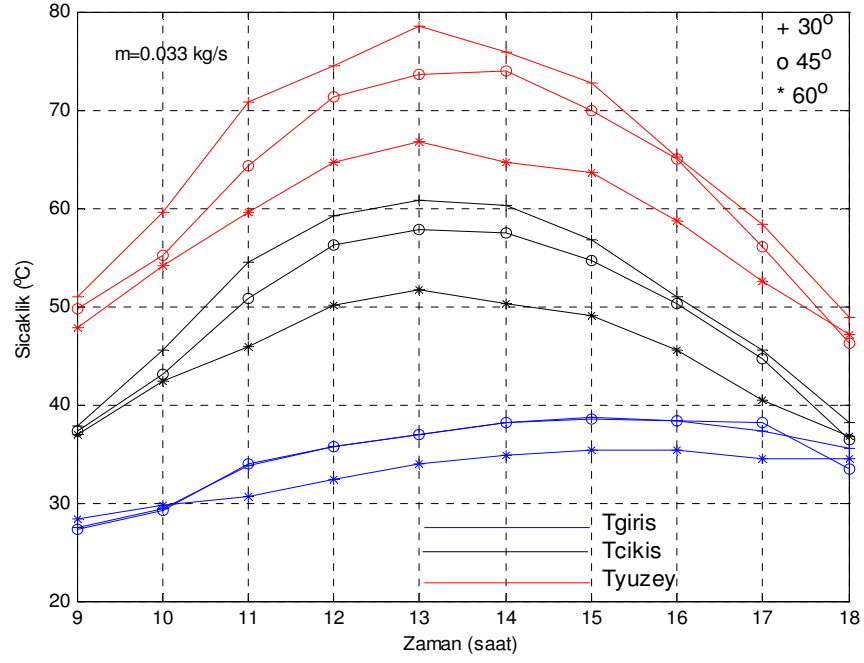
Güneş kolektörleri için enerji bilançosu göz önüne alınırsa; birim zamanda sisteme verilen enerji ($I.A_k$) kolektör yüzeyinde toplanmaktadır. Sistemde, alınan enerjinin (Q_u) artmasıyla toplayıcı yüzey sıcaklığının azalması beklenen bir fiziksel davranış olur.



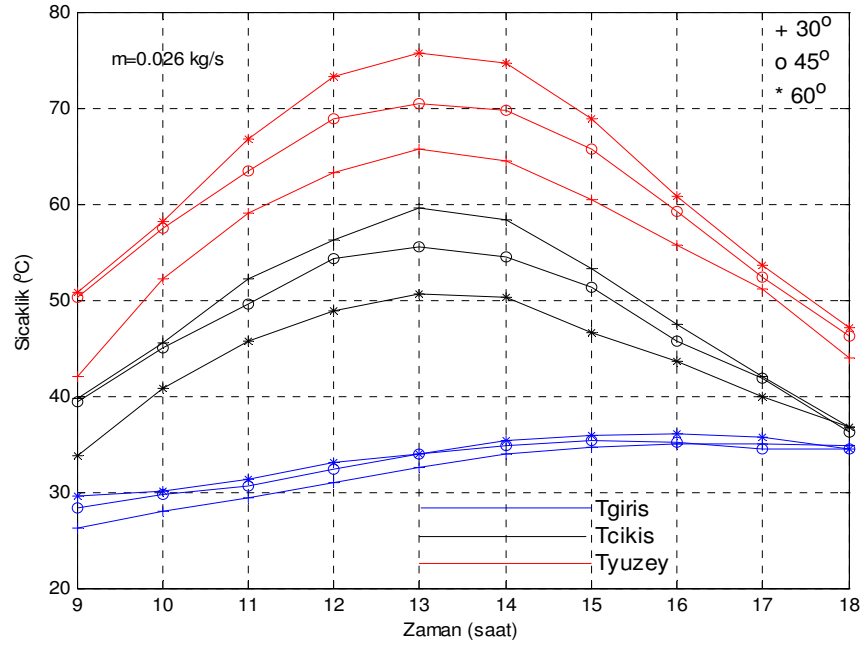
Şekil 4.3 $\alpha=45^\circ$ için anlık kolektör etkinliğinin günün zamanına göre değişimi



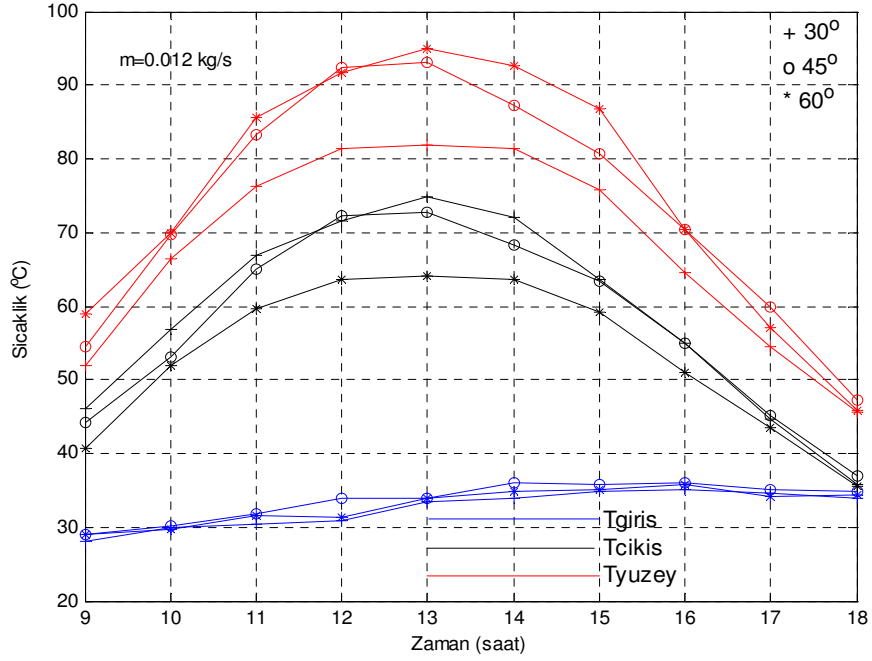
Şekil 4.4 $\alpha=60^\circ$ için anlık kolektör etkinliğinin günün zamanına göre değişimi



Şekil 4.5 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için sıcaklıkların günün zamanına göre değişimi



Şekil 4.6 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için sıcaklıkların günün zamanına göre değişimi



Şekil 4.7 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için sıcaklıkların günün zamanına göre değişimi

Yukarıda bahsedildiği gibi havanın kütlesek debisi arttıkça sistemden alınan enerji artmaktadır. Şekil 4.6 ve 4.7'de görüldüğü gibi sistemden enerji kazancıyla kollektör yüzey sıcaklığı arasında ters orantı vardır. Yani, ısı kazancı arttıkça kollektör yüzey sıcaklığı azalmaktadır. Bu durum yaklaşık eşit ısıtım değerleri için geçerlidir. Bununla birlikte, ısı kazancıyla kollektör giriş-çıkış sıcaklık farkı (ΔT) arasında doğru orantı vardır. Ancak, havanın kütlesek debisi ile kollektör giriş-çıkış sıcaklık farkı arasında ters orantı vardır.

Güneş kolektörlerinin bir ısı değiştiricisi olduğu göz önüne alınırsa, ısı transferi için literatür karşılaştırması yapılabilir. Bu amaçla, ortalama Nusselt sayısının tespit edilmesi gerekir. Bilindiği gibi Nusselt sayısı yüzeydeki sıcaklık gradyanına eşittir.

$$Nu = \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=\text{toplayı}} = \frac{hD_h}{k} \quad (4.4)$$

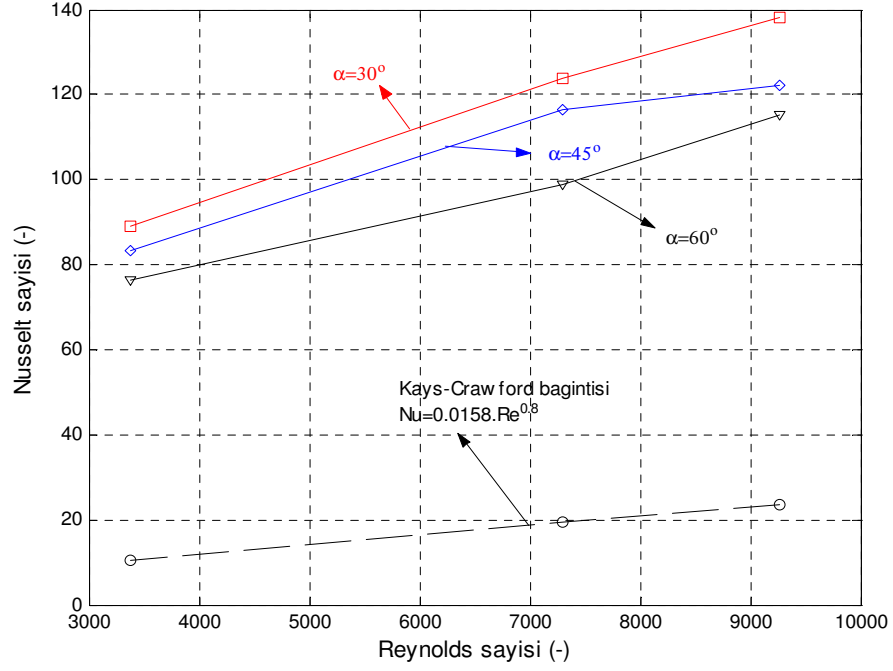
Burada;

θ = Sıcaklık farkı

h = Havanın taşınım katsayısı

D_h = Akışın eşdeğer çapı

k = Havanın ısı iletim katsayısıdır.



Şekil 4.8 Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişim

Denklem (4.3), havanın kütleli debisinden dolayı taşıdığı ısı kazanç miktarını vermektedir. Ayrıca bu eşitlik, havanın taşınım katsayısına bağlı olarak elde edilen ısı miktarına eşittir

$$Q_u = hA_k LOSF = \dot{m}C_p \Delta T \quad (4.5)$$

Burada $LOSF$; Logaritmik sıcaklık farkıdır. D_h ve $LOSF$;

$$D_h = \frac{4A}{U} \quad (4.6)$$

$$LOSF = \frac{((T_y - T_g) - (T_y - T_\zeta))}{\ln\left(\frac{(T_y - T_g)}{(T_y - T_\zeta)}\right)} \quad (4.7)$$

eşitlikleriyle elde edilir. Böyle sistemlerde akış türü ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Akış türü, boyutsuz Reynolds sayısı ile belirlenir.

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (4.8)$$

havanın fiziksel özellikleri ortalama sıcaklığa $((T_c + T_g)/2)$ göre belirlenmiştir.

Görüldüğü gibi, bir tarafı izole edilmiş diğer tarafında ise üniform ısı akısı bulunan bir kanal için ortalama Nusselt sayısı Kays-Crawford bağıntısı kullanılmaktadır (Şekil 4.8). Kütleli debilere bağlı olarak kollektör içerisinde $3371 \leq Re \leq 9270$ olmaktadır. Reynolds sayısına bağlı olarak $\alpha=60^\circ$ için Nusselt sayısı 76 ile 115 arasında değişmektedir. $\alpha=45^\circ$ için 83 ile 121 arasında ve $\alpha=30^\circ$ için 89 ile 138 arasında değişmektedir. Buradan anlaşılabileceği gibi Reynolds sayısı arttıkça kanat açısının etkisi de artmaktadır. Bu gibi sistemlere pasif yöntemler kullanılarak ısı transferi önemli oranda artırılabilir. Görüldüğü gibi $\alpha=60^\circ$ için ortalama Nusselt sayısı teorik Nusselt sayısına göre yaklaşık 5 kat, $\alpha=45^\circ$ için yaklaşık 6 ve $\alpha=30^\circ$ için yaklaşık 6.5 kat artmaktadır.

Bir sistem tasarlanırken asıl bilinmesi gereken kaynağın iş potansiyeli veya kaynağın iş yapabilme kapasitesidir. Başka bir deyişle kaynakta var olan enerjinin ne kadarının işe dönüştürülebileceğinin bilinmesi gerekir. Bu bakımdan belirli bir halde ve belirli bir miktarda enerjiden elde edilebilecek işi belirleyen bir özelliğin tanımlanması çok yararlı olacaktır. Bu özelliğin adı kullanılabilirlik yada ekserjidir. Ekserjin, tersinir bir süreç sonunda çevre ile sistemin denge haline gelmesi durumunda elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır. Bu durumda,

$$\sum \dot{m}_c = \sum \dot{m}_g \quad (4.9)$$

Sürekli akışlı açık bir sistem için ekserji dengesi;

$$\sum E_c - \sum E_g + \sum E_{\text{üretilen}} = 0 \quad (4.10)$$

yazılır. Ayrıca, maksimum iş ile gerçek iş arasındaki fark kayıp işi vermektedir. Gerçek iş;

$$W = \sum Q_v (1 - (T_o/T_k)) - T_o S_{gen} + \sum \dot{m}_g (h_g - T_o s_g) - \sum \dot{m}_c (h_c - T_o s_c) \quad (4.11)$$

olarak elde edilir. Havanın ideal gaz kabul edildiğinde;

$$\Delta h = (h_{\phi} - h_g) = Cp \cdot \Delta T \quad (4.12)$$

$$\Delta S = Cp \ln \left(\frac{T_{\phi}}{T_g} \right) - R \ln \left(\frac{P_{\phi}}{P_g} \right) \quad (4.13)$$

yazılır. Denklem 4.11’de verilen entropi üretim oranı S_{gen} için;

$$S_{gen} = \sum \dot{m}_{\phi} \cdot s_{\phi} - \sum \dot{m}_g \cdot s_g - \sum Q_v / T_k \geq 0 \quad (4.14)$$

bağıntısı kullanılır. Termodinamik tersinmezlik boyunca kayıp iş ($W_{rev}-W$), ekserji kaybı (E) olarak adlandırılır. Burada tersinir iş;

$$W_{rev} = \sum Q_v (1 - (T_o / T_y)) + \sum \dot{m}_g (h_g - T_o \cdot s_g) - \sum \dot{m}_{\phi} (h_{\phi} - T_o \cdot s_{\phi}) \quad (4.14)$$

sistemdeki kayıp işi elde ettiğimizde, kayıp işin sistemdeki ekserji kaybına eşit olduğunu ve bu ekserji kaybının sistemdeki entropi üretim oranıyla çevre sıcaklığının çarpımına eşit olduğunu görürüz. Bu durumda sürekli akışlı sürekli açık sistemler için ekserji kaybı;

$$\begin{aligned} E &= T_o \dot{S}_{gen} \\ &= \sum \dot{m}_g (h_g - T_o s_g) - \sum \dot{m}_{\phi} (h_{\phi} - T_o s_{\phi}) + \sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T_y} \right) - \dot{W} \end{aligned} \quad (4.15)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Denklem 4.12 ve 4.13 denklem 4.15’de yerine yazılırsa;

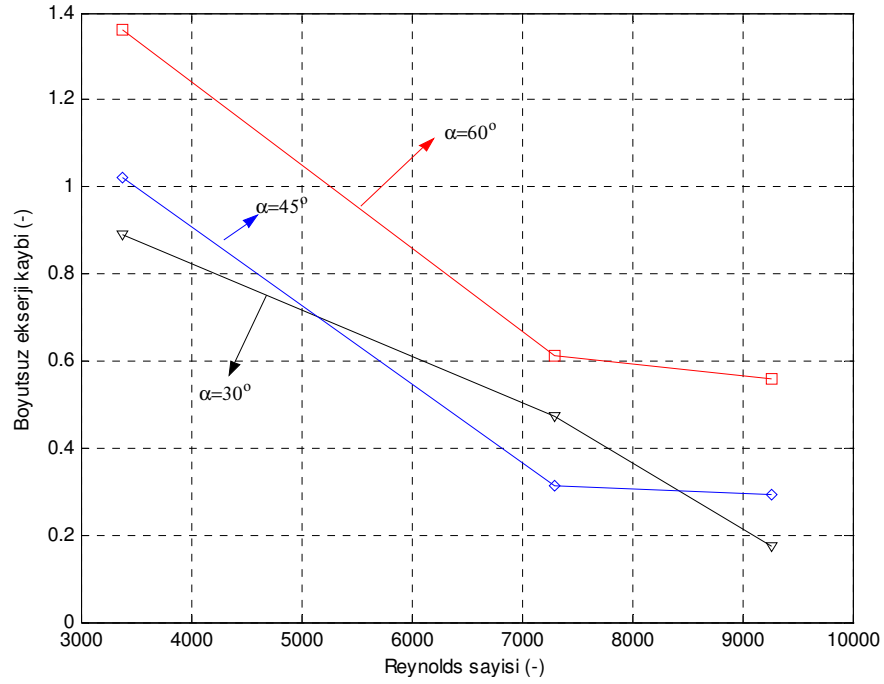
$$E = \dot{m} Cp T_o \ln \left(\frac{T_o}{T_g} \right) - \dot{m} Cp \Delta T - \dot{m} R T_o \ln \left(\frac{P_{\phi}}{P_g} \right) + I A_k \left(1 - \frac{T_o}{T_y} \right) \quad (4.16)$$

4.16 eşitliğinin her iki tarafı ısı kazancına (Q_u) bölünürse (Kurtbaş ve Durmuş);

$$E_B = \frac{E}{Q_u} = \frac{T_o}{\Delta T} \ln \left(\frac{(T_{\phi} / T_g)}{(P_{\phi} / P_g)^{\frac{k-1}{k}}} \right) + \frac{I}{\eta} \left(1 - \frac{T_o}{T_y} \right) - I \quad (4.17)$$

olarak elde edilir.

Şekil 4.9’de görüldüğü gibi, boyutsuz ekserji kaybı ile Reynolds sayısı arasında ters orantı vardır. Şekil 4.8 ve 4.9 birlikte göz önüne alınırsa, ortalama Nusselt sayısı ve boyutsuz ekserji kaybı arasında da ters orantı vardır. Buradan anlaşılacağı gibi Reynolds sayısının artması sistemdeki ısı transferini artırmaktadır ancak ısı transferiyle paralel olarak entropi üretimi ve basınç kayıplarını da artıracaktır. Denklem 4.17 göz önüne alınırsa, şekil 4.9 de verilen boyutsuz ekserji kaybı değişimine göre Reynolds sayısı arttıkça kazanılan ısı ekserji kaybından daha fazla artmaktadır. Ayrıca, kanatçıkların ısı transferi üzerindeki etkisi ekserji kaybında da görülmektedir. Kanatçık açısı azaldıkça ısı transferi artmakta ve maksimum Reynolds sayısında ekserji kaybının yaklaşık 5 katı olmaktadır. $\alpha=30^\circ$ için ısı kazancı, bütün Reynolds sayılarında ekserji kaybından daha fazla olmaktadır. bununla birlikte $\alpha=60^\circ$ için düşük Reynolds sayılarında ekserji kaybı ısı kazancının yaklaşık 1.4 katı olmaktadır.

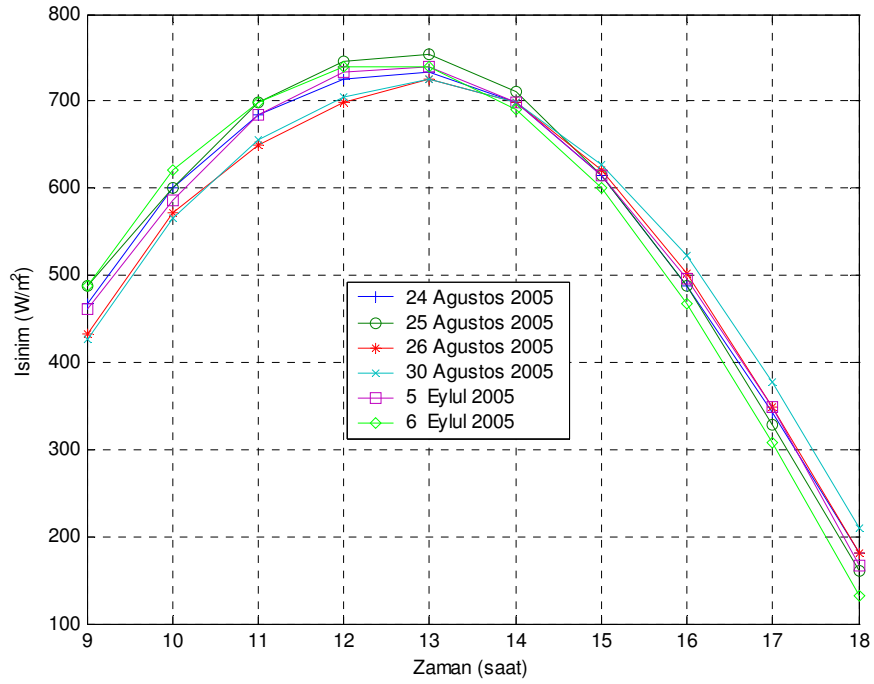


Şekil 4.9 Boyutsuz ekserji kaybının Reynolds sayısına göre değişimi

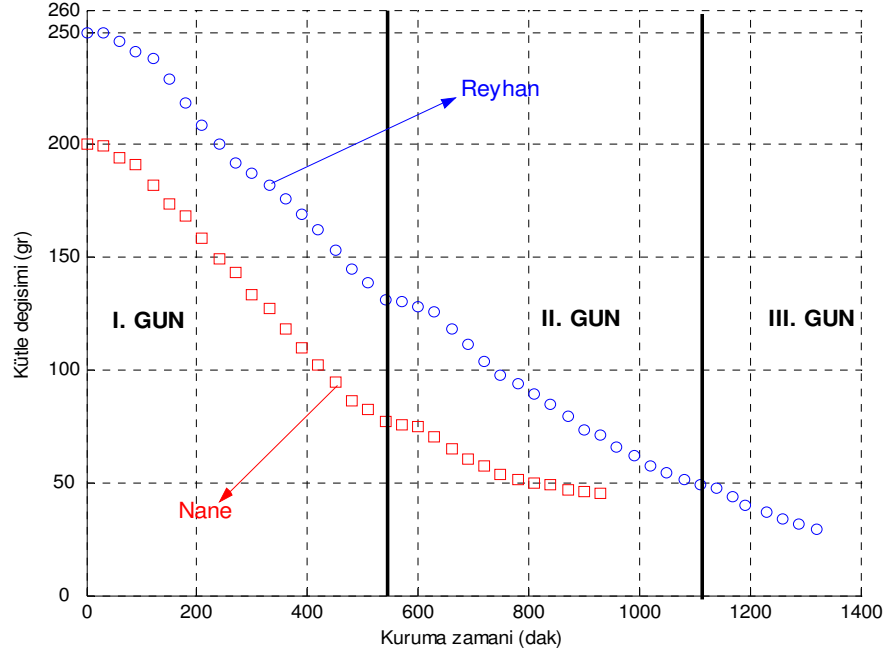
4. 2. Kurutma Deneylerinden Elde Edilen Bulguları

Yukarıda bahsedildiği gibi kollektör ve kurutma deneyleri ayrı zamanlarda yapılmıştır. Kollektör deneyleri tamamlandıktan sonra en etkin kollektör tipi ($\alpha=30^\circ$) kurutma deneylerinde kullanılmıştır. Kurutma deney günlerine ait ısıtım değerleri Şekil 4.10’da verilmiştir.

