

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

**ÇEKİRDEKLİ ÜZÜM KURUTMADA GÜNEŞ ENERJİSİ
DESTEKLİ DÖNEL AKIŞLI KURUTUCU TASARIMI**

Gülşah ÇAKMAK

**TEZ YÖNETİCİSİ
Prof. Dr. Cengiz YILDIZ**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ, 2007

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

ÇEKİRDEKLİ ÜZÜM KURUTMADA GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ DÖNEL AKIŞLI KURUTUCU TASARIMI

Gülşah ÇAKMAK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ

Üye: Doç. Dr. Ebru KAVAK AKPINAR

Üye: Yrd. Doç. Dr. Celal SARSILMAZ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Zeki ARGUNHAN

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 Prof. Dr. Cengiz YILDIZ'a, değerli hocalarım sayın Doç. Dr. Ebru AKPINAR ve Yrd. Doç. Dr Zeki ARGUNHAN'a ve tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen atölye personeline teşekkürlerimi borç bilirim.

Gülşah ÇAKMAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa no</u>
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
SİMGELER LİSTESİ.....	XI
ÖZET.....	XII
ABSTRACT.....	XV
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3.GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTMA SİSTEMLERİ.....	16
3.1. Yüksek Sıcaklıklı Kurutucular.....	16
3.2. Düşük Sıcaklıklı Kurutucular.....	16
3.3. Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	16
3.3.1. Doğal Sirkülasyonlu (Pasif Tip) Güneş Enerjili Ürün Kurutucular.....	19
3.3.1.1. Dağıtılmış (Dolaylı Tip) Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Kurutucular.....	20
3.3.1.2. Entegre (Direkt Tip) Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Kurutucular.....	21
3.3.1.3. Kombine Tip Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjisi Kurutucuları.....	23
3.3.2. Aktif Güneş Enerjili Kurutucular.....	25
3.3.2.1. Entegre Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutucular.....	25
3.3.2.2. Dağıtılmış Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri.....	26
3.3.2.3. Kombine Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutucular.....	26
3.4. Diğer Kurutma Yöntemleri.....	28
4.GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİ.....	30
4.1. Havalı Güneş Kolektörleri.....	31
4.2. Kollektör Anlık Verimi.....	33
5.KURUTMA TEORİSİ.....	35
5.1. Kurutma Evreleri.....	35
5.1.1. Kurumanın Statiği.....	35
5.1.2. Kurumanın Kinetiği.....	36
5.2. Denge Nemi.....	40

5.3. Tarım Ürünlerinin İnce Tabaka Formunda Kuruması.....	41
5.3.1. Sabit Hızla Kuruma Evresi.....	41
5.3.2. Azalan Hızla Kuruma Evresi.....	42
5.3.2.1. Azalan Hızla Kuruma Evresi İle İlgili Teorik Modeller.....	43
5.4. Tarım Ürünlerinin Kalın Tabaka Formunda Kuruması.....	47
5.5. Kurutma Hızı.....	47
5.6. Kurutma Modellerinin Sınıflandırılması.....	48
5.6.1. Basit Kurutma Modelleri.....	49
5.6.2. Karmaşık Kurutma Modelleri.....	49
5.7. Kurutmanın İç ve Dış Koşulları.....	50
5.8. Kurutmada Meydana Gelen Başlıca Değişmeler.....	51
5.8.1. Fiziksel Değişmeler.....	51
5.8.2. Kimyasal ve diğer değişmeler.....	54
6. GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ.....	55
6.1. Isıl Depolama.....	56
6.2.1. Düşük Sıcaklıkta Isı Depolama.....	57
6.2.1.1. Duyulur Isı Depolama.....	57
6.2.1.2. Gizli Isı Depolama.....	58
6.3. Tuz Hidratlar.....	63
6.3.1. Kalsiyum Klorür Hekzahidrat.....	66
6.3.2. Sodyum Karbonat Dekahidrat.....	68
6.3.3. Kalsiyum Nitrat.....	68
6.3.4. Sodyum Sülfat Dekahidrat (Glauber Tuzu)Ve Ötektikleri.....	69
6.4. Parafinler.....	69
6.5. Parafin olmayan organik maddeler.....	70
7. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM.....	72
7.1. Deney Düzenegi.....	72
7.2. Deneylerde Yapılan Ölçümler ve Kullanılan Ölçme Cihazları.....	80
7.3. Ölçülen Değerlerin Hata Analizi.....	83
8. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	87
8.1. Havalı Güneş Kollektörlerinden Elde Edilen Deney Sonuçları.....	87
8.2. Kurutma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	93
9. KURUMA EĞRİLERİNİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ... 107	
9.1. Zamanla Nem Oranı Değişiminin Modellenmesi.....	110
9.2. Kuruma Hızı Nem İçeriği Değişimi Eğrilerinin Modellenmesi.....	117