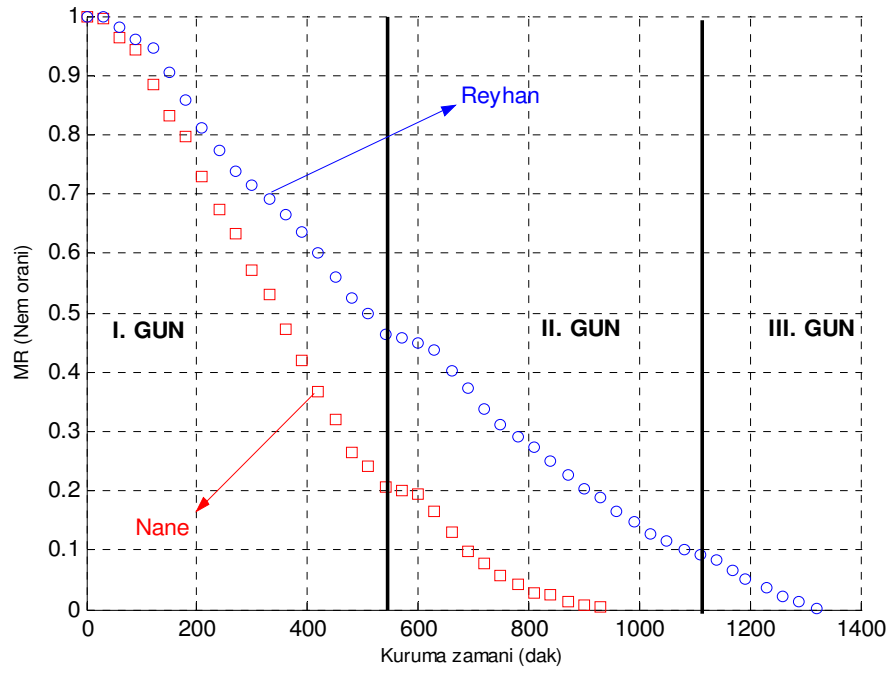
24 Ağustos ile 6 Eylül 2005 tarihleri arasında yapılan kurutma deneylerinin karşılaştırması için yaklaşık eşit ışınlam olan günler tercih edilmiştir. Görüldüğü gibi sabah saatlerinde 440-490 W/m² arasında değişen ışınlam değerleri öğle saatlerinde artarak 720-750 W/m² arasında değişmektedir. saat 16'dan sonra 200 W/m² değerine kadar düşmektedir. Bu ışınlam değerlerinde her bir numune için üç farklı kütleli debide ($\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$) kurutma deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.10 Kurutma deney günlerine ait ışınlam değerlerinin günün saatine göre değişimi



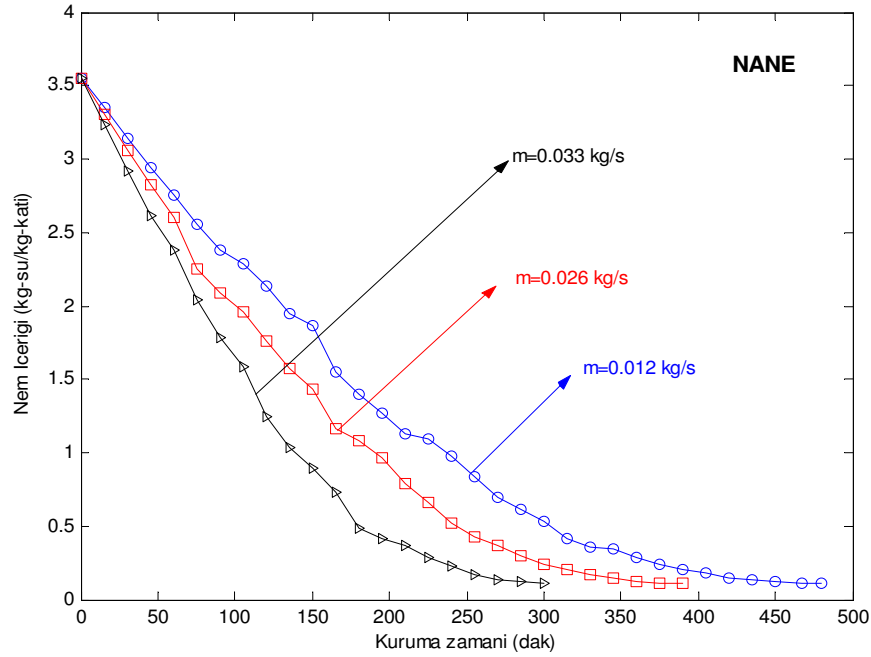
Şekil 4.11 Nane ve reyhan için doğal kurutma şartlarında kütlenin değişimi



Şekil 4.12 Nane ve reyhan için doğal kurutma şartlarında nem oranının değişimi

Havalı güneş kolektörleri yardımıyla kurutma işlemine başlamadan önce hem nane hem de reyhan için doğal ortamda kurutma yapılmıştır. Şekil 4.11'de nane ve reyhan için kütle değişimi ve kuruma zamanı arasındaki ilişki verilmiştir. Görüldüğü gibi doğal kurutmada nane yaklaşık 930 dakikada, reyhan ise 1320 dakikada kütle değişimi sıfıra yaklaşmaktadır.

Bu verilere göre nane yaklaşık 2 günde, reyhan ise yaklaşık 3 günde kurumaktadır. Şekil 4.12’de nem oranı ile kuruma zamanı arasındaki ilişki verilmektedir. Görüldüğü gibi her bir günün başlangıcında kütle ve nem içeriği yavaş değişmektedir. Bunda, sabah ışınlam değerinin ve ortam sıcaklığının düşük olması ve ürünün rejime gelmesi etkili olmaktadır. Nane için yapılan kurutma deneylerinden elde edilen, nem içeriğinin kuruma zamanına göre değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir. Burada, ürünün nem içeriği için;



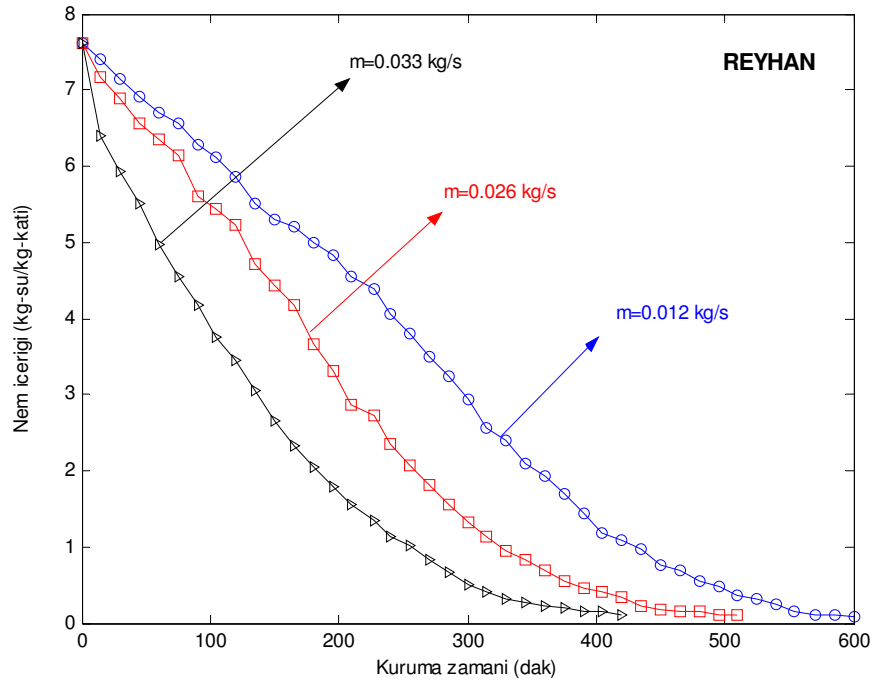
Şekil 4.13 Nane için Nem içeriğinin kurutma zamanına göre değişimi

$$Nem\ içeriği = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_e} \quad (4.18)$$

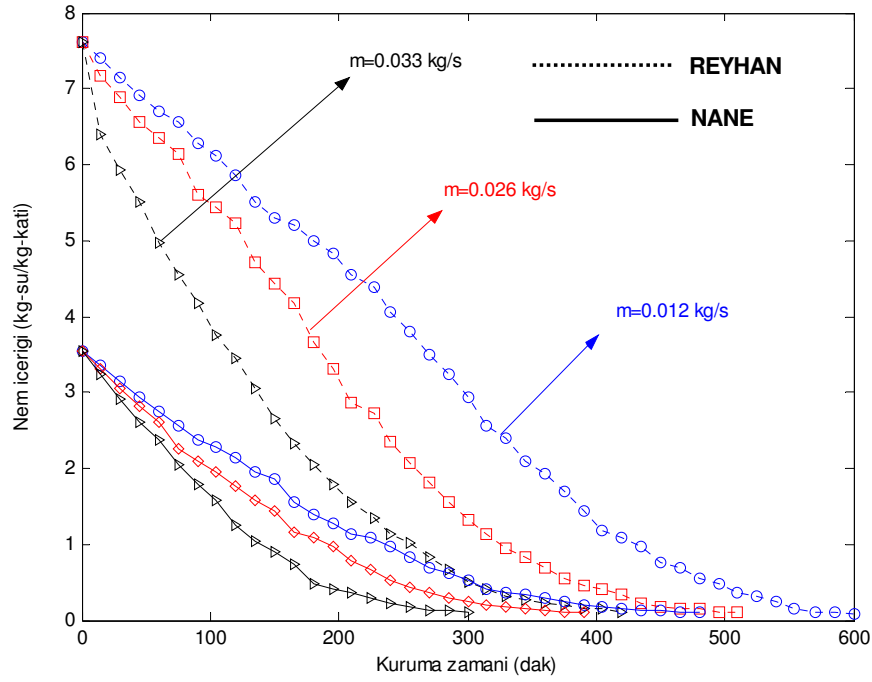
bağıntısı kullanılmıştır. Görüldüğü gibi Nane için nem içeriği maksimum 3.55 dir. Bir başka deyişle; yaş (taze) nane içerisinde, kuru nanenin 3.55 katı su bulunmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi kurutucu hava debisinin nem içeriğinin zamanla değişimi üzerinde önemli bir etkisi vardır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için nem içeriği 480 dakikada, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için 390 dakikada ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için 300 dakikada yaklaşık sıfır olmaktadır. Nem içeriğinin “sıfır” olması terimi bundan sonraki irdelemelerde sıkça kullanılacaktır. Bu nedenle, öncelikle ürün içerisindeki nem içeriğinin sıfır olması teriminin açıklanmasında fayda vardır. Bilindiği gibi kurutma işlemi sonunda ürün içerisindeki su miktarı hiçbir zaman sıfır olmaz. Her ürünün iç yapısına ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklı oranlarda ürün içerisinde su kalmaktadır.

Yaş ürünlerin fiziksel özelliklerinin kurutulmuş ürüne göre daha erken bozulduğu göz önüne alınırsa, kurutma işleminin önemi daha iyi anlaşılır. Kurutma işleminde bu nem oranı düşürülerek “makul bir orana” çekilir. Bu “makul oran” her ürün için farklı değerdedir. Yani, kurutma işlemi sonunda ürün içerisinde belirli bir oranda su kalmaktadır. Nane ve Reyhan için bu makul oranın %10-12 arasında olduğu belirlenmiştir. Ancak kurutma işleminde bu %10-12 oranındaki nemi üründen atmak bütün kurutma işleminden daha uzun bir süre almaktadır. Bu çalışmada, ürünlerdeki kütle değişimi çok düşük olduğu durumda kurutma işlemi durdurulmuştur.

Şekil 4.13’den görüldüğü gibi $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için nem içeriği 320. dakikaya kadar hızlı bir şekilde düşmektedir. 480 dakika sonra ise kütle değişimi devam etmekte ancak 10^{-4} mertebesinde olmaktadır. $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için bu kuruma evresi 260 dakikaya kadar, $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için ise 200 dakikaya kadar sürmektedir. Şekil 4.14’de Reyhan için nem içeriğinin kuruma zamanına göre değişimi verilmiştir. Deneysel çalışmalarda 200 gr nane, 250 gr reyhan kullanılmıştır. Nane için 3.55 olan maksimum nem içeriği reyhan için 7.62 kat olmaktadır. reyhan için yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, nem içeriği arttıkça debinin nem içeriğinin değişimi üzerindeki etkisi de artmaktadır.

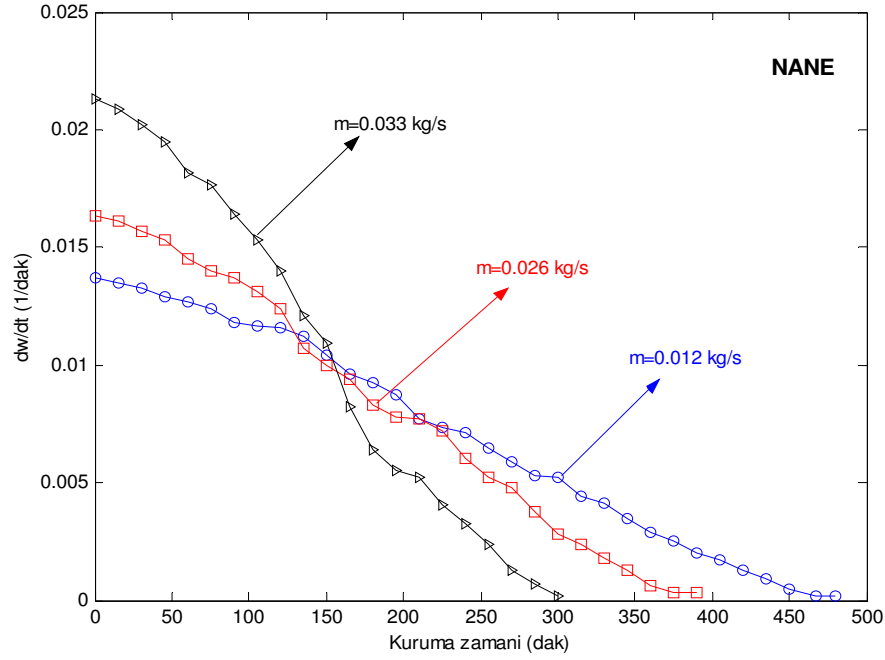


Şekil 4.14 Reyhan için Nem içeriğinin kurutma zamanına göre değişimi



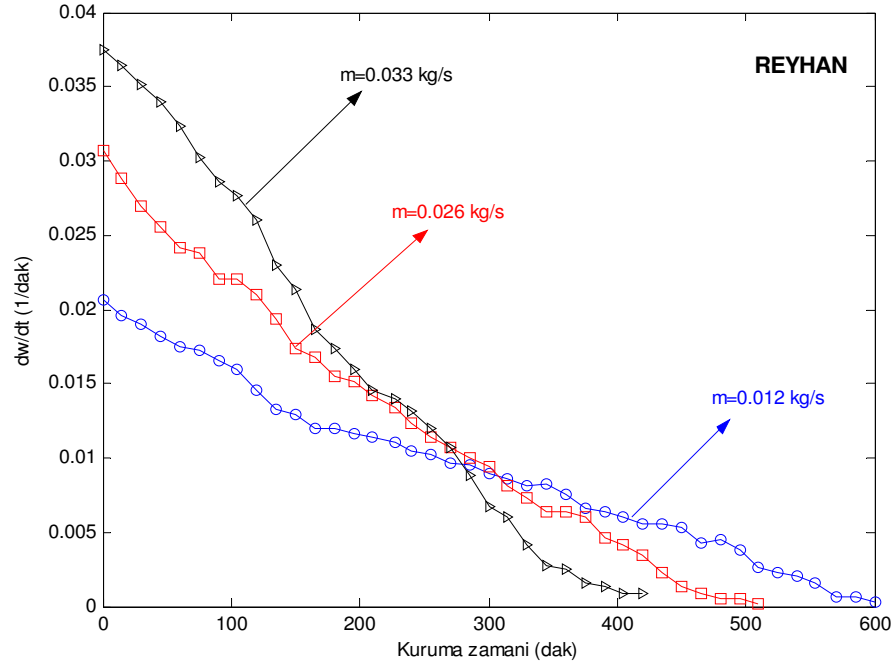
Şekil 4.15 Reyhan ve Nane için Nem içeriği değişiminin karşılaştırması

Şekil 4.15’de hem reyhan hem nane için nem içeriği değişimi karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, kurutmaya başlamadan önce reyhanın nem içeriği nane için yaklaşık 2.1 katıdır. Ancak her iki ürününde kuruma nem içeriği yaklaşık %10-12 olmaktadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için nane kuruma zamanı 480 dakika olurken reyhan için 600 dakika olmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için nane kuruma süresi 300 dakika iken reyhan kuruma süresi 420 dakikadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için nane nem içeriği 480 dakika sonra sıfır olurken aynı zaman adımı Reyhan nem içeriği 0.56 kadardır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için nane nem içeriği 300 dakikada sıfır olurken aynı zaman adımı Reyhanın nem içeriği 0.31 olmaktadır.



Şekil 4.16 Nane için kuruma hızının zamana göre değişimi

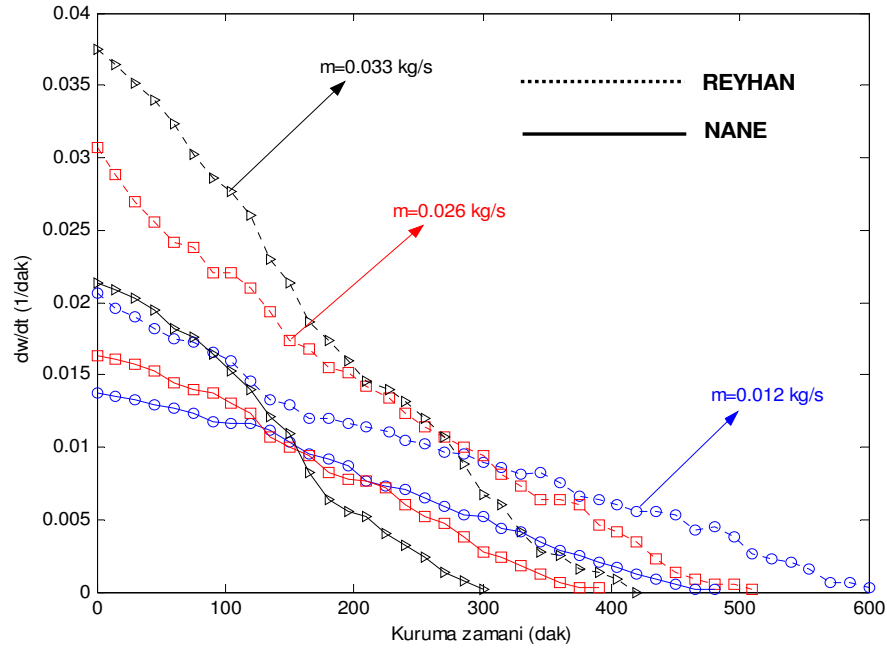
Kuruma hızının tespiti için nem içeriğindeki değişimin zamana göre türevi alınır. Şekil 4.16’de farklı kütleli debiler için kuruma hızının günün zamanına göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için kuruma hızı 0.013 s^{-1} ile başlamakta ve 480 dakika sonunda yaklaşık sıfır olmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için ise 0.021 s^{-1} ile başlamakta ve 300 dakika sonunda yaklaşık sıfır olmaktadır. Kurutma işlemi başladığında, $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ ’den $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye çıktığında kuruma hızı yaklaşık %19 artarak 0.016 s^{-1} , $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye çıktığında ise %55 artarak 0.021 s^{-1} olmaktadır. Şekil 4.16’da dikkat edilmesi gereken bir nokta ise yaklaşık 150. dakikada bütün kütleli debiler için kuruma hızı hemen hemen eşit olmaktadır. Bu durum, kurutma işlemi başlangıcından yaklaşık 2.5 saat sonra bütün kütleli debiler için nem içeriğinin eşit olduğunu gösterir.



Şekil 4.17 Reyhan için kuruma hızının zamana göre değişimi

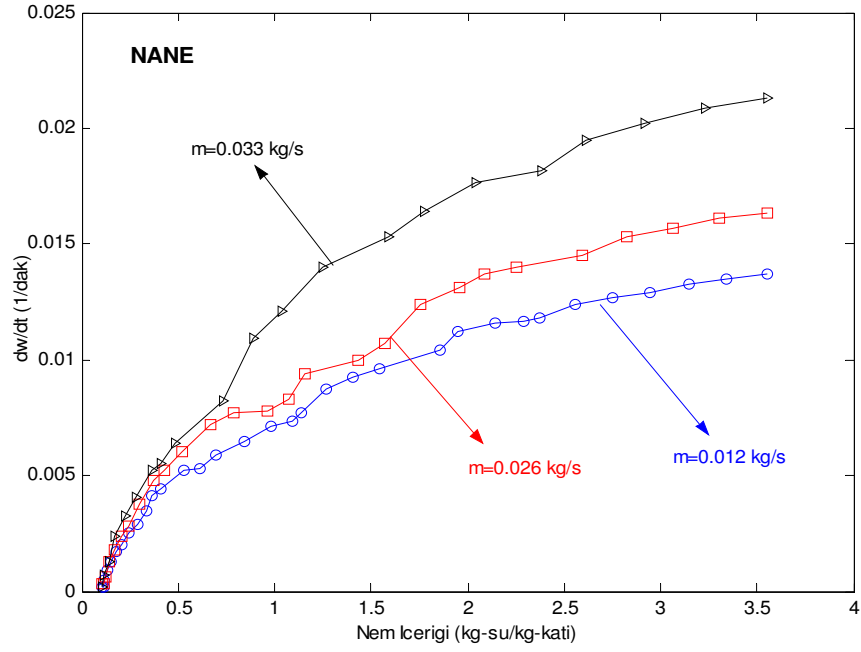
Şekil 4.17’de reyhan için kuruma hızının kuruma zamanına göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.18’de nane ve reyhan kuruma hızının karşılaştırması verilmiştir. Görüldüğü gibi reyhanın kuruma hızı aynı kütleli debilerde nanenin kuruma hızından daha fazladır.

Eğer reyhanın nem içeriğinin nanenin nem içeriğinden 2.1 kat daha fazla olduğu hatırlanırsa, ürün nem içeriği artıka kuruma hızının da artacağı söylenebilir. Ayrıca, bütün kütleli debiler için kuruma zamanı arttıkça nem içeriğinin kuruma hızı üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Yani, kuruma işlemi başlangıcında nem içeriğinin kuruma hızı üzerindeki etkisi daha fazladır. Bu etki bütün kurutma işlemi boyunca azda olsa etkisini kaybederek devam etmektedir.

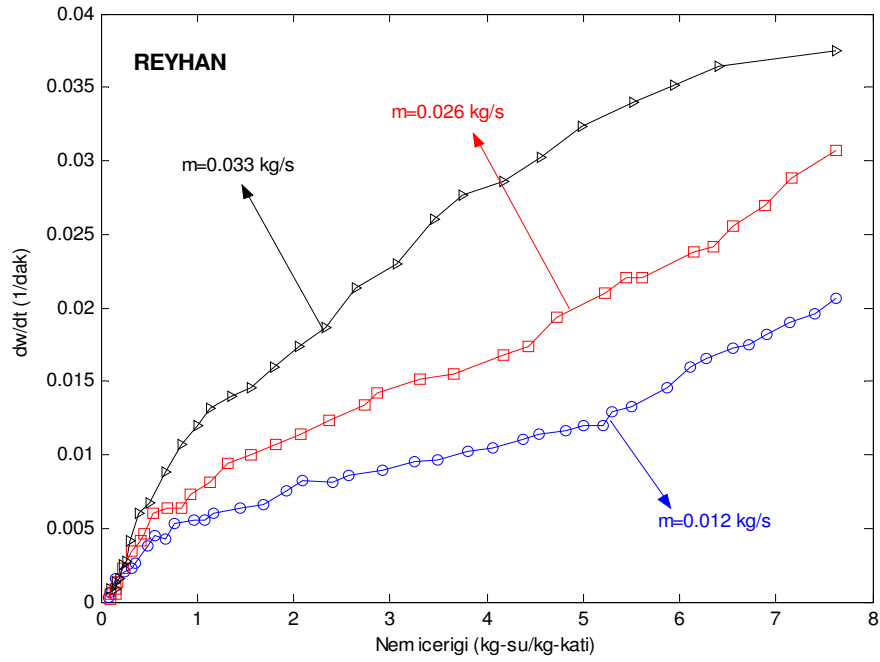


Şekil 4.18 Nane ve Reyhan için kuruma hızının karşılaştırması

Nem içeriği ve kuruma hızı arasındaki ilişkiyi daha açık olarak görmek için Şekil 4.19'u dikkatle incelemekte yarar vardır. Bu şekilde nane için kuruma hızı ve nem içeriği arasındaki ilişki verilmiştir. Yukarıda bahsedilen kuruma zamanı, nem içeriği ve kütleli debi arasındaki ilişki Şekil 4.19 üzerinde açıkça görülmektedir. Öncelikle, kuruma zamanı arttıkça nem içeriğinin azaldığı vurgulanmıştı. Nem içeriği arttıkça kuruma hızının attığını görüyoruz. Ayrıca, kütleli debi arttıkça kuruma hızı da artmaktadır. Şekil 4.20'de reyhan için verilen kuruma hızı ve nem içeriği grafiğinde, bu değişim farklı değerlerde fakat aynı periyotta elde edilmektedir.