9.3. Difüzyon Katsayısının Modellenmesi.....	119
10. ENERJİ ve EKSERJİ ANALİZİ.....	120
11. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kurutucuların ve kurutma yöntemlerinin sınıflandırılması.....	17
Şekil 3.2. Tipik güneş enerjisi kurutucu düzenekleri	17
Şekil 3.3. Tipik bir doğal sirkülasyonlu dağıtılmış (dolaylı) tip güneş enerjili Kurutucu	18
Şekil 3.4. Tipik bir doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucu kabini.....	22
Şekil 3.5. Doğal sirkülasyonlu cam çatılı güneş enerjili kurutucu	22
Şekil 3.6. Tipik bir kombine tip doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucu.....	24
Şekil 3.7. Aktif havalandırmalı sera tipi güneş enerjili kurutucu.....	25
Şekil 3.8. Dağıtılmış tip aktif güneş enerjili kurutucu.....	26
Şekil 3.9. Kombine tip aktif güneş enerjili kurutucu	27
Şekil 4.1. Farklı havalı güneş kolektörü tasarımları.....	32
Şekil 4.2. Optik ve ısı kayıpların kolektör verime etkisi	33
Şekil 4.3. Düzlemsel güneş kolektöründe ısı kayıplar	34
Şekil 5.1. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statüğü açısından anlamı.....	36
Şekil 5.2. Kurumanın kinetik eğrileri.....	37
Şekil 5.3. Kuruyan materyalde oluşan izotermal ve izopotansiyel çizgileri.....	38
Şekil 5.4. Özgül nemin bir fonksiyonu olarak kurutma hızının değişimi.....	48
Şekil 5.5. Kurutma eğrisinin zamana göre eğişi	48
Şekil 6.1. Güneş enerjisi depolama yöntemleri	55
Şekil 6.2. Faz değıştiren ısı depolama maddelerinin sınıflandırılması	62
Şekil 7.1. Genişletilmiş yüzeyli kolektörün yandan görünümü	73
Şekil 7.2. Kurutma odası girişinde kullanılan dönel eleman	73
Şekil 7.3. Kurutma odası içersine yerleştirilen hava yönlendirme elemanları	74
Şekil 7.4. İmal edilen deney setini şematik görünümü.....	75
Şekil 7.5. Havalı güneş kolektörlü kabin tipi kurutucunun şematik görünümü.....	76
Şekil 7.6. İmal edilen deney setinin fotoğrafı.....	77
Şekil 7.7. Eğimi ayarlanabilir kolektör sehпасıyla birlikte genişletilmiş yüzeyli havalı güneş kolektörünün şematik görünümü.....	78
Şekil 7.8. Faz değışim malzemesi içeren güneş kolektörü.....	78
Şekil 7.9. Kurutma odasının fotoğrafı.....	79
Şekil 7.10. Datalogger bağlantı noktaları.....	80
Şekil 8.1. Zamanla ışı nım şiddetinin değışimi	88
Şekil 8.2. 0.5 m/s için genişletilmiş yüzeyli kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	88
Şekil 8.3. 1 m/s için genişletilmiş yüzeyli kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	89