Şekil 4.19 Nane için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi



Şekil 4.20 Reyhan için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi

Şekil 4.21’de hem reyhan hem nane için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi verilmiştir. Reyhan için nem içeriği 7.62 olduğunda kuruma hızı; $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için 0.037, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için 0.03 ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için 0.02 olmaktadır. Bununla birlikte, nem içeriğinin 0.5 değerinden önce kuruma hızı bütün kütledebiler için yaklaşık aynı değerdedir.

Yani, nem içeriği 0.5'in altına düştüğünde kurutucu havanın kütleli debisinin kuruma hızı üzerindeki etkisi azalmaktadır. Burada, vurgulanması gereken bir diğer konu ise; 200 gr nane kurutularak 45 gr kuru ürün elde edilmektedir. Yani, nanenin yaklaşık %77 su içeriği, havanın kütleli debisine bağlı olarak 300-480 dakikada ürün içerisinde atılmaktadır. Buna karşın, 250 gr reyhan yaklaşık %88 su kaybederek 29 gr kuru ürün olarak kalmaktadır. 250 gr reyhan içerisindeki 221 gr su havanın kütleli debisine bağlı olarak 420-600 dakikada kurumaktadır.

Kurutma işleminde; kurutma ve kurutucu parametreleri incelenirken, boyutsuz nem oranı (MR) en önemli parametrelerden birisidir. Boyutsuz nem oranı hesaplanırken; ölçüm zamanı nem içeriği, başlangıç nem içeriği ve denge nem içeriği dikkate alınır.

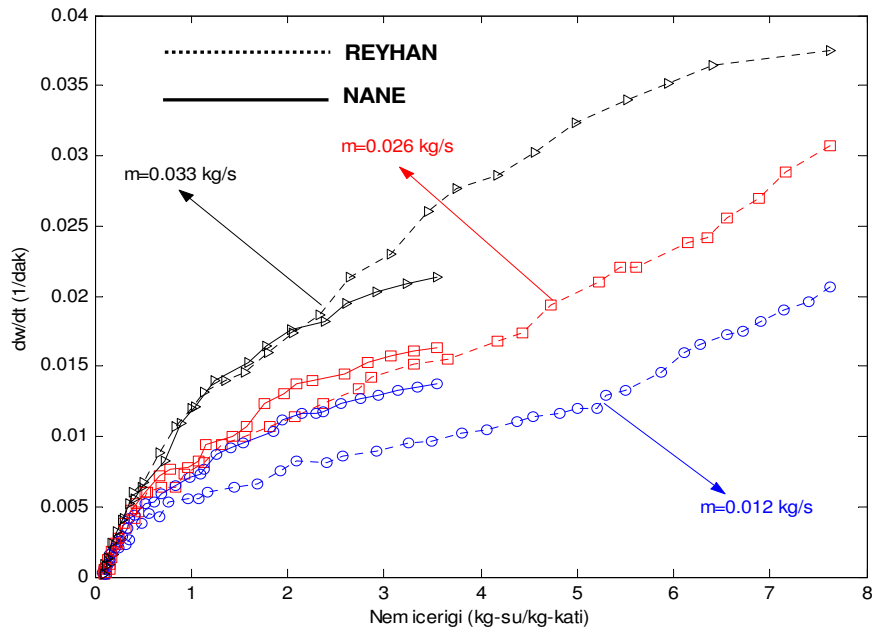
$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} \quad (4.19)$$

Burada;

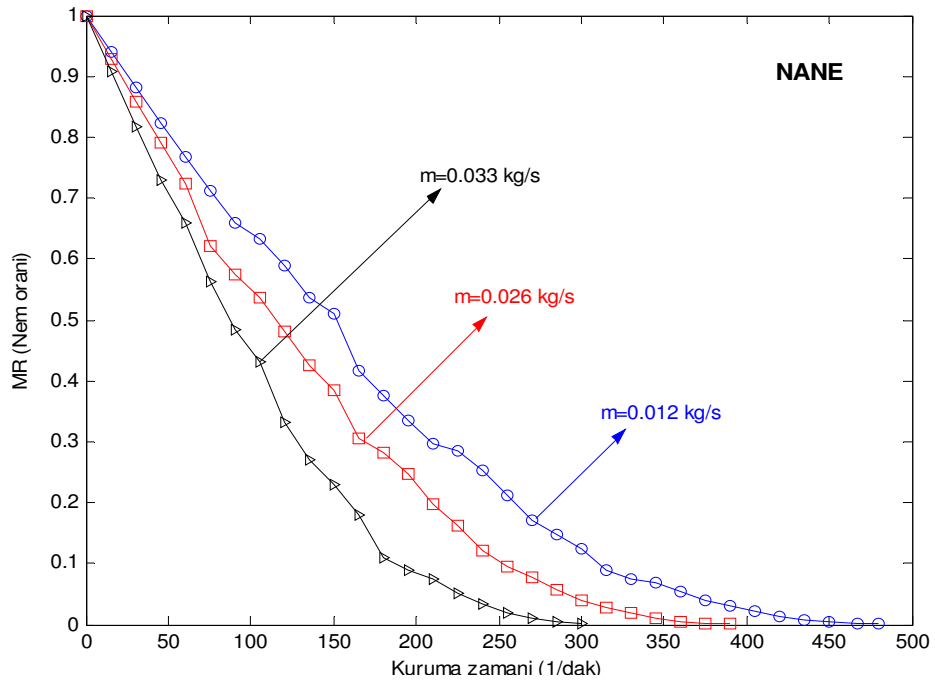
$M_{(t)}$: t zamandaki ürünün kütlesi,

M_e : kurutulmuş ürün kütlesi,

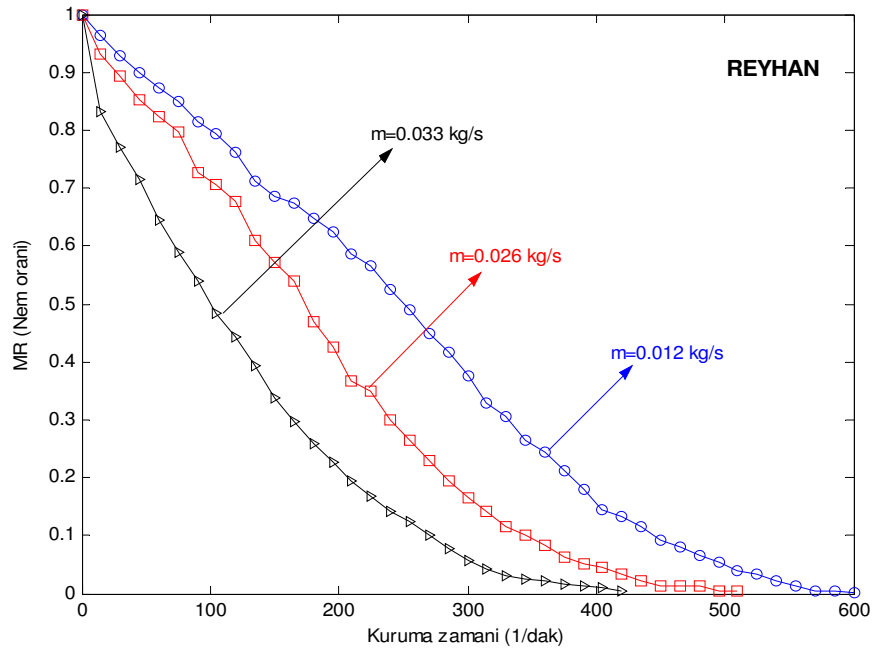
$M_{(ilk)}$: ürünün ilk kütlesidir.



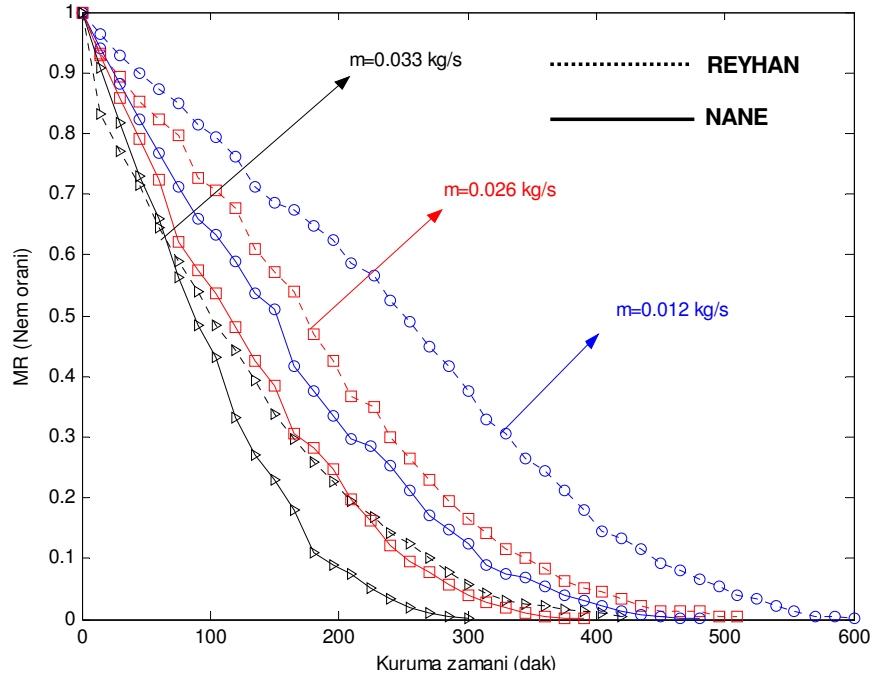
Şekil 4.21 Nane ve Reyhan için kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi



Şekil 4.22 Nane için nem oranının zamana göre değişimi

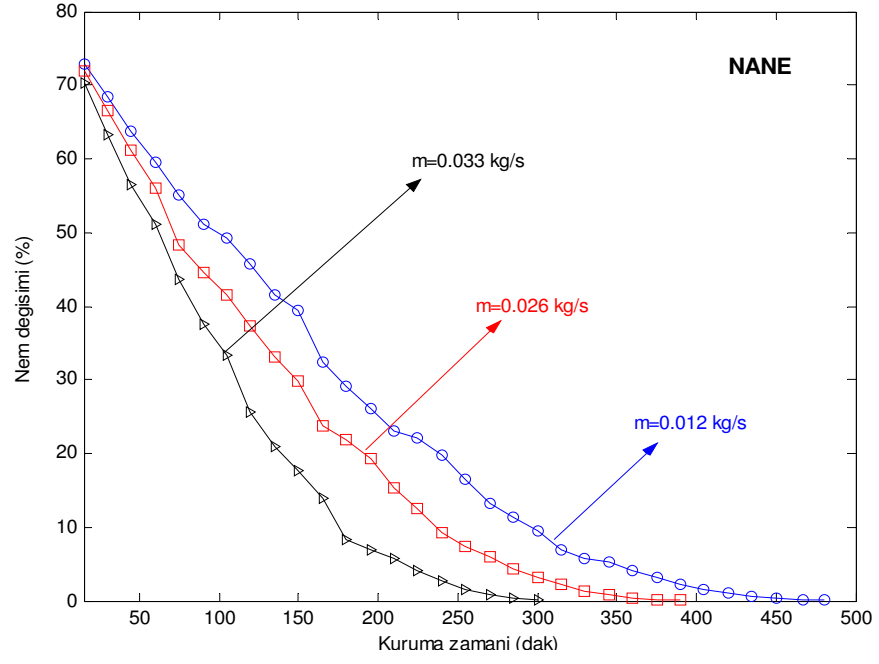


Şekil 4.23 Reyhan için nem oranının zamana göre değişimi

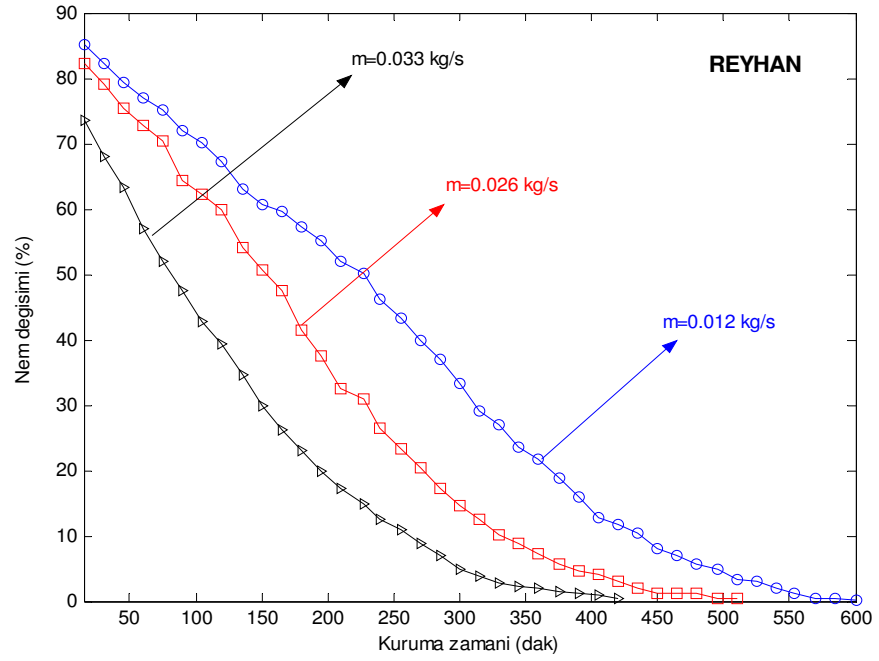


Şekil 4.24 Nane ve Reyhan için nem oranının zamana göre değişimi

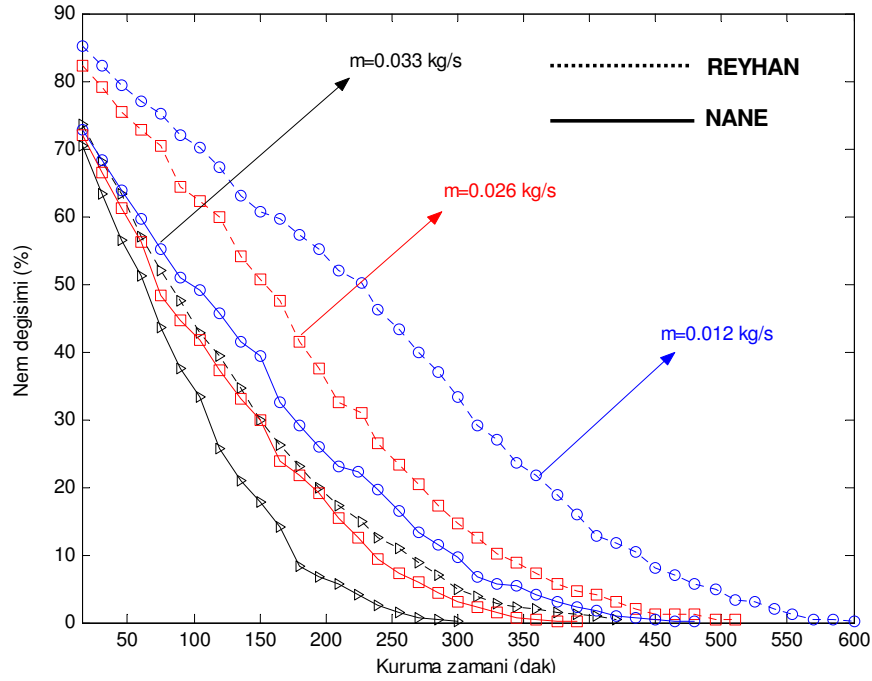
Şekil 4. 22’de nane, 4. 23’de reyhan için boyutsuz nem oranının kuruma zamanına göre değişimi verilmiştir. Doğal olarak $t=0$ ’da her iki ürünün de boyutsuz nem oranı 1 olarak elde edilmektedir. Nananın kurutulmasında $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için 180.dakika, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için 240. dakika ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için 340. dakikaya kadar boyutsuz nem oranı hızlı bir periyotta azalmaktadır. Bu zaman adımlarından sonra yavaşlamaktadır. Reyhan için ise bu hızlı periyot sırasıyla 300, 360 ve 450. dakikaya kadar sürmektedir (Şekil 4. 24). Görüldüğü gibi kütleli debinin boyutsuz nem üzerindeki etkisi önemli ölçüde olmaktadır. Ayrıca, hem nane hem reyhan için $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye kadar kuruma hızı, kütleli debiye göre boyutsuz nem üzerinde daha etkilidir. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye çıktığında kütleli debinin boyutsuz nem üzerindeki etkisi de artmaktadır.



Şekil 4.25 Nane için nem değişiminin zamana göre değişimi



Şekil 4.26 Nane için nem değişiminin zamana göre değişimi



Şekil 4.27 Nane ve Reyhan için nem değişiminin zamana göre değişimi

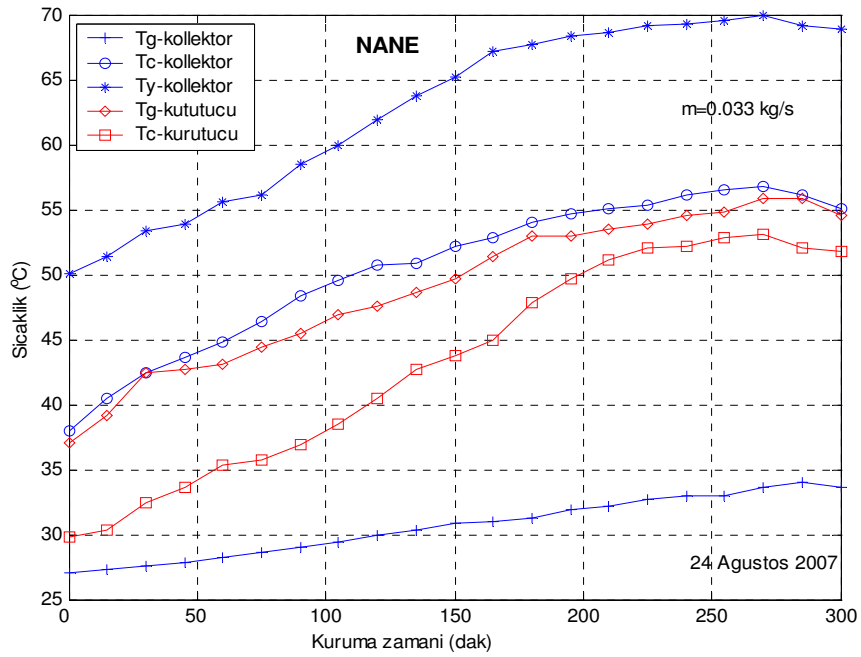
Şekil 4.25’de nane, 4.26’de reyhan ve 4.27’de nane ve reyhan için farklı kütleli debilerde nem kaybının (%) kuruma zamanına göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi % nem kaybı 15. dakikadan başlayarak her iki ürün için hızlı bir şekilde azalmakta ve denge nem içeriğine eşit oluncaya kadar bu düşüş devam etmektedir. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için nane nem miktarı %95 iken reyhan için %96 olmaktadır. $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için %71 ve %93 ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için ise %70 ve %85 olmaktadır. burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, nem içeriği arttıkça kütleli debinin % nem miktarı üzerindeki etkisi de artmaktadır. Burada, yaş baza göre % nem miktarı elde edilmiştir.

$$\text{Nem değişimi}(\%) = \frac{M_s}{M_{(ilk)}} \times 100 = \frac{(M_{(t)} - M_e)}{(M_s + M_e)} \times 100 \quad (4.20)$$

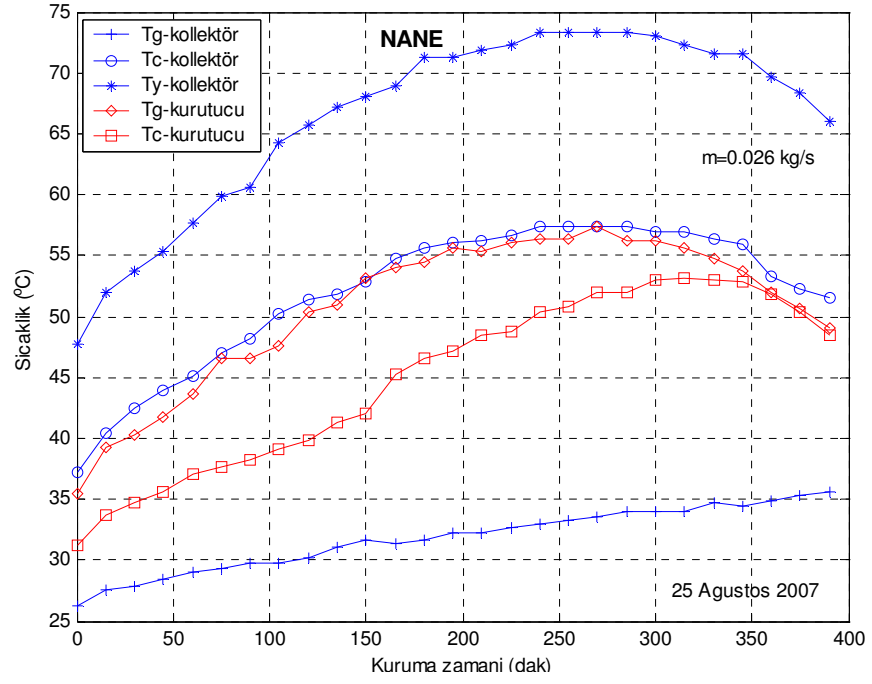
burada, M_s :ürün içerisindeki su kütlesi, M_e :ürünün kuru kütlesi, $M_{(ilk)}$, ürünün ilk kütlesi, $M_{(t)}$ ise t zamandaki ürünün kütlesidir.

Şekil 4.28’de kurutma deneyi günlerine ait kollektör giriş-çıkış, kollektör yüzey ve kurutucu giriş-çıkış sıcaklık değerlerinin kuruma zamanına göre değişimi verilmiştir. Burada, sabah saat 9, kuruma zamanının başlangıcını göstermektedir. Görüldüğü gibi kollektör yüzey sıcaklığı sabah saatlerinde yaklaşık 50 °C’den başlamakta ve 70 °C’ye kadar çıkmaktadır.