Şekil 8.4. 1.5 m/s için genişletilmiş yüzeyli kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	89
Şekil 8.5. 0.5 m/s için FDM’li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	90
Şekil 8.6. 1 m/s için FDM’li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	90
Şekil 8.7. 1.5 m/s için FDM’li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	91
Şekil 8.8. FDM’li kolektörün hava hızlarına göre verimleri.....	91
Şekil 8.9. Düz ve genişletilmiş yüzeyli kolektörlerin hava hızlarına göre verimleri.....	92
Şekil 8.10. 0.5 m/s hava hızında kurutma deneylerinin yapıldığı saatler için ısınım şiddeti değerleri.....	95
Şekil 8.11. 1 m/s hava hızında kurutma deneylerinin yapıldığı saatler için ısınım şiddeti değerleri.....	96
Şekil 8.12. 1.5 m/s hava hızında kurutma deneylerinin yapıldığı saatler için ısınım şiddeti değerleri.....	96
Şekil 8.13. FDM’ li kollektörle kurutma deneylerinin yapıldığı saatler için ısınım şiddeti değerleri.....	97
Şekil 8.14. 0.5 m/s hava hızı için kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları..	98
Şekil 8.15. 1 m/s hava hızı için kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları....	99
Şekil 8.16. 1.5 m/s hava hızı için kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları..	100
Şekil 8.17. FDM’li kolektörle kurutma sırasında kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları	101
Şekil 8.18. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin nem içeriğinin zamanla değişimi.....	102
Şekil 8.19. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin kuruma hızının zamana göre değişimi.....	103
Şekil 8.20. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi.....	105
Şekil 8.21. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin boyutsuz nem oranının zamanla değişimi.....	106
Şekil 9.1 Kurutma deneylerinde deneysel ve teorik nem oranı değerleri.....	116
Şekil 9.2. Kurutma deneylerinde deneysel ve teorik kuruma hızı değerleri.....	118
Şekil 10.1. Kütle korunumu için kullanılan kontrol hacmi.....	120
Şekil 10.2. Enerji korunumu için kullanılan kontrol hacmi.....	121
Şekil 10.3. Ekserji analizi için kullanılan kontrol hacmi.....	123

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucuların karşılaştırılması.....	23
Tablo 5.1. Çeşitli geometrik şekiller için B_n ve μ_n ifadeleri.....	45
Tablo 6.1. Duyulur ısı depolama maddelerinin C_p ve ρ değerleri.....	57
Tablo 6.2. Isı depolama tekniğinde kullanılan faz değişim malzemeleri ve özellikleri....	64
Tablo 6.3. Isı depolama tekniğinde kullanılan faz değişim malzemeleri ve özellikleri....	65
Tablo 6.4. Tuz hidratlara ilave edilen katkı maddeleri.....	66
Tablo 6.5. Kalsiyum klorür heksahidrat'ın fiziksel özellikleri.....	68
Tablo 6.6. Bazı parafinler ve bunların fiziksel özellikleri.....	70
Tablo 6.7. Bazı yağ asitleri ve bunların fiziksel özellikleri.....	71
Tablo 7.1. Basınç modülünün teknik özellikleri.....	81
Tablo 7.2. Akış sensörünün teknik özellikleri.....	81
Tablo 7.3. Kütle değişimini ölçmek için kullanılan sensörünün teknik özellikleri.....	82
Tablo 7.4. Nem sensörünün teknik özellikleri.....	82
Tablo 7.5. Kurutma deneyleri sırasında meydana gelen toplam hata miktarları.....	86
Tablo 9.1. Literatürde bulunan kuruma eğrisi modelleri.....	109
Tablo 9.2. 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri.....	111
Tablo 9.3. 1. 5 m/s kurutma havası hızında ve 1.5 m/s kurutma havası hızında FDM'li kollektörle kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri.....	112
Tablo 9.4. 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri.....	113
Tablo 9.5. 1. 5 m/s kurutma havası hızında ve doğal şartlarda kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri.....	114
Tablo 9.6. Üzüm için farklı kurutma koşullarında Midilli modelinde yer alan katsayılar ve istatistiksel değerler.....	115
Tablo 9.7. Üzüm için nem içeriği - kuruma hızı değişimini veren model ve istatistiksel Değerler.....	117

Tablo 9.8. Üzüm örnekleri için farklı kurutma şartlarında difüzyon katsayısındaki değişim.....	119
Tablo 10.1. Üzüm kurutma deneylerinde kurutucunun EKO ve ekserjetik verim değerleri.....	126
Tablo 10.2. Üzüm kurutma deneylerinde kurutucunun EKO ve ekserjetik verim değerleri.....	127
Tablo 10.3. Üzüm kurutma deneylerinde kurutucunun EKO ve ekserjetik verim değerleri.....	128

SİMGELER

A	Ürün yüzey alanı (m^2)
c	Özgül ısı (kJ/kgK)
C	Mol derişikliği ($kmol/m^3$)
C_p	Havanın ısı kapasitesi($kJ/kg^{\circ}C$)
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
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_D	Kütle geçiş katsayısı (m/s)
I	Eğik düzlem üzerine gelen toplam ışıınım (W/m^2)
$K_{,k}$	Kuruma sabiti (1/s, 1/saat)
K_h	Kurutma havasındaki su konsantrasyonu (kg/m^3)
K_y	Ürünün yüzeyindeki su konsantrasyonu (kg/m^3)
$\dot{m}$	Havanın kütleel debisi (kg/s)
$\dot{m}_s$	Birim zamanda üründen ayrılan su buharı (kg/s)
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_h	Kuru havanın molekül ağırlığı ($kg_{su}/kg_{katımadde}$)
M_s	Suyun mol ağırlığı (kg/kmol)
N	Deneyisel veri sayısı
P	Basınç (N/m^2)
P_b	Havadaki su buharının kısmi basıncı(N/m^2)
P_b'	Yaş termometre sıcaklığındaki buhar basıncı(N/m^2)
$\dot{Q}$	Birim zamandaki ısı akısı (kW)
Q_f	Faydalı enerji (kW)
q_b	Suyun buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
q''_b	Yaş termometre sıcaklığında suyun buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
R	Evrensel gaz sabiti (J/molK)
R_b	Su buharının gaz sabiti (J/kgK)