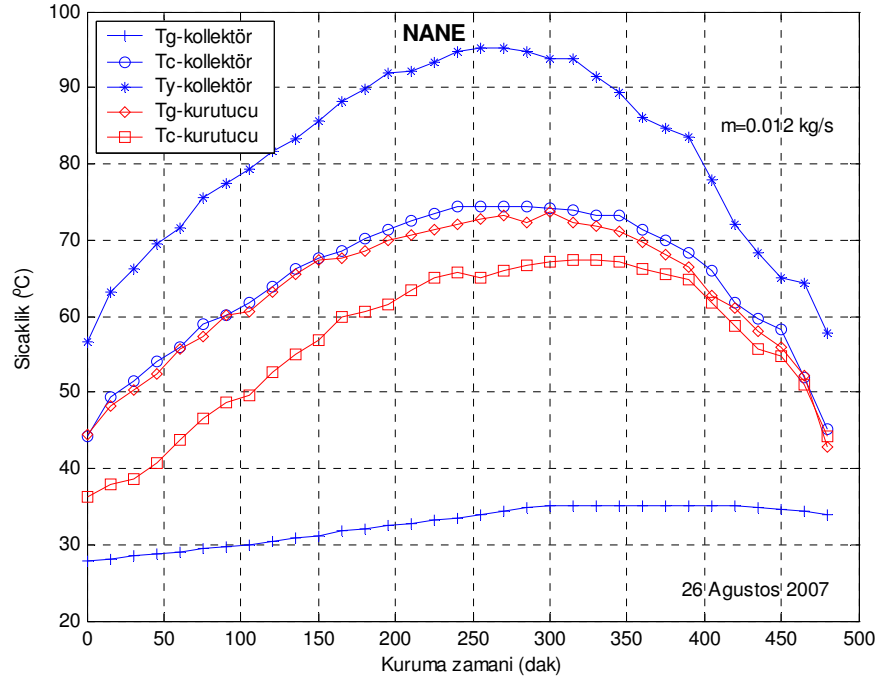
Kollektör çıkış ve kurutucu giriş sıcaklıkları birbirlerine çok yakın değerlerde olsalar da aralarında fark vardır. Kollektör çıkışından ve kurutucu girişine kadar izolasyon yapılmış olsa da ısı kayıpları meydana gelmektedir. Kollektör giriş sıcaklığı çevre sıcaklığına yaklaşık eşit olmaktadır. 24 Ağustos 2007 tarihinde, $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için yapılan nane deney gününde çevre sıcaklığı 27-34 °C arasında değişmektedir. Kurutucu giriş ve sıcaklık farkı sabah saatlerinde fazla olmakta ürün denge değerlerine yaklaştıkça kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı da azalmaktadır.



Şekil 4.28 Nane kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.033 \text{ kg/s}$)

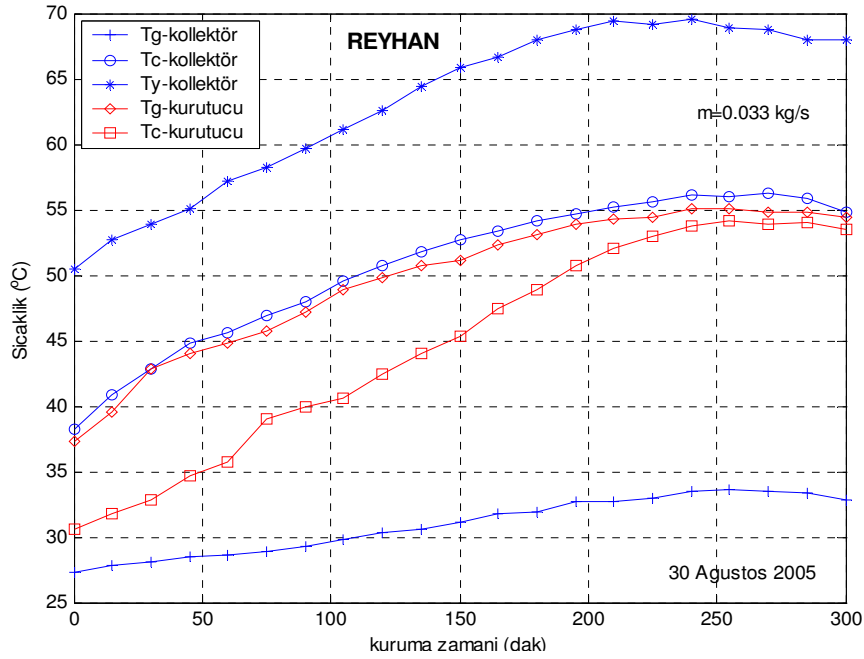


Şekil 4.29 Nane kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.026 \text{ kg/s}$)

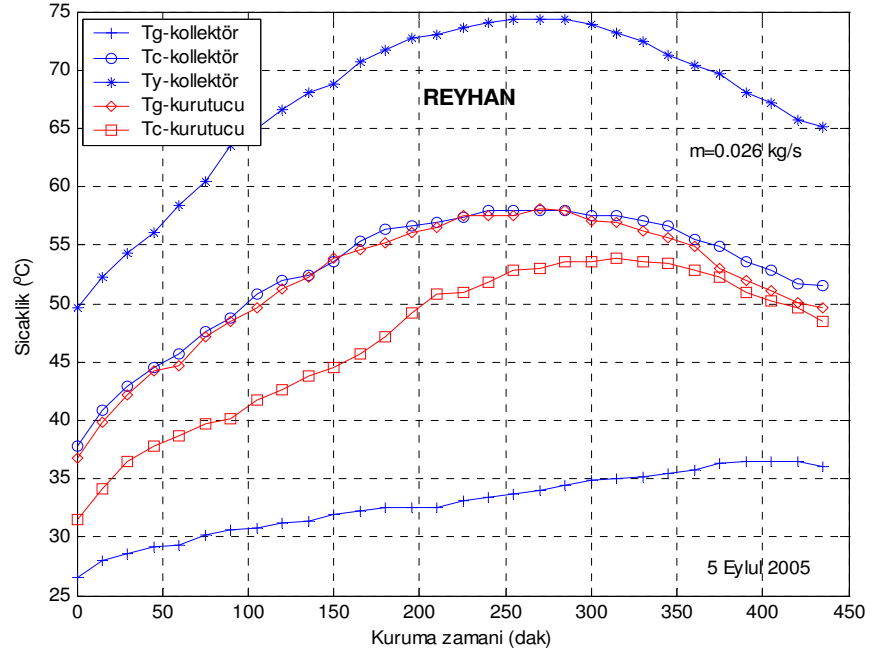


Şekil 4.30 Nane kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.012 \text{ kg/s}$)

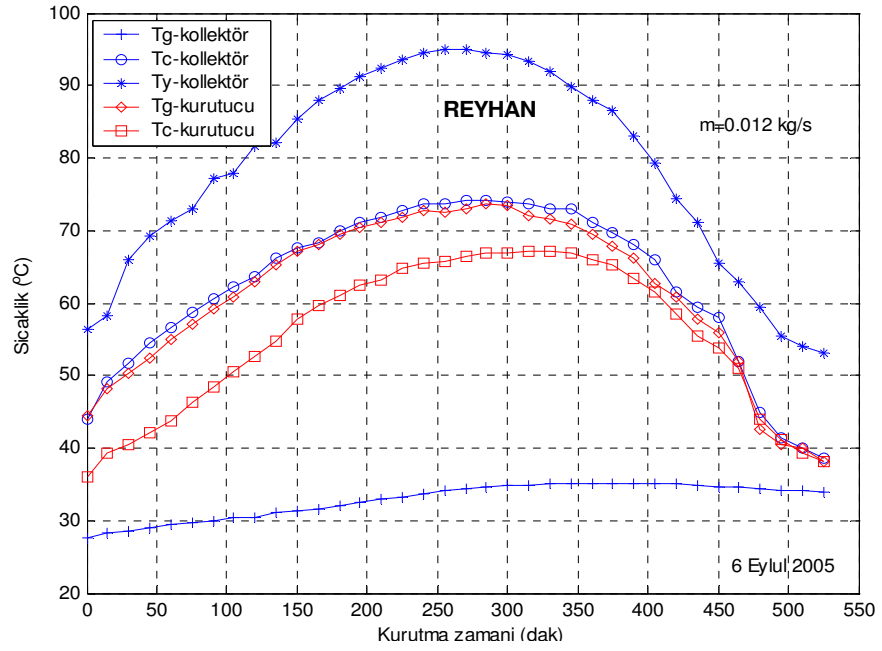
Şekil 4.29 ve 4.30 sırasıyla $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için sıcaklık değerlerinin kuruma zamanına göre değişimini vermektedir. Şekil 4.10'da kurutma deney günlerine ait ısıtım değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi kurutma deney günlerine ait ısıtım yaklaşık eşit değerde olmasına rağmen kollektör ve kurutucu sıcaklık değerleri havanın kütleli debisine bağlı olarak önemli farklılık göstermektedir. $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için kollektör yüzey sıcaklığı minimum 43°C , maksimum 74°C olmaktadır. Kollektör giriş sıcaklığı bütün kütleli debiler için yaklaşık aynı değerlerdedir. Ancak, havanın kütleli debisi azaldıkça kollektör yüzey sıcaklığı artmakta ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ 'de yaklaşık 94°C olmaktadır. Kurutucu giriş-giriş sıcaklık farkı ile nane nem oranı için bahsedilen ilişki bütün kütleli debiler için geçerlidir. Yani, ürün nem içeriği denge nemine yaklaştıkça kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı azalmaktadır. Ayrıca, havanın kütleli debisi azaldıkça kurutucu giriş ve kollektör çıkış sıcaklık farkı da azalmaktadır.



Şekil 4.31 Reyhan kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.033 \text{ kg/s}$)



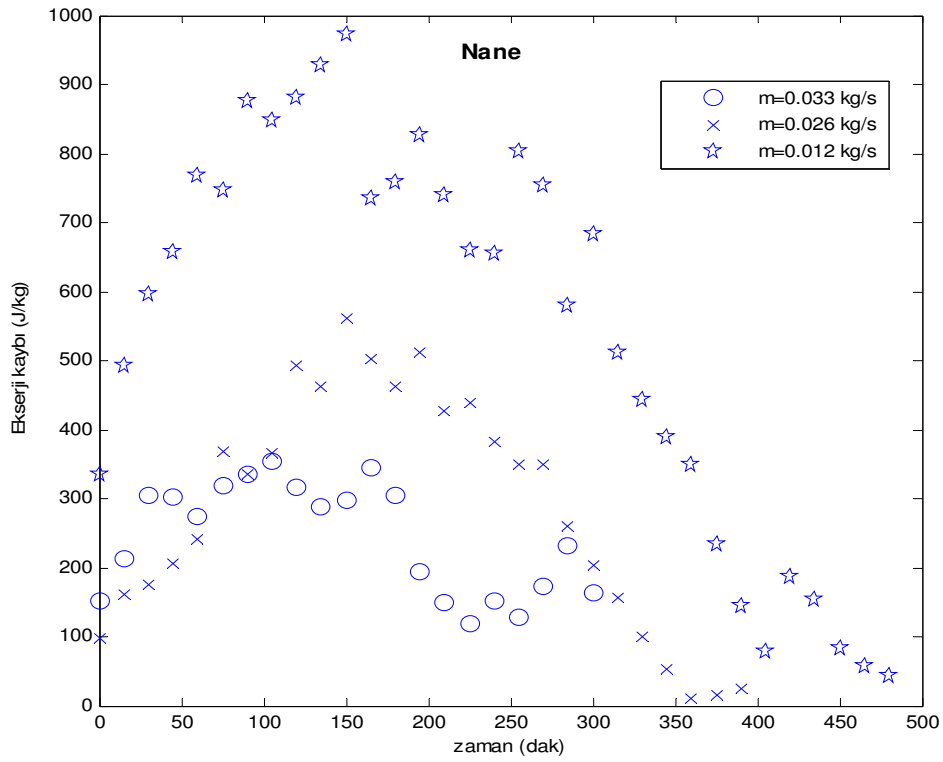
Şekil 4.32 Reyhan kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.026\text{ kg/s}$)



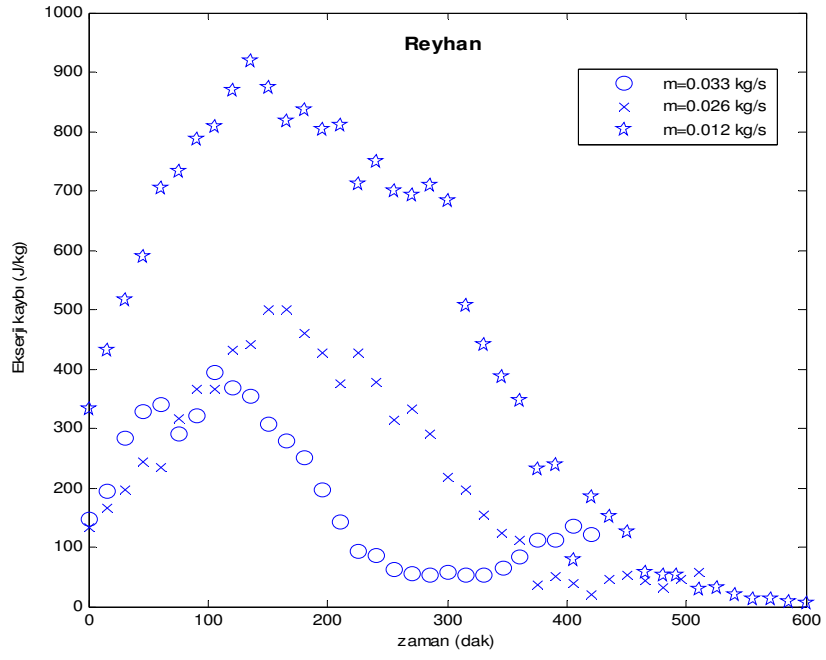
Şekil 4.33 Reyhan kurutulmasında sıcaklıkların zamana göre değişimi ($m=0.012\text{ kg/s}$)

30 Ağustos, 5 ve 6 Eylül, reyhan kurutma için yapılan deney günlerinin karşılaştırmasıdır. Şekil 4.31’de, $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için kollektör ve kurutucu sıcaklık değerlerinin kuruma zamanına göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.32 ve 4.33’de ise sırasıyla $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için sıcaklık değişim değerleri verilmektedir.

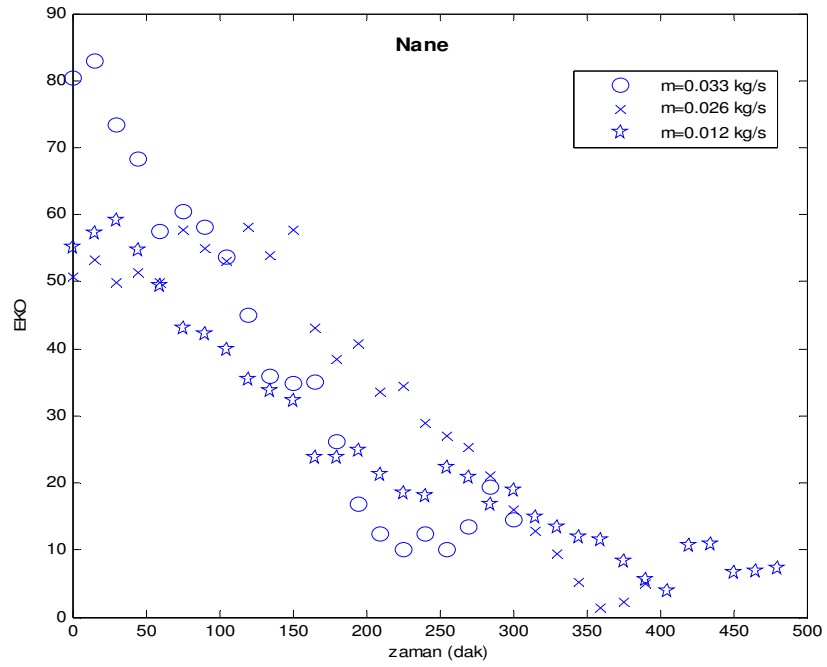
Şekil 4.34 ila 4.37 arasında nane ve reyhan için ekserji analizinin grafikleri verilmektedir.



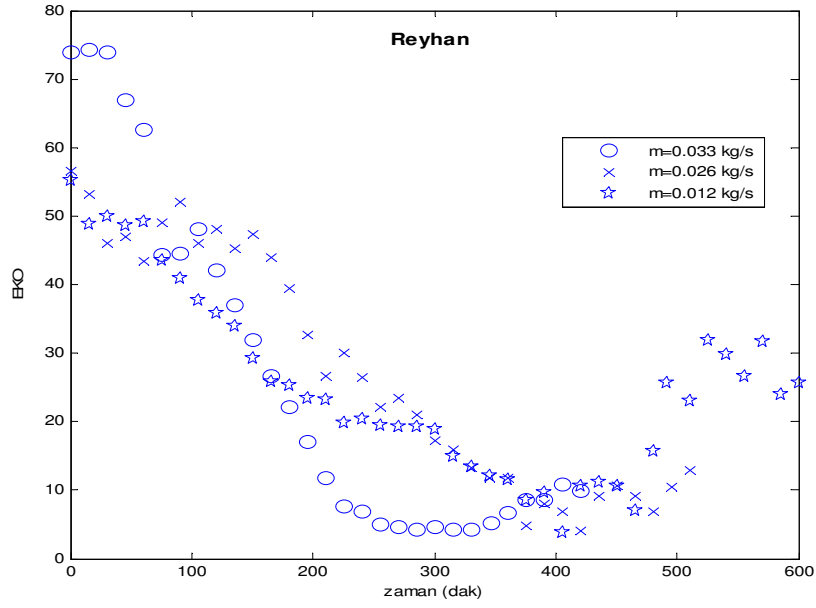
Şekil 4.34 Nane için ekserji kaybının kuruma zamanıyla değişimi



Şekil 4.35 Reyhan için ekserji kaybının kuruma zamanıyla değişimi



Şekil 4.36 Nane için EKO'nun kuruma zamanıyla değişimi



Şekil 4.37 Reyhan için EKO'nun kuruma zamanıyla değişimi

4. 3. Kurutma Parametreleri İçin Matematiksel Modelleme ve İstatistiksel Analiz

Çoklu regresyonun genel amacı, bir bağımlı ve birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmektir. Bu matematiksel ifade istenen eşitliğin fonksiyonel ifadesiyle doğrudan ilişkilidir. Yani, çoklu regresyon ile üretilecek eşitlikte, bağımlı parametrenin değişimi matematiksel olarak;

- $f_{(x)} = a_1 \cdot X^{a_2}$ Üssel
- $f_{(x)} = a_1 + a_2 \cdot X$ lineer
- $f_{(x)} = a_1 \cdot \exp\left(\frac{a_2}{X}\right)$ Arhenius
- $f_{(x)} = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot X)$ Exponansiyel
- $f_{(x)} = a_1 + a_2 \ln(X)$ Logaritmik

şeklinde ifade edilebilir.

Burada, örnek olarak üssel olarak fonksiyon göz önüne alınırsa;

$$\log(f(x)) = \log(a_1) + a_2 \cdot \log(X_1) + \dots a_n \cdot \log(X_n) \quad (4.21)$$

olarak elde edilir. Bilinmeyenlerin elde edilebilmesi için denklem vektörleri ve matris katsayıları oluşturulursa;

$$Y_i = a_1 + a_2 X_{i,1} + \dots a_n X_{i,n} \quad (4.22)$$

eşitliği yazılır. Burada X_1 ve X_2 bağımsız değişkenlerin değeridir. Matris çözümlemesinde (a) katsayıları elde edilerek çoklu regresyon uygulanmış olur. Ancak burada elde edilen a_1 katsayısı $\log(a_1)$ 'i temsil etmektedir.

Burada elde edilen eşitliğin matematiksel karşılığı ile deneysel sonuçların birbirini karşılama oranı bağıntı katsayısı (R) ile temsil edilir.

$$R = \left(1 - \frac{\sigma_{(y,x)}^2}{\sigma_y^2} \right)^{1/2} \quad (4.23)$$

burada, σ_y ; y 'nin standart olarak türetilmesinden elde edilir;

$$\sigma_y = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2}{n-1} \right)^{1/2} \quad (4.24)$$

$$\sigma_{(y,x)} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,c})^2}{n-2} \right)^{1/2} \quad (4.25)$$

olarak elde edilir. Burada n ; deney sayısını, y_i ; y 'nin gerçek değerini ve $y_{i,c}$ bağıntıdan elde edilen değeri temsil etmektedir.

Kurutma işlemi için literatürde nem oranı (MR) modelleri geliştirilerek verilmektedir. Çoklu regresyon ile elde edilen denklemler için khi-kare (χ^2), yeterlilik parametresi (EF) ve tahmini standart hata (RMSE) değerleri elde edilir.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{d,i} - MR_{t,i})^2}{n - nk} \quad (4.26)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{d,i} - MR_{d,m})^2 - \sum_{i=1}^n (MR_{t,i} - MR_{t,m})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{d,i} - MR_{d,m})} \quad (4.27)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{t,i} - MR_{d,i})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (4.28)$$

burada, alt indis d ; deneysel, t ; teorik, m ; ortalama değerleri temsil etmektedir. n ; deney sayısını, nk ; modelin içerdiği katsayısı sayısını temsil etmektedir.

4. 4. Nem Oranı (MR) için Regresyon Analizi

Kurutma işlemi için bir çok deneysel bağıntı geliştirilmiştir. Daha sonra yapılan bütün kurutma işlemleri için elde edilen nem oranı değişim bu bağıntılara göre karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılırken bağıntı katsayısının (R) yüksek olması, χ^2 ve $RMSE$ değerlerinin düşük olması istenir. Bu çalışmada, reyhan ve nane için elde edilen nem oranı değerleri literatürde verilen bu bağıntılara göre karşılaştırılmıştır.

Tarımsal ürünlerin çeşitliliği düşünülürse ve her ürünün fiziksel özellikleri ile boyutlarının farklı olduğu göz önüne alınırsa, kurutma işleminde her bir ürünün kütlesi değişimini farklı olacağı açıkça görülür. Kurutma işlemindeki bu kütlesi değişimi ürünün fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişeceği gibi kurutma ortamı ve kurutucu akışkanın özelliklerine bağlı olarak da değişir. Örneğin, kurutma işleminde ürünündeki nem miktarının düşürülmesi amaçlanır. Ancak, bu işlem sonucunda ürünün hijyen olması ve tat ve besin değerinin değişmemesi istenir.

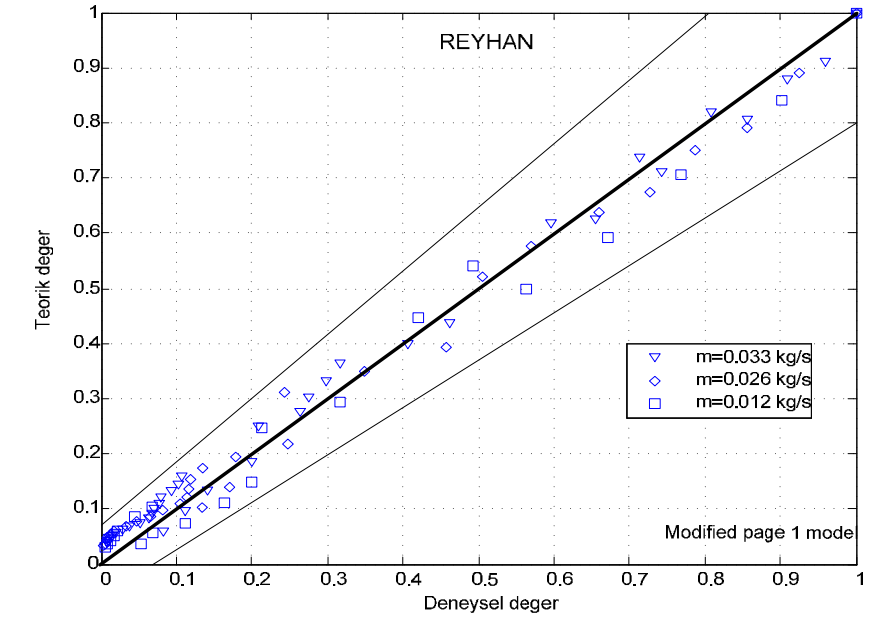
Bu durumda kurutucu akışkanın şartlandırma odasına giriş sıcaklığı önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Kurutucu akışkan sıcaklığının düşük olması kurutma süresini uzatarak, kurutma maliyetini artırmaktadır. Buna karşın, kurutucu akışkan sıcaklığı arttığında kurutma işlemi başlangıcında, ürünün şeklinde deformasyonlar meydana gelmekte ve renk değişimine neden olmaktadır. Bu durum kurutma işleminde istenmeyen bir durumdur.

Bu çalışmada, nane ve reyhan için güneş enerjisi ile kurutma parametreleri incelenmiştir. Elde edilen veriler, literatürde verilen ve sıkça kullanılan model bağıntılar üzerinde uygulanarak nane ve reyhan için uygun model belirlenmiştir. Bununla birlikte, literatürde yaygın bir şekilde kullanılan bazı bağıntıların yapaksı ürünlerin kurutulması için uygun modeller olmadığı tespit edilmiştir. Elde edilen verilere dayanarak Fick diffusion Model, Two Term Model ve Midilli Model'in yapraksı ürünlerin kurutulması için uygun bağıntılar olmadığı belirlenmiştir. Yapılan regrasyon analizinde, bu üç modelin korelasyon katsayısı vermediği görülmüştür. Bu nedenle bu modeller için katsayı tablosu ve deneysel-teorik grafikleri verilmemiştir.

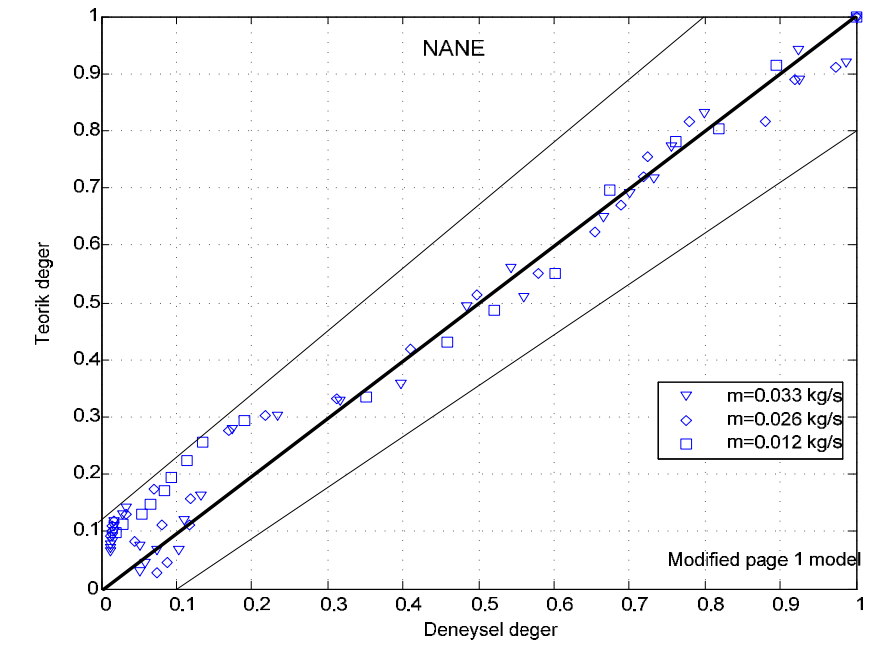
Nane ve reyhan kurutmada nem oranı değişimi açık bir şekilde logaritmik olmaktadır. Buna bağlı olarak tek katsayılı logaritmik ve ikinci dereceden parabolik eşitlikler nane ve reyhan kurutulması için daha uygun model olarak elde edilmektedir. Kurutma işlemleri için uygun model geliştirilirken yalnızca korelasyon katsayısı yada yalnızca χ^2 ve *RMSE* dikkate alınmaz. Bu parametreler bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Nane ve reyhan kurutma için elde edilen veriler bu model bağıntılar üzerinde değerlendirildiğinde, ikinci derece parabol eşitliği içeren Wang and Singh Model en uygun model olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.1 Modified Page 1 Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp\left[-(kt)^n\right]$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
k	0.005	0.007	0.009	0.003	0.004	0.007
n	1.399	1.365	1.418	1.703	1.554	1.113
RMSE	2.7E-5	3.9E-5	7.7E-5	1.3E-5	7.8E-5	1.7E-5
ki	3.6E-8	3.8E-8	4.3E-8	7.8E-7	4.5E-8	9.3E-7
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.997	0.997	0.998	0.992	0.998	0.993



Şekil 4.38 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi
(Modified Page 1 Model)



Şekil 4.39 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi
(Modified Page 1 Model)

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = 1 + at + bt^2 \quad (4.29)$$

Wang and Singh Model'inin dışında, bütün bağımlı parametreler göz önüne alındığında Page Model, nane ve reyhan için son derece uygun olduğu görülmektedir. Şekil 4.38 ve 4.39'de Modified Page 1 Model için elde edilen nane ve reyhan deneysel teorik değerlerinin karşılaştırılması verilmektedir. Görüldüğü gibi deneysel ve torik değerler ± 20 sınırında birbirini karşılamaktadır. Tablo 4.1'de Modified Page 1 Model için bütün bağımlı parametrelerin değerleri verilmektedir. χ^2 ve $RMSE$, 10^{-8} ve 10^{-5} mertebelerinde olmaktadır. Bu oran kabul edilebilir bir değerdir. Modified Page 1 Model için;

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp\left[-(kt)^n\right] \quad (4.30)$$

bağıntısı önerilmektedir. Burada, korelasyon katsayısı $0.992 \leq R \leq 0.997$ arasında değişmektedir. korelasyon katsayısının %99 oranında bir değerle deneysel verileri karşılaması deneysel çalışmalar ile türetilen bağıntıların son derece uyumlu olduğunu göstermektedir ve istenen bir değerdir. Nane ve reyhan'ın kurutulmasında en uygun modellerden birisi Newton modelidir.

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp(-kt) \quad (4.31)$$

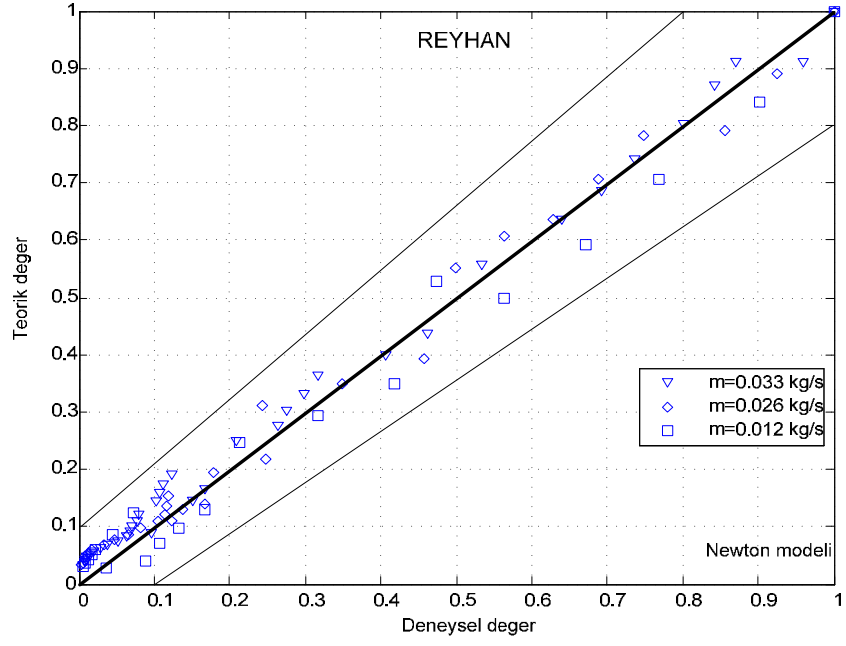
yukarıda da bahsedildiği gibi nane ve reyhan için en uygun bağıntı ikinci dereceden parabol ve tek katsayılı logaritmik şeklinde olanlardır. Newton modeli bunlardan birisidir. Bu modelde, korelasyon katsayısı $0.972 \leq R \leq 0.993$ arasında değişmektedir (Tablo 4.2). Şekil 4.40 ve 4.41'de görüldüğü gibi nane ve reyhan için teorik ve deneysel değerler ± 20 sınırlarında bir birini karşılamaktadır.

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp(-kt^n) \quad (4.32)$$

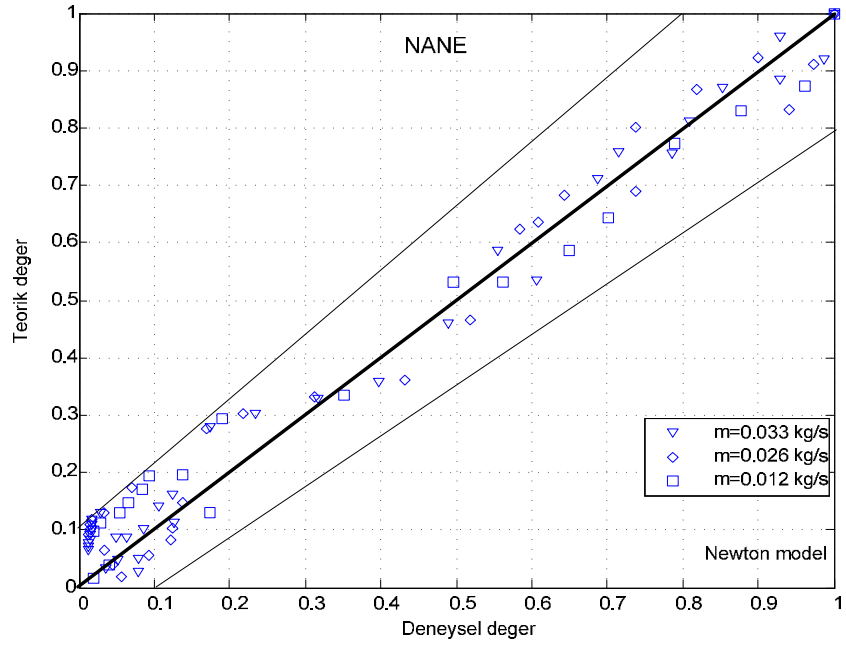
eşitliğinde verilen Page Model en uygun eşitliklerden birisidir. $0.989 \leq R \leq 0.999$ arasında değişen korelasyon katsayısına bağlı olarak ± 10 gibi iyi bir oranda teorik ve deneysel veriler sağlanmaktadır. Şekil 4.42'de reyhan ve 4.43'te nane için bu değişim açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 4.2 Newton Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp(-kt)$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
k	0.005	0.007	0.009	0.003	0.005	0.007
RMSE	2.1E-5	1.9E-5	1.8E-5	5.3E-5	1.8E-5	1.1E-5
ki	2.2E-8	1.5E-8	1.3E-8	1.8E-8	1.5E-8	1.1E-8
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.980	0.989	0.988	0.972	0.981	0.993



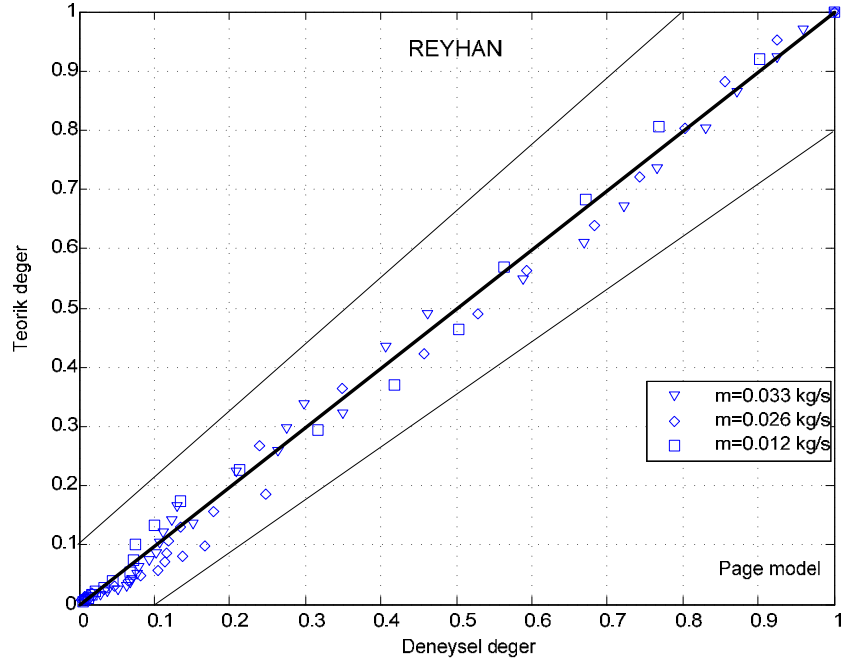
Şekil 4.40 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Newton Model)



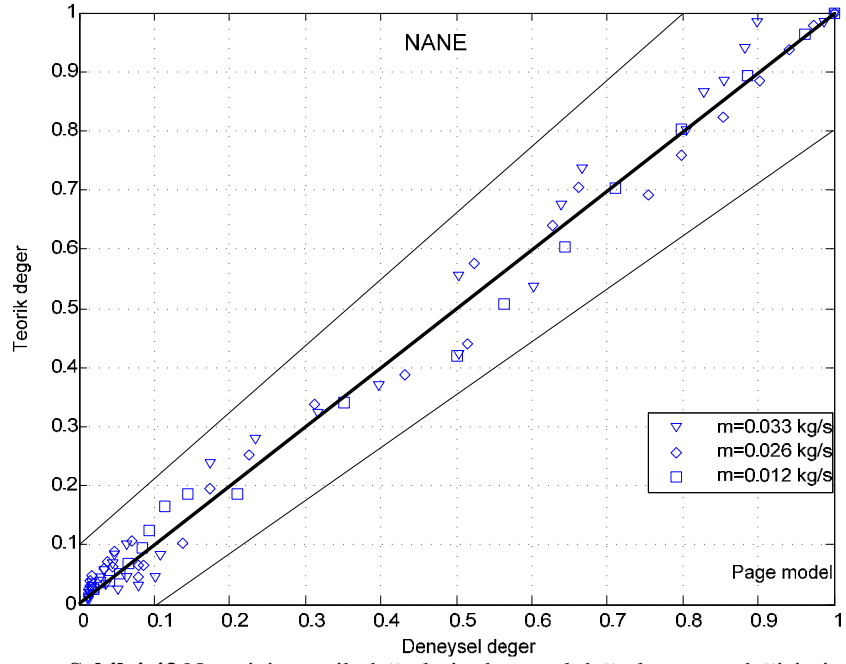
Şekil 4.41 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Newton Model)

Tablo 4.3 Page Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp(-kt^n)$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
k	0.0008	0.001	0.001	0.0002	0.0003	0.004
n	1.361	1.349	1.399	1.441	1.486	1.119
RMSE	2.2E-6	4.1E-6	1.7E-6	2.3E-6	1.8E-6	8.8E-5
ki	2.6E-8	3.3E-8	3.9E-8	1.9E-8	6.6E-8	1.3E-8
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.991	0.991	0.999	0.989	0.998	0.992



Şekil 4.42 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Page Model)



Şekil 4.43 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Newton Model)

Nane ve reyhan kurutma için en uygun modellerden birisinin Page Model olduğu söylenmişti. Ancak, Page Model'ler içerisinde Modified Page II Model bu durumun dışında tutulmalıdır.

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = a.exp\left(-c(t/L^2)^n\right) \quad (4.33)$$

görüldüğü gibi Modified Page II Model ürünün kalınlığını (L) içermektedir. Yapraksı ürünlerin kurutulması ve modellenmesinde ürün boyutlarını içeren eşitlikler kuruma parametrelerini sağlamamaktadır. Ancak, Modified Page II Model $0.566 \leq R \leq 0.903$ gibi kötü bir değerde korelasyon katsayısı sağlamaktadır. Bundan dolayı hem nane hem de reyhan için teorik ve deneysel veriler birbirini ± 60 sınırlarında karşılamaktadır (Şekil 4.48 ve 4.49). χ^2 ve $RMSE$, 10^{-2} mertebelerinde olmaktadır (Tablo 4.4). Handerson and Papis Model ve Diffusion Model bir çok ürün için uygun bir bağıntıdır. Tablo 4.5 ve 4.6'da verilen bağımlı parametreler göz önüne alınırsa her iki bağıntının da nane ve reyhan için uygun olduğu görülecektir.

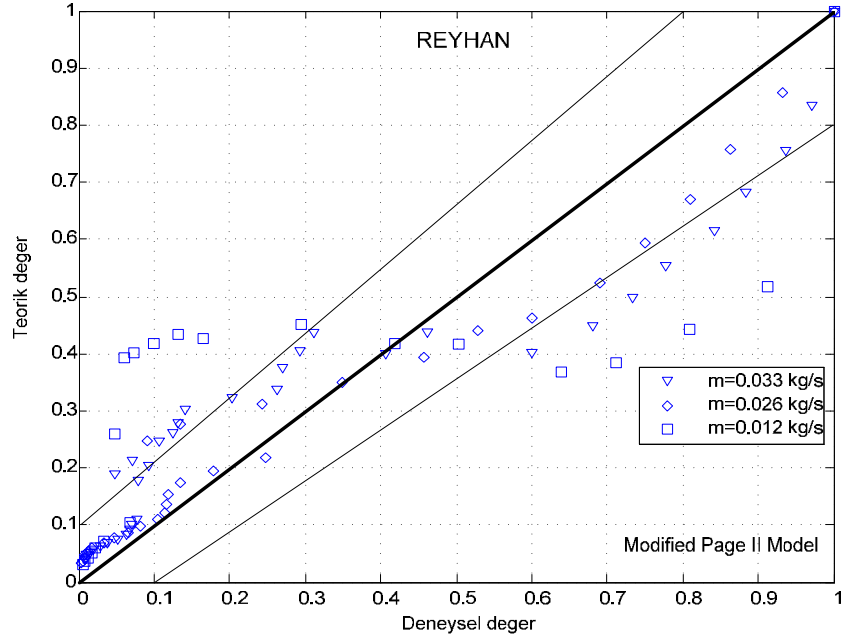
$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = a.exp(-kt) \quad (4.34)$$

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = a.exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt) \quad (4.35)$$

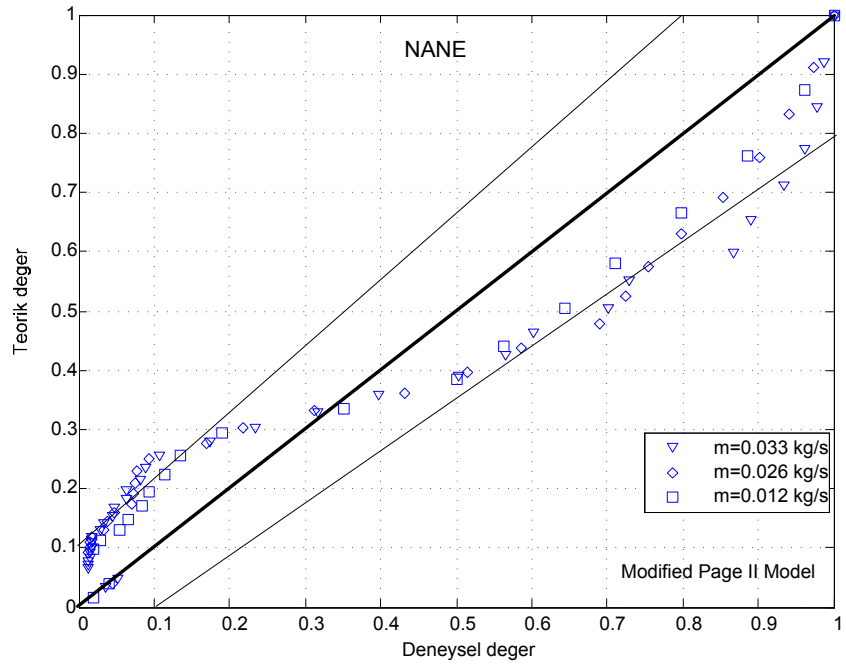
Henderson and Papis Model (4.34) ile elde edilen hem nane için hem de reyhan için teorik ve deneysel sonuçların değişimi Şekil 4.50 ve 4.51 verilmektedir. Diffusion Model (4.35) için elde edilenler ise Şekil 4.48 ve 49'da görülmektedir.

Tablo 4.4 Modified Page II Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = a \cdot \exp\left(-c(t/L^2)^n\right)$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
a	1.349	1.312	1.338	0.333	1.519	1.256
c	0.0002	0.0003	0.0003	-0.61	0.0004	0.0003
n	0.434	0.407	0.431	0.0004	0.394	0.411
RMSE	2.7E-2	3.9E-2	4.2E-2	8.3E-1	2.7E-2	1.7E-3
ki	5.4E-3	5.8E-3	5.3E-3	4.8E-2	4.4E-2	8.3E-3
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.851	0.888	0.876	0.566	0.861	0.903



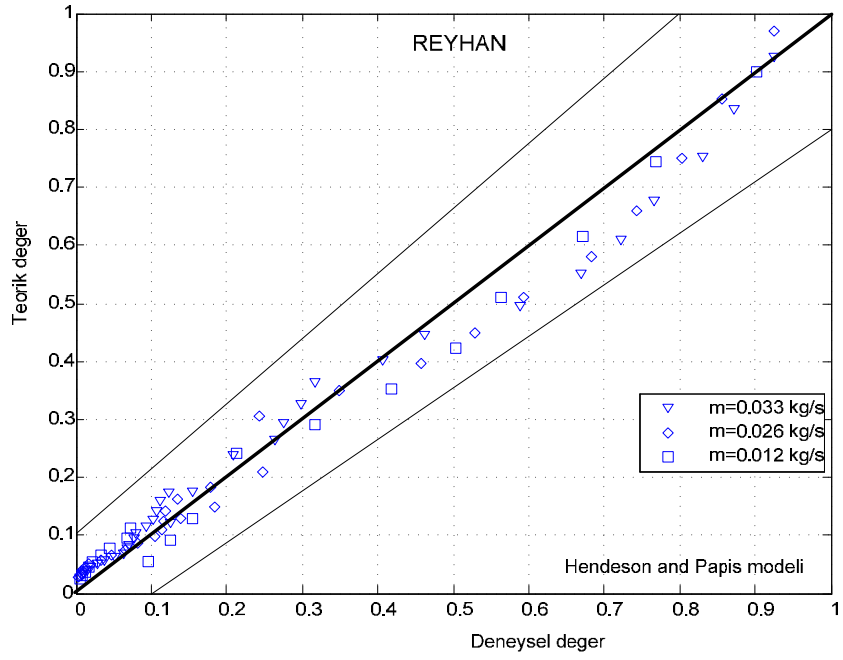
Şekil 4.44 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Modified Page II Model)



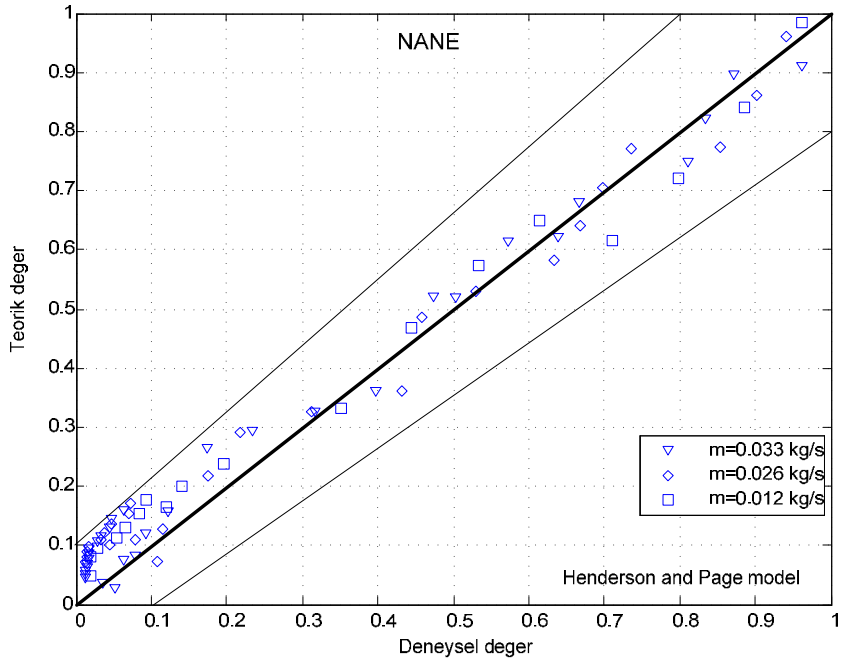
Şekil 4.45 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Modified Page II Model)