t	Zaman (s, saat)
T	Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (°C)
T_m	Ortalama hava sıcaklığı (°C)
T_s	Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı (°C)
U_L	Toplam ısı kayıp katsayısı (W/m ² K)
v	Akışkan hızı (m/s)
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
MR	Nem oranı
η	Etkinlik
η_{ex}	Ekserjetik verim
$(\tau\alpha)$	Yutma geçirme oranı

Alt İndisler

o	Çevre
ϕ	Kollektör çıkış
g	Kollektör giriş
h	Hava
k	Katı
$k\phi$	Kurutucu çıkış
$k\phi_{ek}$	Kurutucu tarafından çekilen
kg	Kurutucu giriş
m	Örneğin merkez şartları
$n\ddot{u}$	Nemli ürün
s	Su

ÖZET

Doktora Tezi

ÇEKİRDEKLİ ÜZÜM KURUTMADA GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ DÖNEL AKIŞLI KURUTUCU TASARIMI

Gülşah ÇAKMAK

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
2007, Sayfa:131

Bu çalışmada, güneş enerjisi destekli dönel akışlı yeni bir kurutma sistemi tasarlanarak, Elazığ yöresinde yetişen üzümlerin yapay olarak kurutulması durumunda kuruma parametreleri deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma amacıyla yeni tip havalı güneş kollektörü, FDM'li kollektör ve kurutma kabininden oluşan güneş enerjili kurutma sistemi geliştirilmiştir.

Çalışma kurutmanın önemi ve kurutucu çeşitlerine giriş, daha sonra sırasıyla literatür, güneş enerjisi ile kurutma sistemleri, güneş kolektörleri, kurutma teorisi, güneş enerjisi depolama yöntemleri, deneysel çalışma ve yöntem, deneysel verilerin değerlendirilmesi, kuruma eğrilerinin matematiksel olarak modellenmesi, enerji ve ekserji analizi ve sonuç ve öneriler olarak onbir bölümden oluşmuştur.

Çalışmanın sonunda geliştirilen havalı güneş kollektörlü dönel akışlı kurutucuda kurumanın üniform bir şekilde gerçekleştiği ve dönel akış ortamında kurutulan ürünlerde klasik sisteme göre daha kısa sürede ve daha düşük nem değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Farklı hava hızlarında yapılan deneylerde kurutma havası hızının artmasıyla kuruma süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca; kurutucu içerisine hava yönlendirme elemanları, kurutma odası girişine ise dönel eleman yerleştirilerek kurutma deneyleri yapılmış ve açık havada doğal şartlarda yapılan kurutma deneyleri ile kuruma süresi bakımından karşılaştırılmıştır. Buna göre doğal şartlarda 200 saat olan kuruma süresinin, 1.5 m/s hava hızı için dönel akışlı kurutucuda, geliştirilen havalı güneş

kolektörünün ve FDM' li kolektörün birlikte kullanılması durumunda 56 saate düştüğü görülmüştür.

Kurutma deney sonuçlarından elde edilen kurutma eğrilerinin matematiksel modellenmesi lineer olmayan regresyon analiz yöntemiyle yapılmış, deneysel ve teorik değerlerin uyum içerisinde olduğu görülmüştür. İmal edilen kurutucu için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Kurutma, FDM, Çekirdekli Üzüm, Modelleme

ABSTRACT

PhD Thesis

DESIGN OF SOLAR DRYER SYSTEM WITH SWIRLING FLOW FOR DRYING SEEDED GRAPE

Gülşah ÇAKMAK

Firat University
Graduate School of Science and Technology
Department of Mechanical Engineering
2007, Page:131

In this thesis, a new solar dryer system with swirling flow was developed and the drying parameters were investigated for artificially drying of grapes growing in Elazığ province. For experimental study, drying system with solar energy including the developed air solar collector, FDM collector, and drying cabin was used.