Tablo 4.5 Henderson and Papis Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = a.exp(-kt)$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
a	1.121	1.110	1.101	1.321	1.118	1.082
k	0.006	0.007	0.011	0.005	0.006	0.007
RMSE	8.2E-4	2.1E-5	2.6E-5	2.6E-5	1.9E-5	1.9E-6
ki	4.6E-7	3.3E-7	8.5E-7	1.2E-8	3.3E-8	2.2E-8
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.989	0.982	0.989	0.987	0.981	0.996



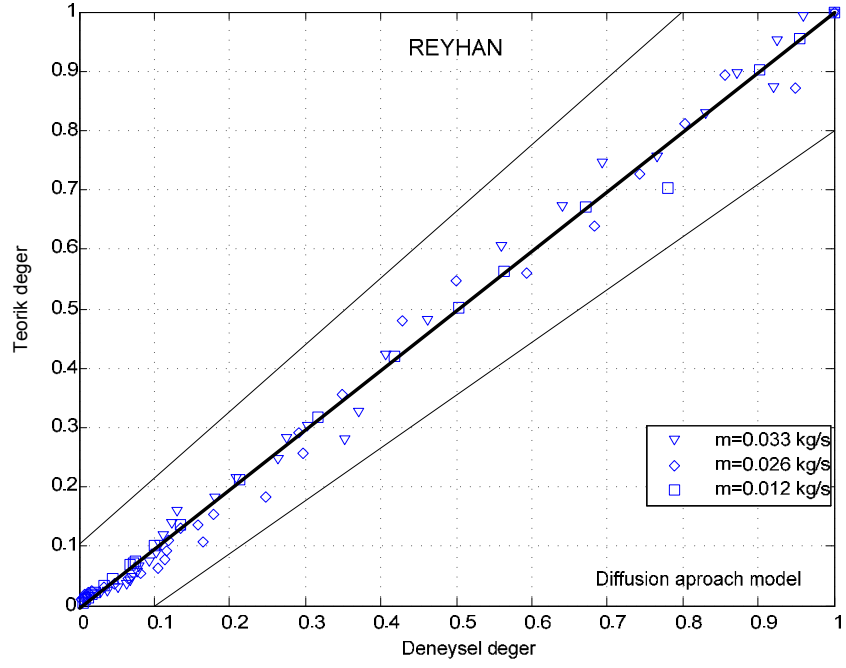
Şekil 4.46 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Henderson and Papis Model)



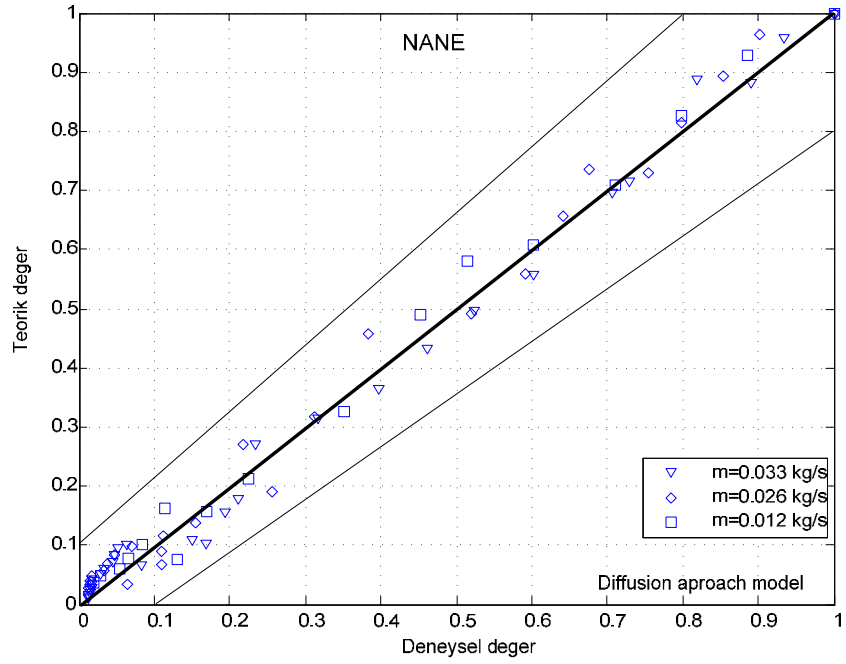
Şekil 4.47 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Henderson and Papis Model)

Tablo 4.6 Diffusion Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
a	-119.2	-133.1	-273.8	-201.9	-192.1	-97.3
k	0.01	0.012	0.019	0.007	0.011	0.013
b	0.991	0.980	0.991	0.990	0.996	0.991
RMSE	2.2E-6	4.1E-6	1.7E-6	2.3E-6	1.8E-6	8.8E-5
ki	2.6E-8	3.3E-8	3.9E-8	1.9E-8	6.6E-8	1.3E-8
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.997	0.998	0.998	0.988	0.994	0.997



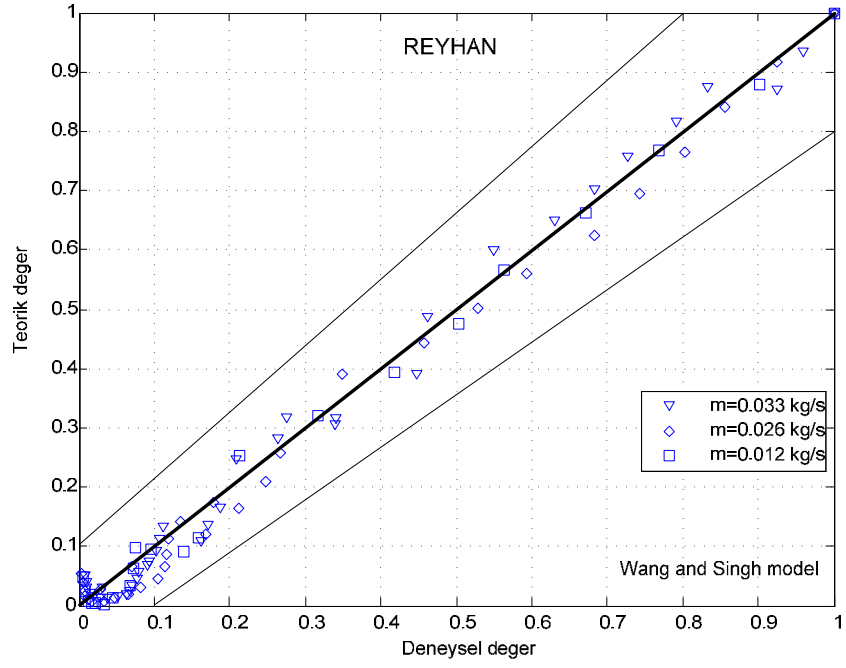
Şekil 4.48 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Diffusion Model)



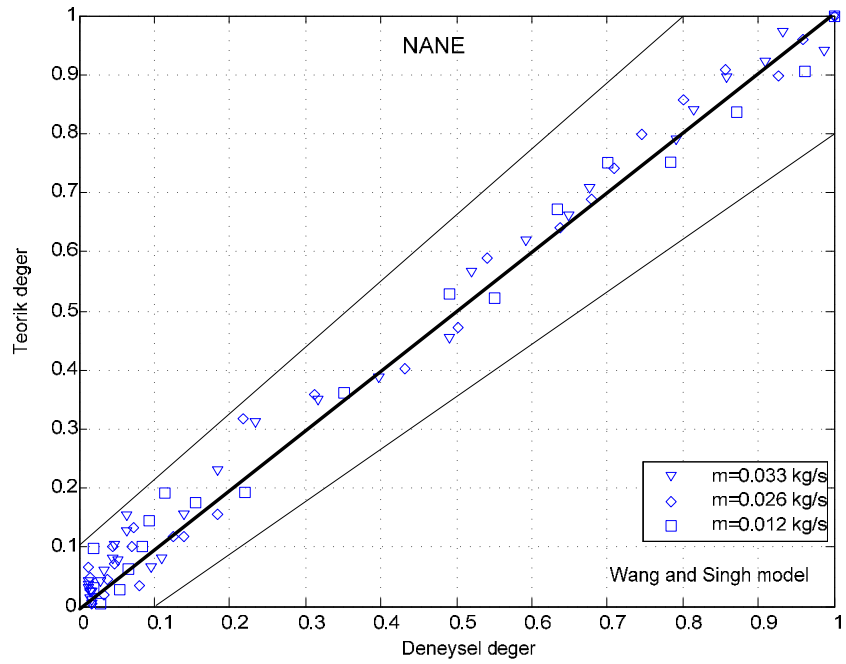
Şekil 4.49 Nane için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Diffusion Model)

Tablo 4.7 Wang and Singh Model için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = 1 + at + bt^2$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
a	-0.004	-0.005	-0.006	-0.002	-0.003	-0.005
b	0.000004	0.000007	0.00001	0.000001	0.00003	0.000007
RMSE	2.2E-6	3.1E-6	2.6E-6	3.5E-6	3.1E-6	4.2E-6
ki	6.8E-9	7.8E-9	7.6E-9	3.9E-8	4.2E-8	4.3E-8
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.999	0.999	0.999	0.993	0.996	0.994



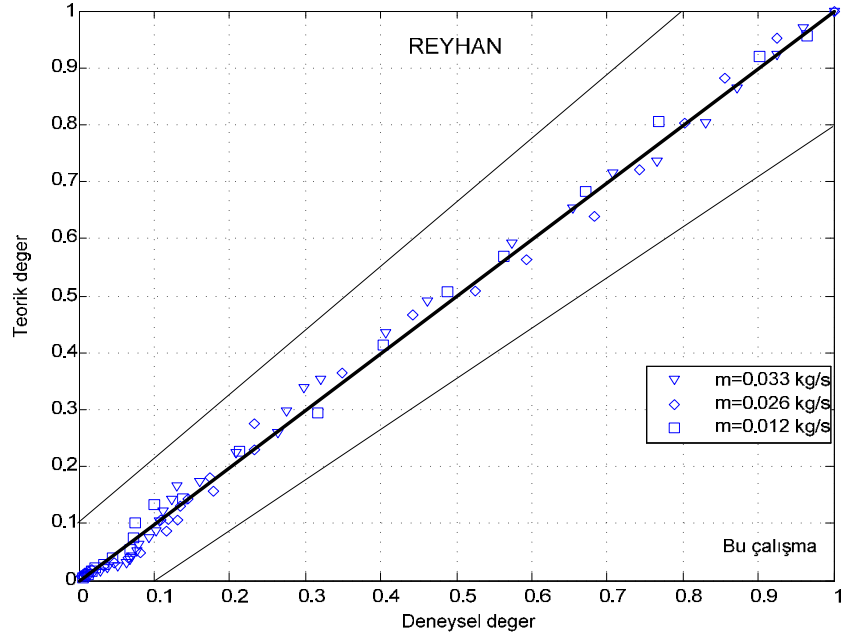
Şekil 4.50 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Wang and Singh Model)



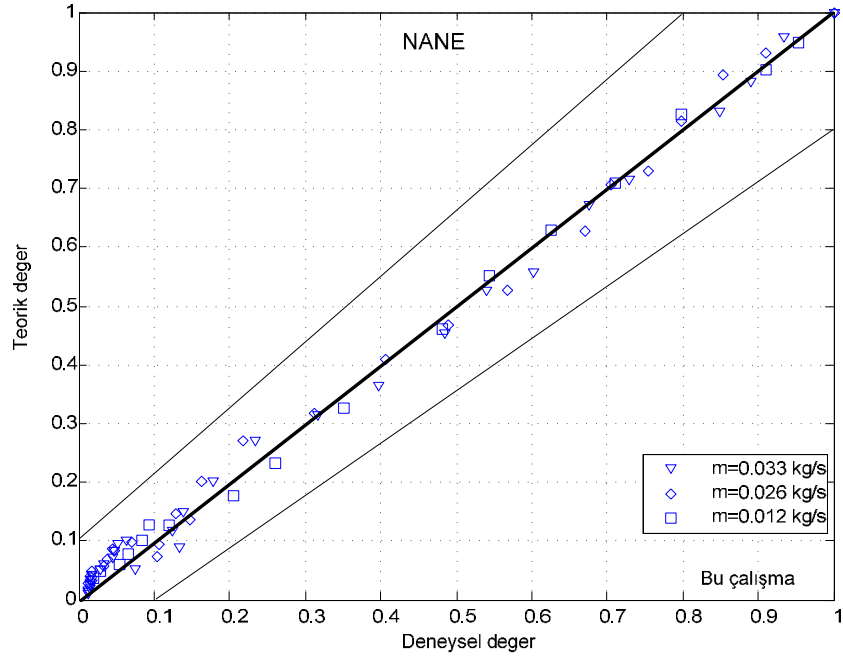
Şekil 4.51 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Wang and Singh Model)

Tablo 4.8 Bu çalışmada tasarlanan bağıntı için bağımlı parametrelerin değerleri

	NANE			REYHAN		
Kurutma havası debisi (Kg/s)	0.012	0.026	0.033	0.012	0.026	0.033
$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp(-k.(t^a) - k.(t^b))$						
Kurutucu giriş-çıkış sıcaklık farkı	12.874	8.056	7.631	13.211	8.613	7.423
k	0.0006	0.0009	0.001	0.0003	0.0004	0.002
a	1.392	1.411	1.441	0.910	1.189	1.092
b	1.068	0.981	0.965	1.387	1.407	1.123
RMSE	7.6E-7	7.6E-7	6.6E-7	1.2E-6	8.81E-7	9.3E-7
ki	1.1E-9	8.2E-8	1.3E-9	8.8E-8	9.5E-8	9.3E-8
EF	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
R	0.996	0.992	0.998	0.991	0.994	0.995



Şekil 4.52 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Bu çalışma)



Şekil 4.53 Reyhan için teorik değerlerin deneysel değerlere göre değişimi (Diffusion Model)

Kurutma işlemlerinin modellenmesi için literatürde mevcut bulunan farklı modellerin dışında yeni bir nem içeriği modeli (MR) geliştirme ihtiyacı duyulmuştur. Geliştirilen bu model bağıntı;

$$MR = \frac{M_{(t)} - M_e}{M_{(ilk)} - M_e} = \exp(-k.(t^a) - k.(t^b)) \quad (4.36)$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu modelin uygulama alanı göz önüne alınırsa, geliştirilen modelin literatürde Wang and Singh Model ve Modified Page I Model'e alternatif bir bağıntı olabileceği görülmüştür. Geliştirilen bu bağıntıya göre korelasyon katsayısı hem reyhan hem nane için bütün kütsel debilerde %99 gibi yüksek bir değerde elde edilmektedir. Wang and Singh Model, geliştirilen modelden nane için daha iyi sonuçlar verse de, reyhan ve nane birlikte göz önüne alınırsa yaklaşık eşit değerlere sahiptir. Ayrıca, elde edilen bağıntı için χ^2 ve $RMSE$ 10^{-9} ve 10^{-7} gibi oldukça küçük mertebelerinde olmaktadır. Şekil 4.52 reyhan için teorik ve deneysel sonuçların değişimini, Şekil 4.53 ise nane için teorik ve deneysel sonuçların değişimini vermektedir. Görüldüğü gibi her iki ürün için teorik ve deneysel değerler ± 5 gibi son derece uygun aralıkta elde edilmektedir.

4.5. Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi

Nane ve reyhan için difüzyon katsayısının belirlenmesinde Arrhenius fonksiyonu tercih edilmiştir. Difüzyon katsayısının belirlenmesinde kurutucu havanın debisi ve kollektör giriş-çıkış sıcaklık farkı kullanılmıştır.

$$DF = a_1 . \dot{m}^{a_2} . \exp\left(\frac{a_3}{\Delta T}\right) \quad (4.37)$$

üç farklı kütsel debi için hem nane hem reyhan için elde edilen difüzyon katsayısı Tablo 4.9'da verilmektedir.

Tablo 4.9 Nane ve reyhan için farklı kütleli debilerde difüzyon katsayısı

Kurutucu Havaşı Debisi (Kg/s)	Nane kurutucuya giriş-çıkış sıcaklı farkı T^o	Denklem (4.37) $R=(0.88)$	Difüzyon katsayısı (DF)		Reyhan kurutucuya giriş-çıkış sıcaklı farkı T^o	Denklem (4.37) $R=(0.82)$	Difüzyon katsayısı (DF)	
			Deneysel	Teorik			Deneysel	Teorik
0.012	12.87	$a_1=0.0000001$	4.9E-12	1.1E-13	13.21	$a_1=0.0000001$	2.2E-13	1.6E-14
0.026	8.05	$a_2=0.119$	3.8E-10	8.2E-10	8.61	$a_2=0.188$	9.8E-11	6.8E-11
0.033	7.63	$a_3=0.093$	1.8E-9	9.2E-9	7.42	$a_3=0.101$	2.3E-11	1.3E-11

Difüzyon katsayıları dikkatle incelendiğinde nane ve reyhanın difüzyon katsayıları bir birine yakın olmasına karşın reyhan için elde edilen difüzyon katsayısı nane'nin difüzyon katsayısından daha fazladır. Bununla birlikte, denklem 4.37'de teorik difüzyon eşitliği ile deneysel difüzyon eşitliği birbirine oldukça yakındır.

4. 6. Enerji ve Ekserji Değerlendirmesi

4. 6. 1. Enerji

Enerji, hareket ve hareket üretme yeteneğidir ve miktar'ın bir ölçüsünü verir. Enerji yok edilemeyeceği gibi yoktan da var edilemez. Bununla birlikte, termodinamiğin I yasasına göre değerlendirilirken ortamın özelliklerinden bağımsız olarak ele alınır. Bu genel tanımlamalar dışında ele alınan yöntemlere bağlı olarak farklı sınırlayıcılarla değerlendirilmelidir. Güneş enerjisi destekli bir kurutma düzeneğinde, güneş kollektörü ve kurutucu için enerji analizi yapılırken doğru sınırlayıcıların belirlenmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada, havalı güneş kollektörleri, Sürekli Akışlı Sürekli Açık Sistem (SASA) olarak ele alınmıştır. Bu durumda, sistemde zamana bağlı değişim göz önüne alınmaz. Ayrıca, güneş kollektörleri ve kurutucuda sabit hacimde akış gerçekleştiği için sınır işi sıfırdır. Bunların dışında, sistemle çevresi arasındaki iş ve ısı alışverişi sabit kabul edilir. Bu durumda termodinamiğin temel ilkelerinden birisi olan kütlenin korunumu eşitliği hava için;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (4.38)$$

nem için

$$\sum (\dot{m}_g \cdot w_g + \dot{m}_{nii}) = \sum \dot{m}_\varphi \cdot w_\varphi \quad (4.39)$$

şeklinde yazılabilir. Termodinamiğin I yasasına göre genel bir kontrol hacim için enerjinin korunumu ilkesi;

$$Q - W + \sum E_g - \sum E_\varphi = \Delta E_{KH} \quad (4.40)$$

olarak verilmektedir. Bu denklem SASA için

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum m_{\phi} \left(h_{\phi} + \frac{V_{\phi}^2}{2} + gz_{\phi} \right) - \sum m_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (4.41)$$

şeklini alır. Sistemdeki kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilirse;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum m_{\phi} h_{\phi} - \sum m_g h_g \quad (4.42)$$

olarak elde edilir. Bölüm 4. 1’de bahsedildiği gibi faydalı enerji;

$$Q_u = \dot{m} \cdot (h_{\phi} - h_g) = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\phi} - T_g) \quad (4.43)$$

eşitliğiyle elde edilir. Burada, şartlandırma odasına giren ve çıkan birim zamandaki enerji miktarı;

$$Q_{u,k} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{kg} - T_o) \quad (4.44)$$

$$Q_{u,\phi} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{k\phi} - T_o) \quad (4.45)$$

olarak verilebilir. Buradan 4.44 ve 4.45 eşitliklerinin farkının, kurutucu tarafından çekilen ısı miktarına eşit olduğu görülmektedir. Ayrıca, kolektör çıkışı ile kurutucu giriş arasında kaybolan ısı miktarı;

$$Q_{ky} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\phi} - T_{kg}) \quad (4.46)$$

eşitliğiyle elde edilir. Literatürde, kolektör kabinet tipi kurutucunun enerji kullanım oranı için;

$$EKO = \frac{Q_g - Q_{\phi}}{Q_g} \quad (4.47)$$

eşitliği verilmektedir (Akbulut 2006).

Tablo 4. 10'da $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için nane kurutmada kollektör ve kurutma odasındaki enerji değerleri verilmektedir. Görüldüğü gibi kollektör faydalı ısısı (Q_u) ışıınım değerlerine bağlı olarak değişmekte ve ışıınım değerlerinin maksimum olduğu öğlen saatlerinde maksimum olmaktadır. tasarlanan kollektör modelinin etkin bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Sabah saatlerinde 326 kJ olan kollektör ısı kazancı öğlen saatlerine doğru artmakta ve 705 kJ'e kadar çıkmaktadır. Kurutucunun faydalı ısısı ($Q_{u,k}$) ise kollektörün aksine sabah saatlerinde fazla olmakta ve zamanla azalmaktadır. Bu durum, kuruma işleminin başlangıcında kuruma hızının yüksek olması ve ürün ile kurutucu hava arasındaki nem farkının fazla olmasına bağlanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise kurutucuya giren enerji miktarı ($Q_{k,g}$) kollektör ısı kazancıyla (Q_u) paralel değişirken kurutucu ısı kazancıyla ($Q_{u,k}$) ters orantılı olarak değişmektedir. Kollektör çıkış enerji miktarı ve kurutucuya giren enerji miktarı arasındaki fark kayıp ısıyı (Q_{ky}) vermektedir. Görüldüğü gibi kayıp ısı miktarı ile kuruma zamanı arasında doğru orantı görülse de bu değişim periyodik değildir. Sıcaklık farkının artması ısı kaybının artmasına neden olacağı açıktır. Ancak, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı ve gölge durumu göz önüne alınırsa bu sapmaların nedenleri görülebilir.

Tablo 4. 11'de $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için nane kurutmada kollektör ve kurutma odasındaki enerji değerleri görülmektedir. Kütlesel debinin azalması doğal olarak ısı kazancını da azaltacaktır. Ancak, bu değerlendirmeyi güneş kollektörü için yapmak çok doğru bir yaklaşım olmayabilir. Çünkü, sisteme verilen ısı (güneş enerjisi) günün zamanına göre değiştiği gibi günlere bağlı olarak da değişmektedir. Böyle bir değerlendirme yapmak için aynı kolektörlerle aynı ışıınım günlerinde deney yapılmalıdır. Yukarıda vurgulandığı gibi değerlendirmeler yapılırken yaklaşık eşit ışıınım değerlerine sahip günlerde yapılan deneysel veriler kullanılmıştır. Bu nedenle kütlesel debinin etkisinin de değerlendirilmesi olumlu katkı sağlayacaktır.

Tablo 4.10 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri

<i>m=0.033 kg/s</i>				
Zaman(dak)	Q_u (kJ)	$Q_{u,k}$ (kJ)	Q_{ky} (kJ)	$Q_{k,g}$ (kJ)
0	326.2286	215.8322	27.6021	298.6265
15	395.7688	263.7949	41.9674	353.8015
30	444.9485	288.3950	8.3742	436.5743
45	470.1537	272.7879	26.9790	443.1747
60	496.0738	230.8205	50.4789	445.5948
75	533.1529	257.7995	59.9534	473.1995
90	579.6477	257.7995	86.9324	492.7153
105	599.4626	251.8042	77.9394	521.5232
120	617.9314	212.8345	91.2757	526.6557
135	617.5036	176.8625	68.9464	548.5572
150	637.6245	176.8625	71.9441	565.6804
165	653.5238	191.8508	44.9650	608.5588
180	682.9132	152.8811	33.2705	649.6427
195	680.8638	95.9254	50.9604	629.9034
210	688.0761	71.9441	47.9627	640.1134
225	675.5285	56.9557	41.9674	633.5612
240	694.1028	71.9441	47.3408	646.7619
255	705.8264	59.1815	50.8434	654.9830
270	693.8633	80.7513	29.9079	663.9554
285	661.2041	113.6500	9.2119	651.9922
300	643.0199	81.5026	17.1935	625.8264

Tablo 4.11 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri

<i>m=0.026 kg/s</i>				
Zaman(dak)	Q_u (kJ)	Q_{u,k} (kJ)	Q_{ky} (kJ)	Q_{k,g} (kJ)
0	260.9186	99.1851	43.9145	217.0041
15	301.6166	131.9573	25.9202	275.6965
30	344.0315	131.9573	49.4840	294.5475
45	367.5953	146.0956	51.8404	315.7549
60	379.1894	155.5211	32.8016	346.3879
75	417.0793	212.0742	9.4255	407.6537
90	433.5739	195.5795	37.7021	395.8718
105	480.7015	200.2923	61.2659	419.4356
120	498.6629	247.4199	25.0305	473.6324
135	490.1270	228.5689	18.8510	471.2760
150	501.9089	263.9146	7.0691	508.9781
165	551.3929	207.3614	16.4947	534.8983
180	563.8557	186.1540	26.6010	537.2546
195	560.8184	202.6487	7.0691	553.7493
210	565.5312	164.9466	18.8510	546.6802
225	565.5312	169.6594	16.4947	549.0365
240	573.4619	143.7392	22.0690	551.3929
255	566.3928	131.9573	22.0690	544.3238
270	559.3236	127.2445	1.4948	560.8184
285	549.8981	98.9680	26.7817	523.1164
300	539.6110	75.4042	16.4947	523.1164
315	539.6110	58.9095	28.2766	511.3345
330	511.3345	40.0585	40.0585	471.2760
345	507.4964	21.2074	52.7150	454.7813
360	435.9303	4.7128	30.6329	405.2974
375	398.2282	7.0691	37.7021	360.5261
390	376.5043	14.1188	60.7688	315.7355

Tablo 4.12 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için Nane kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri

<i>m=0.012 kg/s</i>				
Zaman(dak)	Q_u (kJ)	Q_{u,k} (kJ)	Q_{ky} (kJ)	Q_{k,g} (kJ)
0	177.8983	90.2675	6.7243	181.6225
15	229.9102	112.8452	10.8756	219.0346
30	249.5950	127.2445	10.8756	238.7194
45	275.8052	127.2445	17.4010	258.4043
60	292.2106	129.4196	1.8321	290.3785
75	319.5251	117.3825	17.4010	302.1242
90	329.9657	126.1570	6.0876	331.0533
105	345.3003	119.6316	11.9632	333.3371
120	364.2831	114.1938	6.4759	357.8072
135	384.6700	114.1938	8.7005	375.9695
150	397.2857	114.1938	4.3502	392.9354
165	400.1133	83.7421	10.8756	389.2377
180	415.6009	84.8297	18.6415	396.9594
195	420.5595	91.3550	14.1383	406.4212
210	432.0876	79.3919	19.5761	412.5115
225	438.2867	69.6038	22.8388	415.4479
240	445.5645	68.5163	26.8539	418.7106
255	440.7793	84.8297	18.1535	422.6258
270	435.4502	79.3919	12.7157	422.7346
285	430.7737	61.9909	23.5913	407.1825
300	426.3235	71.7790	5.4378	420.8857
315	424.1484	54.3780	18.4885	405.6599
330	414.4046	47.8526	16.4664	397.9382
345	414.9483	42.4148	24.0793	390.8691
360	394.2405	39.1522	17.4010	376.8395
375	379.0147	27.1890	21.7512	357.2635
390	359.8736	17.4010	19.5761	340.2975
405	337.9432	10.5477	35.9295	302.0137
420	290.3785	27.1890	6.5254	283.8532
435	270.0411	25.0139	17.4010	252.6402
450	255.9029	14.1383	23.9263	231.9765
465	190.6493	11.9632	2.1751	192.8244
480	121.4362	15.0884	24.5060	96.9303

Görüldüğü gibi $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ 'de $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ 'ye düştüğünde kollektör ısı kazancıda azalmaktadır. Yaklaşık aynı ısınım değerleri için maksimum ısı kazancında (Q_u) yaklaşık 100 kJ'lük bir enerji düşmesi olmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için 300 dakika sonunda yaklaşık 640 kJ olan kollektör ısı kazancı $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için aynı zaman aralığında yaklaşık 540 kJ olmaktadır. Kurutucu ısı kazancı ($Q_{u,k}$), $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 60 kJ ile 260 kJ arasında değişirken $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için 10 kJ ile 240 kJ arasında değişmektedir. Bu değerlere bağlı olarak kollektör çıkışı ile kurutucu girişinde ısı kaybı da azalmaktadır.

$\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için enerji verileri incelenirse, kollektör ısı kazancı kütleli debiye bağlı olarak azaldığı görülecektir. Maksimum ısı kazancı (Q_u) $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 705 kJ, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 570 kJ ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 445 kJ olduğu görülmektedir. Bu değerlendirme yapılırken Şekil 4.10'da verilmiş olan ısınım değerlerinin son derece bir birine yakın değerlerde olduğu da göz önüne alınmalıdır. Bunlara bağlı olarak kurutma odası ısı kazancı 122 kJ ile 11 kJ arasında değişmektedir. Diğer kütleli debilerde olduğu gibi $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için de kurutma zamanına bağlı olarak kurutma odası ısı kazancı ($Q_{u,k}$) azalmaktadır. Tablo 4.12'de görüldüğü gibi kollektör ısı kazancına bağlı olarak kollektör çıkışıyla kurutma odası girişi arasında ısı kaybı (Q_{ky}) azalmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için 61 kJ, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için 51 kJ olan maksimum enerji kaybı $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için maksimum 35 kJ olmaktadır.

Tablo 4.13 $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri

<i>m=0.033 kg/s</i>				
Zaman(dak)	Q_u (kJ)	$Q_{u,k}$ (kJ)	Q_{ky} (kJ)	$Q_{k,g}$ (kJ)
0	329.4909	200.5241	27.8781	301.6128
15	389.0375	231.5050	42.3870	346.6504
30	440.5811	279.3995	20.3374	420.2438
45	486.6015	280.2370	20.6365	465.9651
60	507.2380	272.6105	23.6272	483.6107
75	538.4844	201.5792	33.8125	504.6719
90	558.6706	212.9442	26.3190	532.3516
105	589.9423	247.9365	17.6457	572.2966
120	609.2239	221.0194	26.6180	582.6059
135	633.6676	200.6820	29.6088	604.0588
150	644.0007	171.0732	46.9792	597.0215
165	646.2924	147.4459	29.8906	616.4018
180	663.6563	126.8095	29.3097	634.3466
195	654.9830	97.4998	20.6365	634.3466
210	672.6287	67.8909	26.6180	646.0106
225	675.9185	43.7546	34.0060	641.9126
240	675.3204	40.0877	30.4950	644.8254
255	669.6379	28.4236	27.8032	641.8346
270	678.3112	26.3190	41.2729	637.0383
285	669.6379	24.2254	29.6088	640.0291
300	666.9462	26.6180	32.3005	634.6456
315	678.9093	23.9263	38.8803	640.0291
330	670.2360	23.9263	30.2070	640.0291
347	684.8909	29.9079	38.8803	646.0106
360	678.9093	38.8803	32.8987	646.0106
375	678.9093	50.8434	17.9447	660.9646
390	672.9278	50.8434	17.9447	654.9830
405	672.9278	62.8066	23.9263	649.0014
420	675.9185	56.8250	35.8895	640.0291

Tablo 4.14 $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri

<i>m=0.026 kg/s</i>				
Zaman(dak)	Q_u (kJ)	Q_{u,k} (kJ)	Q_{ky} (kJ)	Q_{k,g} (kJ)
0	264.0496	124.0021	20.8147	243.2350
15	305.2360	133.5408	26.2312	279.0048
30	338.6212	133.5408	16.6926	321.9286
45	362.4678	150.2334	7.1540	355.3138
60	383.7397	140.6947	23.6566	360.0831
75	410.1609	176.4646	9.5386	400.6223
90	429.2382	197.9265	7.1540	422.0842
105	472.1620	183.6186	28.6159	443.5461
120	490.3389	205.0805	15.7922	474.5467
135	496.0086	200.3112	4.7693	491.2393
150	507.9318	219.3884	7.1540	515.0858
165	546.0864	209.8498	16.6926	529.3938
180	558.6987	188.3879	26.9203	531.7784
195	567.5483	162.1566	14.3079	553.2403
210	572.3176	135.9254	7.1540	565.1636
225	572.3176	155.0027	2.3847	574.7022
240	580.3434	135.9254	10.4105	569.9329
255	573.1895	112.0789	10.4105	562.7789
270	566.0355	119.2328	11.5128	567.5483
285	556.4969	104.9249	0.8719	555.6250
300	536.5477	81.0783	11.9233	524.6244
315	531.7784	73.9244	14.3079	517.4705
330	517.4705	59.6164	21.4619	496.0086
345	496.8937	50.0778	24.7318	472.1620
360	465.0080	47.6931	14.3079	450.7001
375	436.3922	16.6926	45.3085	391.0837
390	400.6223	26.2312	35.7698	364.8525
405	383.9297	21.4619	40.5392	343.3905
420	357.6985	11.9233	35.7698	321.9286
435	341.0342	26.2115	21.5099	319.5243
450	341.6751	30.6329	23.5638	318.1113
465	341.6751	25.9202	28.2766	313.3985
480	336.9623	18.8510	30.6329	306.3294
495	327.5368	28.2766	25.9202	301.6166
510	332.2496	35.3457	25.9202	306.3294

Tablo 4.15 $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için Reyhan kurutmada kollektör ve şartlandırma odasındaki enerji verileri

<i>m=0.012 kg/s</i>				
Zaman(dak)	Q_u (kJ)	Q_{u,k} (kJ)	Q_{kv} (kJ)	Q_{k,g} (kJ)
0	177.3646	89.9967	3.7131	181.0777
15	227.9526	95.2170	11.3639	216.5887
30	252.6402	106.0240	16.8702	235.7700
45	277.2190	111.3933	22.3765	254.8425
60	294.9463	123.2358	16.3134	278.6329
75	315.5370	117.0304	17.3488	298.1883
90	331.8146	116.8670	14.1383	317.6763
105	346.9316	113.1062	14.1383	332.7934
120	360.1353	113.8512	6.4564	353.6789
135	381.7455	113.8512	8.6744	373.0711
150	392.9017	102.2100	4.3372	388.5645
165	398.9130	92.2186	2.1153	396.7977
180	412.0049	92.4426	5.4750	406.5299
195	419.2978	87.0048	7.4617	411.8360
210	422.9521	86.8982	6.5254	416.4267
225	428.7162	74.9873	10.8756	417.8406
240	434.0452	78.2728	9.7880	424.2572
255	429.9125	73.7540	11.0757	418.8368
270	432.9118	72.6501	12.6775	420.2343
285	430.8454	73.9541	7.0233	423.8221
300	425.8602	71.5636	5.4215	420.4387
315	422.8760	54.2149	18.4331	404.4429
330	412.5596	47.7091	16.4170	396.1426
345	412.0158	42.2876	24.0070	388.0088
360	391.9109	39.0347	17.3488	374.5622
375	376.9483	27.1074	21.6859	355.2623
390	357.6485	29.3728	19.5174	338.1311
405	335.1349	10.5160	35.8217	299.3132
420	287.7129	27.1074	6.5058	281.2071
435	266.4653	24.9388	17.3488	249.1165
450	253.6777	22.0992	23.8545	229.8232
465	187.5388	11.9273	22.1686	189.7074
480	141.8178	17.3205	19.5761	122.2417
492	115.4989	22.7300	16.9659	98.5329
510	92.9864	15.9871	15.9871	76.9992
525	76.9992	19.5761	8.8092	68.1900
540	58.6195	15.0083	2.7189	55.9006
555	54.2692	11.5281	6.3078	47.9614
570	47.0913	12.3982	3.5889	43.5024
585	46.1125	8.0479	8.8092	37.3033
600	40.8923	8.0479	6.1991	34.6932

Tablo 4.13’de görüldüğü gibi $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için reyhan kurutmada kollektör ve kurutma odasındaki enerji verileri nane için elde edilen verilerle paralel bir değişim göstermektedir. Ancak, nane ve reyhan için yapılan deneylerin sonuçları enerji bilançosuna göre karşılaştırılırsa; kurutma odası ısı kazancı ($Q_{u,k}$) ürünün fiziksel özelliklerine bağlı olarak değiştiği görülecektir. Doğal olarak, kollektör ısı kazancı ve kurutulacak ürünün fiziksel özellikleriyle ilişkili değildir. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için kollektör enerji kazancı, 330 kJ ile 685 kJ arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi kayıp enerji miktarı kurutma süresince değişmemekte ve 20-35 kJ arasında değişmektedir. Kollektör çıkışıyla kurutma odası girişi arasında ısı kaybının bu kadar stabil olması çevre sıcaklığının ve rüzgar hızının kurutma süresince çok fazla değişmediğini göstermektedir. Bununla birlikte gün boyunca gölgelenmenin az olduğunu gösterir. Tablo 4.14’de görüldüğü gibi kütleli debi $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye düşerken kollektör enerji kazancı yaklaşık 580 kJ’le kadar düşmektedir. Yani, yaklaşık aynı ısınım değeri ve çevre sıcaklığında $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ ’den $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye düştüğünde kollektör enerji kazancı yaklaşık % 16 azalmaktadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ ’de olduğunda ise yaklaşık % 37 azalarak 434 kJ’e düşmektedir. Burada dikkatle incelenmesi gereken bir diğer parametre ise kurutma odası ısı kazancıdır ($Q_{u,k}$). Kollektör ısı kazancı kütleli debiye bağlı olarak yukarıda bahsedildiği oranda azalırken, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye düştüğünde kurutma odası maksimum enerji kazancı %21 azalarak 219 kJ olmaktadır. Kollektör çıkışı ve kurutma odası girişi arasındaki çevreye enerji kaybı $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için 15-20 kJ olmaktadır.

4.6.2. Ekserji

Ekserji, enerjinin diğer enerji türlerine dönüştürülebilen kısmıdır. Enerjinin aksine çevre şartlarına bağlı olarak değişir. Enerji, hiçbir zaman sıfır olmazken ekserji ortamla denge durumunda sıfırdır. Enerji bir miktar’ı verirken ekserji entropiden dolayı hem miktarı hem kaliteyi vermektedir. Ayrıca, tersinir bir işlemde sürekli korunurken tersinmez işlem sürecinde sürekli tükenir. Bu durumda, mevcut bir çevrede, belirli bir başlangıç durumu ile, bir sistemden alınabilecek maksimum iş, “ekserji” olarak tanımlanır.

Termodinamiğin ikinci kanunu, ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini, çevrenin iç enerjisinden yararlanarak iş elde edilemeyeceğini belirterek enerji dönüşümlerini sınırlamakta ve ayrıca, bütün doğal olayların tersinmez olduğuna dikkati çekerek enerjinin bir türden diğer türe dönüşümünde veya bir sistemden diğer bir sisteme transferinde, insanların faydalanabilecekleri kısmının azalacağını ve sürekli değer kaybedeceğini ifade

etmektedir. O halde bir işlemin tersinmezliği, termodinamiğin ikinci kanunu ile bulunabilir ve entropi üretimindeki artışla ifade edilir (Akpınar, 2002).

Ekserji, tersinir bir süreç sonunda çevre ile denge sağlandığı takdirde kuramsal olarak elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır. Süreçlerin ekserji analizinin temelini oluşturan yaklaşım, ısı, entalpi gibi değişik enerji türlerinin biri faydalı, diğeri faydasız iki değişik kısmı olduğunun kabul edilmesidir.

$$Enerji = \underbrace{Exerji}_{Ise\ yarar} + \underbrace{Anerji}_{Ise\ yaramaz} \quad (4.48)$$

Enerji, ekserji ve anerji olmak üzere iki kısma ayrılır. Enerjinin kullanılabilir kısmına ekserji, enerjinin kullanılmayan kısmına ise anerji denir. Ekserji analizi, termodinamiğin ikinci kanununa ve tersinmez durum değişimlerindeki entropinin genel ifadesine bağlıdır. Bir başka deyişle, termodinamiğin ikinci kanununun mühendislik sistemlerine uygulanmasını ve entropinin yoğun kullanımını gerektirir.

Bir sistemin ekserji analizinde amaç, sistemin denge durumundaki ekserji değerini belirlemek belli şartlarda meydana gelen işler için ekserji dönüşümünün nedenini belirlemektir. Bunun için öncelikle ekserji kayıplarının bulunduğu yeri, bu kayıpların ne kadar olduğunu, bu kayıpların ne zaman giderileceğini ve böylece sistemin ikinci kanun veriminin nasıl iyileştirileceğini bilmektir. Genel olarak ekserji kayıpları, gerek sistemlerdeki gerekse elemanlardaki tersinmez durum değişimlerinde meydana gelen entropi üretiminden kaynaklanır (Midilli,1999).

Böylece, bir akış durumu için ekserji, çevrenin ve akışın özelliklerine bağlı olarak değişir. Bir maddenin akışındaki ekserji ($\dot{E}$) farklı öğelere bölünebilir. En genel anlamda, nükleer etkiler, manyetizma, elektrik ve yüzey geriliminin olması durumunda ekserji;

$$\dot{E} = \dot{E}_k + \dot{E}_p + \dot{E}_{ph} + \dot{E}_o \quad (4.49)$$

burada $\dot{E}_k$ kinetik ekserjiyi, $\dot{E}_p$ potansiyel ekserjiyi, $\dot{E}_{ph}$ fiziksel ekserjiyi ve $\dot{E}_o$ kimyasal ekserjiyi göstermektedir. Bilindiği gibi potansiyel ekserji ($\dot{E}_p$) ve kinetik ekserji ($\dot{E}_k$), enerjinin yüksek derecesiyle, fiziksel ekserji ($\dot{E}_{ph}$) ve kimyasal ekserjiyi ($\dot{E}_o$), enerjinin düşük derecesiyle temsil edilir. Yukarıda yapılan kabuller göz önüne alınırsa; akış işi ve iç enerji ile entalpi eşitliği düzenlenirse, sürekli akışlı sürekli akışık sistemler (SASA) için ekserji;

$$\dot{E} = \dot{E}_{ph} = (h - h_o) - T_o (s - s_o) \quad (4.50)$$

eşitliği yardımıyla elde edilir. Kurutucu için ekserji dengesi ise;

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_\phi = \sum \dot{E}_k \quad (4.51)$$

şeklinde verilebilir.

Bilindiği gibi entropi bir özelliktir ve diğer bilinen özelliklerle ilişkisi Tds bağıntısıyla kurulabilir;

$$Tds = du + Pd\upsilon \quad (4.52 \text{ a})$$

$$Tds = dh - \upsilon dp \quad (4.42 \text{ b})$$

denklem (4.12) ve (4.13) göz önüne alınarak, denklem (4.50), (4.52 a) ve (4.52 b) eşitlikleri ile birlikte ele alınırsa, (4.50) eşitliği kurutucu giriş şartları için;

$$\dot{E}_{k,g} = [(h_g - h_o) - T_o (s_g - s_o)] = Cp \left[(T_g - T_o) - T_o \ln \frac{T_g}{T_o} \right] \quad (4.53)$$

şeklini alır. Aynı şekilde kurutucu çıkış şartları için;

$$\dot{E}_{k,\phi} = [(h_\phi - h_o) - T_o (s_\phi - s_o)] = Cp \left[(T_\phi - T_o) - T_o \ln \frac{T_\phi}{T_o} \right] \quad (4.54)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikler yardımıyla sistemin ikinci kanun verimi için;

$$Verim_E = \frac{\dot{E}_g - \dot{E}_\phi}{\dot{E}_g} = 1 - \frac{\dot{E}_\phi}{\dot{E}_g} \quad (4.55)$$

eşitliği kullanılır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yeni tasarlanmış havalı güneş kolektörler yardımıyla Elazığ iklim şartlarında, kabinet tipi kurutucuda nane ve reyhanın kurutma parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu kurutma parametreleri kullanılarak, literatürde verilen matematiksel kurutma modelleri için karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, ele alınan ürünler için yeni bir kurutma modeli geliştirilmiştir. Kurutucu akışkanın farklı kütleli debileri için kurutma parametreleri elde edildiği gibi sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıda sıralanmaktadır;

- Havanın debisi ile kolektör etkinliği doğru orantılıdır. Işınım değerlerine bağlı olarak $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için kolektör verimi saat 9'da %29 olurken, saat 13'de %42'ye kadar çıkmaktadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için elde edilen bu maksimum etkinlik değeri $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için %51 ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için %63 olmaktadır. Klasik düzlem yüzeyli güneş kolektör etkinlik değerlerinin %20-25 arasında değiştiği göz önüne alınırsa, bizim geliştirdiğimiz kolektörler için elde edilen etkinlik değerlerinin önemli oranda arttığı görülmektedir.
- Kanat açısı $\alpha=45^\circ$ olduğunda, $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için maksimum etkinlik değeri %38 olurken, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için %45 ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için %55 olmaktadır. Etkinlik değerinin günün saatlerine göre tam bir parabol oluşturmadığı ve bazı saatlerde sapmalar görülmektedir. $\alpha=60^\circ$ olduğunda, kolektör maksimum etkinliği $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için %47 olmaktadır.
- Reynolds sayısına bağlı olarak $\alpha=60^\circ$ için Nusselt sayısı 76 ile 115 arasında değişmektedir. $\alpha=45^\circ$ için 83 ile 121 arasında ve $\alpha=30^\circ$ için 89 ile 138 arasında değişmektedir. Buradan anlaşılabileceği gibi Reynolds sayısı arttıkça kanat açısının etkisi de artmaktadır.
- Boyutsuz ekserji kaybı değişimine göre Reynolds sayısı arttıkça kazanılan ısı, ekserji kaybından daha fazla artmaktadır. Ayrıca, kanatçıkların ısı transferi üzerindeki etkisi ekserji kaybında da görülmektedir. Kanatçık açısı azaldıkça ısı transferi artmakta ve maksimum Reynolds sayısında ekserji kaybının yaklaşık 5 katı olmaktadır. $\alpha=30^\circ$ için ısı kazancı, bütün Reynolds sayılarında ekserji kaybından daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte $\alpha=60^\circ$ için düşük Reynolds sayılarında ekserji kaybı ısı kazancının yaklaşık 1.4 katı olmaktadır.

- Havalı güneş kollektörleri yardımıyla kurutma işlemine başlamadan önce hem nane hem de reyhan için doğal ortamda kurutma yapılmıştır. Nane ve reyhan için kütle değişimi ve kuruma zamanı arasındaki ilişkisinden görüldüğü gibi doğal kurutmada nane yaklaşık 930 dakikada, reyhan ise 1320 dakikada kütle değişimi sıfır olmaktadır. Bu verilere göre nane yaklaşık 2 günde, reyhan ise yaklaşık 3 günde kurumaktadır. Her bir günün başlangıcında kütle ve nem içeriği yavaş değişmektedir. Bunda, sabah ışınlam değerinin ve ortam sıcaklığının düşük olması ve ürünün rejime gelmesi etkili olmaktadır.
- Nane için nem içeriği maksimum 3.55 dir. Kurutucu hava debisinin nem içeriğinin zamanla değişimi üzerinde önemli bir etkisi vardır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için nem içeriği 480 dakikada, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için 390 dakikada ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için 300 dakikada yaklaşık sıfır olmaktadır.
- $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için nem içeriği 320. dakikaya kadar hızlı bir şekilde düşmektedir. 480 dakika sonra ise kütle değişimi devam etmekte ancak 10^{-4} mertebesinde olmaktadır. $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için bu kuruma evresi 260 dakikaya kadar, $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için ise 200 dakika kadar sürmektedir.
- Nane için 3.55 olan maksimum nem içeriği reyhan için 7.62 kat olmaktadır. Reyhan için yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, nem içeriği arttıkça debinin nem içeriğinin değişimi üzerindeki etkisi de artmaktadır.
- Kurutmaya başlamadan önce reyhanın nem içeriği nanenin nem içeriğinin yaklaşık 2.1 katıdır. Ancak her iki ürününde kuruma nem içeriği yaklaşık %10-12 olmaktadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için nane kuruma zamanı 480 dakika olurken reyhan için 600 dakika olmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için nane kuruma süresi 300 dakika iken reyhan kuruma süresi 420 dakikadır. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için nane nem içeriği 480 dakika sonra sıfır olurken aynı zaman adımıyla reyhan nem içeriği 0.56 kadardır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için nane nem içeriği 300 dakikada sıfır olurken aynı zaman adımıyla reyhanın nem içeriği 0.31 olmaktadır.
- $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için kuruma hızı 0.013 s^{-1} ile başlamakta ve 480 dakika sonunda yaklaşık sıfır olmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için ise 0.021 s^{-1} ile başlamakta ve 300 dakika sonunda yaklaşık sıfır olmaktadır. Kurutma işlemi başladığında, $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ 'den $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ 'ye çıktığında kuruma hızı yaklaşık %19 artarak 0.016 s^{-1} , $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ 'ye çıktığında ise %55 artarak 0.021 s^{-1} olmaktadır.