The study consists of eleven sections. The sections provides the important of drying and drying types, scanning the literature, dryer systems with solar energy, solar collectors, dryer theory, methods of storing solar energy, experimental study and method, the evaluation of obtained experimental results, mathematically modeling of drying curves, energy and exergy analysis, results and suggestions, respectively.

At the final of the study, the obtained all results was compared. It was observed that drying by the developed dryer with swirl flow and air solar collector appeared in uniform way and crops being dried at swirling flow environment dried in less time and reached less moisture values. In the experiments realized in different speed, it was determined that drying time reduces as increasing the drying air speed. In addition, by putting air ventilation components into dryer and swirl components on the entrance section of the drying room, drying experiments was carried out also. Drying experiments realized at open air under natural conditions and drying time was

compared. Accordingly, while drying time under natural conditions was 200 hours, by using together the developed solar collector and FDM collector at drying with swirling flow with air speed 1.5 m/s it was observed that drying time reduced to 56 hours.

From the drying experimental results, the mathematical modeling of drying curves was carried out by nonlinear regression analysis methods. It was found that the obtained experimental and theoretical values were in harmony with one another. Energy and exergy analyze of the manufactured drying system was realized and the obtained results was interpreted.

Keywords: Solar Energy, Drying, FDM, Seeded Grape, Modeling.

1. GİRİŞ

İnsanların beslenmesinde önemli yere sahip olan tarımsal ürünlerin korunması önemli olup, üretiminden tüketimine kadar birtakım kayıplara uğradığı bilinmektedir. Örneğin tahıllarda, hasattan kullanıma kadar meydana gelen kayıpların yıllık üretimin %10'unu oluşturduğu ve meyve ve sebzedeki kayıpların ise yıllık üretimin %35-40'ına ulaştığı tahmin edilmektedir. İnsanlık için besin maddelerinin yitirilmesinden ötürü karşılaşılan zararın yanı sıra, üreticinin ekonomik açıdan uğradığı kayıplar da küçümsenemeyecek boyuttadır. Üretimden tüketime aktarılacak besin maddeleri miktarının en yüksek düzeyde kalmasını sağlamak amacıyla uygulanan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu uygulamalar tarladan sofraya kadar olan geniş bir alanı kapsamaktadır. Tarımsal ürünlerin korunması ve kullanılabilir ekonomik ömürlerinin arttırılmasında uygulanabilecek çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler;

- Pastörize (mikroorganizmaları yok etme veya gelişmelerini durdurma)
- Soğutma (solunum miktarını azaltma)
- Atmosfer kontrolü (ürünün etrafındaki atmosfer koşullarında O₂ oranının azaltılıp, CO₂ oranının artırılması)
- Kimyasal uygulamalar (propionic, acetic, bulytic ve formic asit gibi organik asitler ve amonyak gibi maddelerin ürünlerin kurutulmasında kullanılması)
- Beta ve Gamma ışınları (bu ışınlarla mikroorganizmalar iyonlaştırılır ve öldürülür)
- Kurutma (ısı ve hava hareketi yardımıyla nemin uzaklaştırılması) dır.

Bunlardan en çok kullanılan ve en ekonomik olanı kurutma yöntemidir. Kısaca ürünlerin bünyesinden nemin uzaklaştırılması işlemi olarak tanımlanan kurutma, giderek önemini artırmaktadır[1].

Geleneksel kurutma teknolojisinde gerekli enerji çeşitli doğal enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Yüksek enerji maliyetleri, petrol ve türevi enerji kaynaklarının pahalı ve dışa bağımlı olması buna karşılık ülkemizin zengin sayılabilecek güneş enerjisi yoğunluğuna sahip olması ve tarımsal ürünlerin kurutma süresinin güneş enerjisinin yoğun olduğu dönemlere rastlaması, güneş enerjisinin kurutma işleminde öncelikli enerji kaynağı olarak kullanılmasını gittikçe daha çok gerekli kılmaktadır[2]. Güneş enerjili sistemlerle kurutma yapılması düşünüldüğünde, kurutmanın yapılacağı bölgenin iklim özellikleri dikkatle incelenmelidir. Çeşitli iklim özellikleri ve güneş ışıınımı yoğunluğu, güneşli kurutucuların tasarımını ve performansını etkileyen en önemli unsurlar olmaktadır.