Şekil 4.16’de dikkat edilmesi gereken bir nokta ise yaklaşık 150. dakikada bütün kütleli debiler için kuruma hızı hemen hemen eşit olmaktadır.

- Reyhan için nem içeriği 7.62 olduğunda kuruma hızı; $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için 0.037, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için 0.03 ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için 0.02 olmaktadır. Bununla birlikte, nem içeriğinin 0.5 değerinden önce kuruma hızı bütün kütleli debiler için yaklaşık aynı değerdedir. Yani, nem içeriği 0.5’in altına düştüğünde kurutucu havanın kütleli debisinin kuruma hızı üzerindeki etkisi azalmaktadır. Burada, vurgulanması gereken bir diğer konu ise; 200 gr nane kurutularak 45 gr kuru ürün elde edilmektedir. Yani, nane için yaklaşık %77 su içeriği, havanın kütleli debisine bağlı olarak 300-480 dakikada ürün içerisinden atılmaktadır. Buna karşın, 250 gr reyhan yaklaşık %88 su kaybederek 29 gr kuru ürün olarak kalmaktadır. 250 gr reyhan içerisindeki 221 gr su havanın kütleli debisine bağlı olarak 420-600 dakikada kurumaktadır.
- Nane için kurutulmasında $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için 180.dakika, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için 240. dakika ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için 340. dakikaya kadar boyutsuz nem oranı hızlı bir periyotta azalmaktadır. Bu zaman adımlarından sonra yavaşlamaktadır. Reyhan için ise bu hızlı periyot sırasıyla 300, 360 ve 450. dakikaya kadar sürmektedir. Kütleli debinin boyutsuz nem üzerindeki etkisi önemli oranda olmaktadır. Ayrıca, hem nane hem reyhan için $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye kadar kuruma hızı, kurutma hızı kütleli debiye göre boyutsuz nem üzerinde daha etkilidir. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ ’ye çıktığında kütleli debinin boyutsuz nem üzerindeki etkisi de artmaktadır.
- % nem kaybı 15. dakikadan başlayarak her iki ürün için hızlı bir şekilde azalmakta ve denge nem içeriğine eşit oluncaya kadar bu düşüş devam etmektedir. $\dot{m} = 0.012 \text{ kg} / \text{s}$ için nane nem miktarı %95 iken reyhan için %96 olmaktadır. $\dot{m} = 0.026 \text{ kg} / \text{s}$ için %71 ve %93 ve $\dot{m} = 0.033 \text{ kg} / \text{s}$ için ise %70 ve %85 olmaktadır.
- Wang and Singh Model’inin dışında, bütün bağımlı parametreler göz önüne alındığında Page Model, nane ve reyhan için son derece uygun olduğu görülmektedir. Modified Page 1 Model için elde edilen nane ve reyhan deneysel teorik değerlerinin karşılaştırılması verilmektedir. Görüldüğü gibi deneysel ve teorik değerler ± 20 sınırında birbirini karşılamaktadır.

- Modified Page II Model ürünün kalınlığını (L) içermektedir. Yapraksı ürünlerin kurutulması ve modellenmesinde ürün boyutlarını içeren eşitlikler kuruma parametrelerini sağlamamaktadır. Ancak, Modified Page II Model $0.566 \leq R \leq 0.903$ gibi kötü bir değerde korelasyon katsayısı sağlamaktadır. Bundan dolayı hem nane hem de reyhan için teorik ve deneysel veriler birbirini $\% \pm 60$ sınırlarında karşılamaktadır
- Kollektör faydalı ısı (Q_u) ısıtım değerlerine bağlı olarak değişmekte ve ısıtım değerlerinin maksimum olduğu öğle saatlerinde maksimum olmaktadır. Tasarlanan kollektör modelinin etkin bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Sabah saatlerinde 326 kJ olan kollektör ısı kazancı öğlen saatlerine doğru artmakta ve 705 kJ'e kadar çıkmaktadır. Kurutucunun faydalı ısı ($Q_{u,k}$) ise kollektörün aksine sabah saatlerinde fazla olmakta ve zamanla azalmaktadır.
- Havanın kütsel debisi azaldığında kollektör ısı kazancıda azalmaktadır. Yaklaşık aynı ısıtım değerleri için maksimum ısı kazancı (Q_u) yaklaşık 100 kJ'lük bir enerji düşüşü olmaktadır. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için 300 dakika sonunda yaklaşık 640 kJ olan kollektör ısı kazancı $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için aynı zaman aralığında yaklaşık 540 kJ olmaktadır. Kurutucu ısı kazancı ($Q_{u,k}$), $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 60 kJ ile 260 kJ arasında değişirken $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için 10 kJ ile 240 kJ arasında değişmektedir. Bu değerlere bağlı olarak kollektör çıkışı ile kurutucu girişinde ısı kaybı da azalmaktadır
- $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için enerji verileri incelenirse, kollektör ısı kazancı kütsel debiye bağlı olarak azaldığı görülecektir. Maksimum ısı kazancı (Q_u) $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 705 kJ, $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 570 kJ ve $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 445 kJ olduğu görülmektedir. Bunlara bağlı olarak kurutma odası ısı kazancı 122 kJ ile 11 kJ arasında değişmektedir. Diğer kütsel debilerde olduğu gibi $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için de kurutma zamanına bağlı olarak kurutma odası ısı kazancı ($Q_{u,k}$) azalmaktadır.
- $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için kollektör enerji kazancı, 330 kJ ile 685 kJ arasında değişmektedir. Kayıp enerji miktarı kurutma süresince sabit kalmakta ve 20-35 kJ arasında değişmektedir.
- $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için yaklaşık %80 olan EKO değerleri $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için % 5-53 arasında değişmektedir. buna karşın ikinci kanun verimi %30-95 arasında değişmektedir. $\dot{m} = 0.033 \text{ kg/s}$ için kayıp ekserji 120-350 J/kg arasında değişirken $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için bu değer 10-560 J/kg arasında değişmektedir.

Bu durum, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızı ile ilişkili olduğu gibi kollektör çıkış sıcaklığı ile de doğrudan ilişkilidir.

- Kütleli debinin $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ 'den $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ 'ye düşmesi EKO değerini önemli oranda değiştirmemektedir. Ancak, havanın kollektör çıkış sıcaklığı yada kurutucu giriş sıcaklığı kütleli bağlı olarak arttığı için birim kütleli enerji de artmaktadır. $\dot{m} = 0.026 \text{ kg/s}$ için maksimum ekserji yaklaşık 900 J/kg olmasına karşın $\dot{m} = 0.012 \text{ kg/s}$ için yaklaşık 2300 J/kg olmaktadır. İkinci kanun verimi ise %25-90 arasında değişmektedir.

Kurutma işlemlerinde, kurutulan ürünün fiziksel özelliklerinin bozulmaması, kurutma ortamının hijyen olması, kurutma işleminin sürekli olması, kurutucu modelinin etkin çalışması, kurutucu modelinin kullanışlı olması, kurutucu imalatının ve kurutma işleminin ekonomik olması öncelikli taleplerdir.

Güneş enerjisi ile kurutma işleminin en önemli avantajları; enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanması, kurulum maliyetinin düşük olması, ülkemiz iklim şartlarına uygun olması, kimyasal işlemler gerektirmediğinden hijyen bir ortamda kurutma sağlanması gibi bir çok gerekçe sıralanabilir. Bu tip sistemlerde iki önemli problemle karşılaşmaktadır: ilk olarak güneş enerjisinden etkin bir şekilde yararlanamamadır. Bir diğeri ise güneş enerjisinden gün boyunca yararlanamama ve dolayısıyla sürekli enerji ihtiyacının karşılanamamasıdır. Bu çalışmada ilk bahsedilen probleme çözüm getirilmeye çalışılmıştır. Tasarlanan yeni kollektör modeliyle güneş enerjisinden etkin bir şekilde yararlanılmıştır. Bu çalışmanın geliştirilmesi ve uygulaması aşamasında ikinci bahsedilen problemde değişik alternatif yöntemlerle giderilebilir.

KAYNAKLAR

1. Abene, A., Dubois, V., Le Ray, M., Ouagued, A., 2004, Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape, Journal of Food Engineering, 65, 15-22.
2. Abu-Hamdeh, H.N., Simulation study of solar air heater, 2003, Solar Energy, 74, 309-317.
3. Ahmad, N.T., 2001, Agricultural solar air collector made from low-plastic packing film, Renewable Energy, 23, 663-671.
4. Akbaba, H., 1998, Drying characteristic of squash with hot air, Drying'98- Proceedings of the 10th International Drying Symposium, Greece, 1476-1480.
5. Akbulut, A., 2006 "Elazığ yöresinde yetişen dutların yeni geliştirilen havalı kolektörler yardımıyla kurutulması ve kurutma parametrelerinin elde edilmesi"Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006, Elazığ
6. Akpınar, E.K., 2002, Tarımsal ürünler için siklon tipi bir kurutucunun geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 253 s.
7. Akpınar, E.K., 2004, Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer, International Comm. Heat Mass Transfer, 31, 1165-1176.
8. Akpınar, E.K., Midilli, A., Biçer, Y., 2005, Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer, Energy Conversion and Management, 46, 2530-2552
9. Akpınar, E.K., Midilli, A., Biçer, Y., 2006, The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process, Journal of Food Engineering, 72, 320-331.
10. Ammari, H.D., 2003, A mathematical model of thermal performance of a solar air heater with slats, Renewable Energy, 28, 1597-1615.
11. ASAE, 1983, Moisture measurement-peants. ASAE Standart of ASAE S.410.1.Agr. Eng. Yearbook of Standarts, 329-331.
12. Ayvaz, H., 1992, Güneş enerjisiyle tarımsal ürünlerin kurutulmasında kullanılacak endüstriyel kurutucu tasarımı, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.
13. Azharul Karim Md, Hawlader, M.N.A., 2005, Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation, Journal of Food Engineering, 70, 35-45.
14. Bajsic, I., Kunsek, I., 2003, Factorial design of drying phenomena, Instrumentation Science and Technology, 31, 141-153.
15. Balladin, A.D., Headley, O., 1999, Evaluation of solar dried thyme (thymus vulgaris linne) herbs, Renewable Energy, 17, 523-531.

16. Banchemo, J.T., Badger, W.L., 1973, Kimya mhendisliğine giriş. İnkılap ve Aka Kitapevi.
17. Bari, S., 2000, Optimum slope angle and orientation of solar collectors for different periods of possible utilization, *Energy Conversion and Management*, 41, 855-860.
18. Bennamoun, L., Belhamri, A., 2003, Design and simulation of a solar dryer agriculture products, *Journal of Food Engineering*, 59, 259-266.
19. Bingl, ř., 1983, Sebze işleme sanayinde gelişmeler ve pazarlama durumu, *Milli Prodktive Merkezi Yayınları*, 289, Ankara.
20. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C. W., 1974, Drying cereal grains. The AVI publishing company, Westport, Connecticut.
21. Burch, J., Christensen, C., Salasovich, J., Thornton, J., 2004, Simulation of an unglazed collector system for domestic hot water and space heating and cooling, *Solar Energy*, 77, 399-406.
22. Can, A., 1992, Kurutma koşullarında biyolojik ürünler içinden nem transportunun kinetiği, *Mhendis ve Makine Dergisi*, 33, 392, 9-12.
23. Carrington, C.G., Wells, C.M., Sun, Z.F., Chen, G., 2002, Use of dynamic modelling for the design of batch-mode dehumidifier dryers, *Drying Technology*, 20, 1645-1657.
24. engel, Y. A., Boles, M. A., Mhendislik Yaklaşımı ile Termodinamik, *Literatür Yayıncılık*, 1996.
25. Chiang, W-C., Petersen, J.N., 1985, Thin layer air drying of french fried potatoes, *Journal of Food Technology*, 20, 67-78.
26. Crank, J., 1975, The mathematics of diffusion. Clarendon press, Oxford.
27. Diamante, L.M., Munro, P.A., 1991, Mathematical modelling of hot drying of sweet potato slices, *International Journal of Food Science and Technology*, 26, 99-109.
28. Dinçer, I., 1992, Soğuk su banyosunda soğutulan küresel şekilli domatesin sıcaklık dağılımının belirlenmesi, *Mhendis ve Makine Dergisi*, 33, 387, 21-26.
29. Dinçer, I., Hussain, M.M., 2004, Development of a new biot number and a lag factor correlation for drying applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 653-658.
30. Dinçer, İ., şahin, A.Z., 2004, A new model for thermodynamics analysis of a drying process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 645-652.
31. Doğantan, Z.S., 1986, Kahramanmaraş biberlerinin kurutmaya yönelik fiziksel ve kimyasal özelliklerinin saptanması ile doğal koşullarda ve plastik örtü altın güneş toplayıcılarıyla kurutma üzerine bir araştırma, *Doktora Tezi*, . Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Mekanizasyon Anabilim Dalı.
32. Doymaz, İ., 2004, Drying kinetics of white mulberry, *Journal of Food Engineering*, 61, 341-346.

33. Doymaz, İ., 2005, Sun drying of figs: an experimental study, *Journal of Food Engineering*, 71, 403-407.
34. Ekechukwu, O.V., Norton, B., 1997, Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying application, *Energy Conversion and Management*, 40, 657-667.
35. Ekechukwu, O.V., Norton, B., 1999, Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, *Energy Conversion and Management*, 40, 615-655.
36. Farkas, I.S., Meszaros, CS., 1999, Analytical and experimental study of a modular solar dryer, *Renewable Energy*, 16, 773-778.
37. Ficarella, A., Perago, A., Starace, G., Laforgia, D., 2003, Thermo-fluid-dynamic investigation of a dryer, using numerical and experimental approach, *Journal of Food Engineering*, 59, 413-420.
38. Flores-Irigollen, A., Fernandez, J.L., Rubio-Cerda, E., Poujol, F.T., Heat transfer dynamics in an inflatable-tunnel solar air heater, 2004, *Renewable Energy*, 29, 1367-1382.
39. Forson, F.K., Nazha, M.A.A., Rajakaruna, H., 2003, Experimental and simulation on a single pass, double duct solar air heater, *Energy Conversion and Management*, 44, 1209-1227.
40. Göğüş, F., Maskan, M., 1998, Water transfer in potato during air drying, *Drying Technology*, 16 (8), 1775-1728.
41. Goyal, R.K., Tiwari, G.N., 1999, Performance of a reverse plate absorber cabinet dryer: a new concept, *Energy Conversion and Management*, 40, 385-392.
42. Hall, C. W., P.E., 1980, *Drying and storage of agricultural crops*. The AVI publishing company, Westport, Connecticut.
43. Hegazy, A.A., 2000, Thermohydraulic performance of air heating solar collectors with variable width, flat absorber plates, *Energy Conversion and Management*, 41, 1361-1378.
44. Hollick, J.C., 1999, Commercial scale solar drying, *Renewable Energy*, 16, 714-719.
45. <http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>
46. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 2001, *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*, Literatür Yayınları, İstanbul.
47. Ivanova, D., Andonov, K., 2001, Analytical and experimental study of combined fruit and vegetable dryer, *Energy Conversion and Management*, 42, 975-983.
48. Ivanova, D., Enimanev, Kr., Andonov, K., 2003, Energy and economic effectiveness of a fruit and vegetable dryer, *Energy Conversion and Management*, 44, 763-769.

49. Jain, D., Pahare, P.B., 2004, Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices, *Biosystems Engineering*, 89 (3), 289-296.
50. Jannot, Y., Coulibaly, Y., 1998, The “evaporative capacity” as a performance index for a solar-drier air-heater, *Solar Energy*, 63, 387-391.
51. Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M., Lahsasni, S., 2002, Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of moroccan eucalptus globulus, *Drying Technology*, 20, 2027-2039.
52. Kurtbaşı, İ., Durmuş, A., 2004, Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater, *Renewable Energy*, 29, 1489-1501.
53. Maroulis, Z.B., Kiranoudis, C.T., Marinou-Kouris D., 1995, Heat and mass transfer modelling in air drying of foods, *Journal of Food Engineering*, 26, 113-130.
54. Maskan, M., Göğüş, F., 1998, Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*morus alba*), *Journal of Food Engineering*, 37, 437-449.
55. Mengeş, H.O., Aydın, C., 2000, Konya bölgesinde yetişen stanley çeşidi eriklerin sıcak hava ile kurutulmasında kuruma üzerine etki eden faktörler, *Tarımsal Mekanizasyon 19. Ulusal Kongresi*, 324-331, 1-2 Haziran, Erzurum.
56. Midilli, A., 2001, Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system, *International Journal of Energy Research*, 25, 715-725.
57. Midilli, A., Küçük, H., 2003, Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio, *Energy*, 28, 539-556.
58. Midilli, A., Olgun, H., Ayhan, T., 1999, Experimental studies of mushroom and polen drying, *International Journal of Energy Research*, 23, 1143-1152.
59. Mikatinac, M.J., Sokhansanj, S., Tutek, Z., 1992, Determination of heat and mass transfer coefficient in thin layer drying of grain, *American Society of Agricultural Engineers*, 35 (6), 1853-1858.
60. Momin, E.A., Saini, J.S., Solanki, S.C., 2002, Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3383-3396.
61. Mwithiga, G., Olwal, J.O., 2005, The drying kinetics of kale (*brassica oleracea*), *Journal of Food Engineering*, 71, 373-378.
62. Naphon, P., Kongtragool, B., 2003, Theoretical study on heat transfer characteristics and performance of the flat-plate solar air heaters, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 30, 1125-1136.
63. Onat, A., İmal, M., Işık, N., Binark, A.K., 2005, Kırmızı biberlerin karşıt akışlı taşınım tipli kurutucuda kurutulmasının deneysel ve teorik analizi, *KSU Journal of Science and Engineering*, 8 (1), 45-52.
64. Özdemir, M., Devres, Y.O., 1999, The thin layer drying characteristic of hazelnuts during roasting, *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.

65. Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L., Sarsavadia, P.N., 2002, Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer, *Energy*, 27, 579-590.
66. Park, K.J., Vohnikova, Z., Brod, F.P.R., 2002, Evaluation drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*menta crispa*), *Journal of Food Engineering*, 51, 193-199.
67. Prakash, S., Jha, S.K., Data, N., 2004, Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers, *Journal of Food Engineering*, 62, 305-313.
68. Queiroz, M.R., Nebra, S.A., 2001, Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas, *Journal of Food Engineering*, 47, 127-132.
69. Radivoje, M.T., 2003, Small capacity mobile dryers for drying biological materials, *Drying Technology*, 21, 1137-1150.
70. Ratti, C., Crapista, G.H., 1995, Determination oh heat transfer coefficients during drying of food stuffs, *Journal of Food Process Engineering*, 18, 41-53.
71. Rossello, C., Simal, S., Berna, A., Mulet, A., 1992, Simple mathematical model to predict the drying kinetics of potatoes, *Journal of Agricultural Food Science*, 2374-2378.
72. Şahbaz, F., Kayhan, I., 1994, Hava akış hızı ve sıcaklığının patatesin kuruma hızına etkisi, *Tr. J. of Engineering and Enviromental Sciences*, 18, 163-168.
73. Sarsavadia, P.N., Sawhney, R.L., Pangavhane, D.R., Singh, S.P., 1999, Drying behaviour of brined onion slices, *Journal of Food Engineering*, 40, 219-226.
74. Sarsılmaz, C., Yıldız, C., Pehlivan, D., Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with a solar energy, *Renewable Energy*, 21, 117-127.
75. Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P., 2005, Mathematical modelling of infrared radiation thin layer drying of onion slices, *Journal of Food Engineering*, 71, 282-286.
76. Simal, S., Rosello, C., Berna, A., Mulet, A., 1994, Heat and mass transfer model for potato drying, *Chemical Engineering Science*, 49, 3739-3744.
77. Simal, S., Rosello, C., Mulet, A., 1998, Modelling of air drying in regular shaped bodies, *Chemical Engineering*, 4, 219-267.
78. Tırıs, M., Tırıs, Ç., Edin, M., 1994, İki ayrı tip güneşli kurutucuda çeşitli meyve ve sebzelerin kuruma eğrilerinin incelenmesi, *Isı bilimi ve Tekniği Dergisi*, 17, 27-32.
79. Toğrul, H., 2005, Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices, *Journal of Food Engineering*, 71, 311-323.
80. Torres-Reyes, E., Navarrate-Gonzalez, J.J., Ibarra-Salazar, B.A., 2003, Thermodynamic method for designing dryers operated by flate-plate solar collectors, *Renewable Energy*, 26, 649-660.
81. Üretir, G., Modelling computer controlled apple drying process, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ.

82. Van Arsdell, W.B., Copley, M.J., 1963, Food dehydration, The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut.
83. Vlachos, N.A., Karapantsios, T.D., Balouktsis, A.I., Chassapis, D., 2002, Design and testing of a new solar dryer, *Drying Technology*, 20 (6), 1243-1271.
84. www.herbalistatabey.com.tr
85. www.kurutma.net
86. www.ordutarim.gov.tr
87. Yağcıoğlu, A., 1999, Tarım ürünlerini kurutma tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 536, İzmir.
88. Yıldız, O., Ertekin, C., 2000, Bazı sebzelerin güneş enerjili kurutucular ile kurutulma olanakları üzerine araştırmalar, Tarımsal Mekanizasyon 19. Ulusal Kongresi, 332-337, Erzurum.
89. Yıldız, O., Ertekin, C., 2001 b, The thin layer solar drying of some vegetables, *Drying Technology*, 19 (3), 583-596.
90. Yıldız, O., Ertekin, C., Uzun, H.İ., 2001 a, Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy*, 26, 457-465.
91. Yeh, H.-M., Ho, C.-D., Hou, J.-Z., 2002, Collector efficiency of double-flow solar air heaters with fins attached, *Energy*, 27, 715-727.
92. Yıldız, C., Toğrul, İ.T., Sarsılmaz, C., Pehlivan, D., 2002, Thermal efficiency of an air solar collector with extended absorption surface and increased convection, *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 29, 831-840.

ÖZGEÇMİŞ

Fevzi GÜLÇİMEN 1964 yılında Erzurum’da doğdu. Gaziantep ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümünde eğitimini tamamlamıştır. Mezuniyetinde sonra Gaziantep ilinde çeşitli özel sektörlerde yöneticilik yaptıktan sonra Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Yüksek Lisans eğitimini **“KAYA YATAKLI SİSTEMLERE HAVALI KOLLEKTÖR YARDIMIYLA GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLANMASININ ARAŞTIRILMASI”** isimli tez ile 2000 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalında tamamlamıştır. Aynı yılda doktora eğitimine başlamıştır. Evli ve dört çocuk babasıdır.