Türkiye 40° kuzey ve 40° güney enlemleri arasında güneş kuşağı içerisinde yer almakta ve güneş enerjisi bakımından zengin bir ülke durumunda bulunmaktadır. Güneş enerjisi

potansiyeli ve güneşlenme süresinin yüksek olmasına karşılık düşük ve orta sıcaklık uygulamalarında sınırlı sayıda kullanılmaktadır. Sanayinin toplam enerji ihtiyacının karşılanmasında güneş enerjisinden yalnızca % 0.1 oranında faydalanılmaktadır. Ülkemizde güneş enerjisi uygulamaları ağırlıklı olarak, güneş toplayıcıları vasıtasıyla düşük sıcaklıkta sıcak su ve sıcak hava üretimi ile sınırlı kalmıştır. Güneş enerjisi uygulamaları; sıcak su üretimi, bitkisel ürünlerin soğutulması ve kurutulması, pişirilmesi, deniz suyunun damıtılması, elektrik üretimi, hacim ısıtılması ve soğutulması, sulama suyunun pompalanması, endüstriyel işlem ısısı üretme, fotokimyasal ve fotosentetik çevrimlerin gerçekleştirilmesi olarak sıralanabilir.

Güneş enerjisinin üstünlükleri olarak, yakıt masrafının olmaması, işletme maliyetinin düşük olması, proses ısısının istenilen sıcaklıkta doğrudan elde edilmesi, enerji kaynağının tükenmez oluşu ve en önemlisi çevreyi kirletmemesi sayılabilir. Dezavantajları ise; geniş kullanım alanlarına ihtiyaç duyulması, kullanılabilir enerjileri dönüştürme teknolojisinin henüz tam olarak yaygınlaşmaması, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve gelen enerjinin kesikli ve değişken olmasıdır. Bu dezavantajların ortadan kaldırılması için gerekli teknolojiler üzerinde bilimsel çalışmalar devam etmektedir

Dünyada ticareti yapılan kurutulmuş sebzelerin %97-98'i kontrollü koşullarda sıcak hava ile kurutulmuş durumdadır. Sıcak hava ile kurutulmuş bu sebzeler üstün kalitelidirler ve tüketilmeye hazır durumdadırlar. Ülkemizde sebze ve meyve kurutma işlemi genellikle güneş altında yapılmaktadır. Doğal bir kurutma yöntemi olan güneş altında yayararak kurutma işlemi sonucunda da sebze ve meyvelerde istenilen kalite özelliklerine ulaşılmaktadır. Fakat bu yöntem ürünlerin uzun süreler içinde kurutulmasına olanak verdiğinden ve dış ortamdan direkt olarak etkilendiğinden tozlanma, mikroorganizma üremesi, bozulma ve yerel meteorolojik şartlara bağlılık gibi birçok dezavantajları vardır. Ekonomik açıdan iç ve dış pazarda, meyvelerin bu şekilde kurutulması sonucu kalite ve değer kaybı gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Diğer ülkelerle rekabet edebilmek, hijyenik koşulları sağlayan ürünler üretmekle bağlantılı olduğundan, gelişmiş teknoloji ve üretim yöntemlerinin de kurutma işlemlerine uygulanması zorunlu görülmektedir. Bu da kurutma tesis ve sistemlerinin gerekliliğine ve artırılmasına bir işaret olmaktadır. Alternatif kurutma yöntemleri genel olarak sıcak hava ile kurutma, vakumla kurutma, güneş kolektörleri yardımıyla kurutma ve mikrodalga ile kurutma olarak sıralanabilir.

Birçok gıda muhafaza yöntemi arasında kurutmanın yeri ve ayrıcalıkları değişik açılardan irdelenebilir. Her şeyden önce, gıdadaki mevcut su, onun bozulmasına olanak vermeyecek bir düzeye kadar azaltıldığı için kesin bir muhafaza olanağı doğmaktadır. Kurutulmuş gıdalar, diğer saklama yöntemlerinden farklı olarak besin öğeleri açısından yoğunlaştırılmış bir nitelik kazanmaktadır. Ayrıca kurutma en ucuz saklama yöntemidir. Kurutulmuş gıda üretiminde, daha az işçilik ve daha az ekipman gerektiği gibi bunların

depolanması ve taşınmasında da daha az masraf yapılır. Ayrıca kurutulmuş ürünlerin çoğunun özel kullanım alanları vardır. Örneğin birçok ülkede büyük bir endüstri halinde gelişmiş olan kuru çorba üretiminin hammaddesi, kurutulmuş çeşitli sebzelerdir.

Üzüm, kurutularak muhafaza edilen ürünlerin başında gelir. Kurutulacak üzümlerin belli bir olgunlukta olması gerekir. Suda çözünen kuru madde miktarı % 22–23 olduğunda üzümler hasat olumuna gelmiş demektir. Üzümler kurutma mahalline geldiğinde doğrudan doğruya veya bandırılarak güneşte kurutulurlar. En çok uygulananı bandırılarak güneşte kurutulmasıdır.

Önemli bir tarım türü olan bağcılığın yapılabilmesi için en uygun koşullar, dünyada 34-49 kuzey ve güney enlem dereceleri arasında yer almaktadır. 36-42 kuzey enlem dereceleri arasında bulunan ülkemiz ise bu konumunu, iklimi ve toprak yapısıyla asmanın yetişmesi için çok elverişli bir yerde bulunmaktadır. Bu nedenle asma Anadolu’da büyük bir çeşit zenginliği göstermiş bağcılık kültürü ilk önce bu bölgede başlamış ve dünyaya buradan yayılmıştır. Yıllık sıcaklık toplamı bakımından yetersiz olan birkaç yöre dışında bugün, ülkemizin hemen her yerinde bağcılık yapılmaktadır.

Halen ülkemiz bağ alanı 567000 ha ile tarım alanlarının %2.05’ni oluşturmakta olup, üretim miktarı 3450000 tondur. Malatya ve Elazığ illerinin dahil olduğu Ortadoğu bölgesinin 38134 ha olan bağ alanının %45.8’ ni, 159955 ton olan üretiminin de %34.7’ ni bu iller oluşturmaktadır[3].

Malatya’da yaygın olarak yetiştiriciliği yapılan 20 üzüm çeşidi; siyah kurutmalık(siyah tahannebi), kuveyş, tahannebi, şam(şam topağı), mikeri, mazırım(kışlık üzüm), fazlıkerem, hacıkıran, kış kırmızısı, kırmızı üzüm, sıvırık, köhnü(Arapkir siyahı), aşık beyazı(Arapkir beyazı), Amasya(kışlık Amasya, ağın üzümü), şabikkara(sıkara,yerlikara), güzkarası, azezi, kabarcık(alışar), ekşikara ve alkara’dır.

Elazığ ili bağ alanlarında yetiştirilen 15 üzüm çeşidi ise; tilki kuyruğu, kış üzümü(kış kırmızısı), kırmızı şam, papazkarası, keçi memesi, öküzgözü, boğazkere, şilfoni, kırmızı üzüm, tahannebi, ağın üzümü (Amasya, kışlık Amasya), kızılalım, köhnü, aşık beyazı ve Besni’dir[4].

Üzümlerin kurutulmasında dünyada ve ülkemizde değişik kurutma uygulamaları söz konusu olmaktadır. Bunları temelde doğal ve yapay kurutma yöntemleri olarak ayırabiliriz. Ülkemizde uygulanan yöntem birkaç küçük çaplı uygulama dışında doğal kurutma olmaktadır. Bunun yanında sergiden toplanan kuru üzümlerin işlenmesi sırasında temizliğin sağlanması bakımından işleme tesislerinde bir ön yıkama ve daha sonra yapay kurutma uygulanmaktadır.

Ülkemiz önemli bir meyve ve sebze potansiyeline sahip olup, özellikle üzüm, kaysı ve biber gibi ürünler gerek iç ticarete ve gerekse ihracatta büyük önem taşımaktadır. Ancak bu

ürünlerin kuruma ve kalite sorunları henüz çözümlenmemiştir. Bu nedenle kaliteli ürün üretimi için en önemli aşama olan kurutma işlemi bu araştırmanın konusu olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada gıda maddelerinin bozulmadan uzun süre saklanabilmesi amacıyla uygulanan saklama yöntemleri arasında en önemli yeri tutan kurutma işleminin üzüm üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Potasa daldırma çözeltisi ile muamele edilen çekirdekli üzümün yeni geliştirilen güneş enerjisi destekli dönel akışlı kurutma sisteminde kurutma işlemine tabi tutulması sonucunda kurutma parametreleri incelenmiştir ve açık havada doğal şartlarda yapılan kurutma deneyleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen nem oranı eğrileri literatürde mevcut bulunan altı farklı nem oranı denklemi ile karşılaştırılmış ve en uygun sonucu veren model deney sonuçlarını ifade etmek için kullanılmıştır. Literatürde mevcut modeller deney sonuçlarına göre elde edilen nem oranı değerleri için incelenirken korelasyon katsayısının (R) en yüksek olduğu ve RMSE ve χ^2 değerlerinin en düşük olduğu model tespit edilmiştir. Üzüm kurutma deneylerinde kurutma havası hızı ve kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklık farkına bağlı olarak difüzyon katsayısının modellenmesi Arrhenius fonksiyonu ile yapılmıştır. Kuruma hızı ile nem içeriğinin değişimi ise üssel bir fonksiyonla modellenmiştir.

İmal edilen kurutucu için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir ve yedi farklı durumda gerçekleştirilen kurutma deneylerinde enerji kullanım oranı (EKO) ve ekserjetik verim değerleri kurutma süresi boyunca saatlik zaman dilimleri halinde verilmiştir.

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Güneş enerjisi ile kurutma ve ısı depolama ile ilgili bir çok çalışma yapılmış ve bu çalışmaların bir bölümü aşağıda verilmiştir.

Garba ve arkadaşları (1990), indirekt pasif kabinet tipi güneş kurutucusu, taş yataklı ısı depolu indirekt pasif kabinet güneş kurutucusu, direk pasif kabinet güneş kurutucusu, karmaşık direkt ve indirekt pasif kabinet güneş kurutucusu olmak üzere dört adet pasif güneş kurutucusu geliştirmişlerdir. Bu kurutucularda balık ve meyvenin kurutulmasıyla kurutma işlemini incelemişlerdir.

Yaşartekin (1991), kabinet tipi güneşi dikey ekseninde belirli aralıklarla izleyen güneş enerjili kurutucu ile elma kurutma deneylerinde kurutucunun kullanım olanaklarını ve verimliliklerini incelemiş ve açık havada kurutmaya karşılaştırmıştır. Kurutucuda kurutma hızının doğal kurutma hızından daha düşük olmasını kurutucu içerisinde hava dolaşımının zayıf olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir.

Ayvaz (1992), tarımsal ürünlerin kurutulması amacıyla güneş enerjisinden yararlanan zorlanmış taşınımlı hava ısıtıcı kollektörlü endüstriyel kabinet tipi bir kurutucunun tasarımı ve imalatını yaparak denemişlerdir. Deneylerde tarımsal ürün olarak değişik miktarlarda tekniğine uygun hazırlanmış halka haline getirilmiş elma değişik çalışma koşullarında kurutulmuş ve aynı ışınlam şartlarında eşzamanlı olarak açık havada kurutulan ürünün kuruma zamanı, kuruma hızı ve ürün kalitesi açısından karşılaştırılmıştır.

Sarkar ve Saleh (2002), yaptıkları çalışmada besin kurutmak için PV ile çalışan zorlanmış konveksiyonlu güneş enerjili kurutucu sonuçlarını sunmuşlardır. Plastik kaplamalı düz levha güneş kolektörü, kurutma odası ve 20 W_p solar modül ile güçlendirilen DC fan içeren kurutma sisteminde zorlanmış konveksiyon için solar PV panel kullanılmıştır. Bu çalışmada çevreye göre yaklaşık 30 °C sıcaklık artışı sağlanmıştır.

Othman ve arkadaşları (2006), yaptıkları çalışmada 4 çeşit güneş enerjisi destekli zorlanmış taşınımlı kurutucunun dizaynı ve performansını araştırmışlardır. Çalışmada kabin tipi kurutma odası kullanılmıştır. Bu sistemler; V-oluklu güneş kolektörü, depolamayla birleştirilmiş çift geçişli güneş kolektörü, tıbbi bitkiler için güneş enerjisi destekli kurutma sistemi ve fotovoltaiik termal kolektör(PVT) sistemleridir. V-oluklu kolektör kırmızıbiber, yeşil çay ve kuru meyve gibi tarım ürünleri için uygun bulunmuştur. Depolama sistemiyle birleştirilmiş çift geçişli solar kolektörün çıkış sıcaklıkları ilkiyle karşılaştırıldığında daha yüksek bulunmuştur. Bu kurutma sistemi yağlı hurma yaprağı gibi kuru hayvan yemi için ve diğer yüksek sıcaklık kurutma işlemleri için kullanılmaktadır. PVT sistemi termal ve elektrik enerjisini aynı anda üretmektedir. Fotovoltaiik hücrelerin sayısı yerel yükleme taleplerine bağlı olarak

ayarlanabilmekte ve hybrid sistemler kullanılarak dış elektrik kaynağı ihtiyacı giderilmektedir. Bu kurutma sistemlerinin avantajları ısı depolama, yedek enerji kaynağı, birleştirilmiş yapı kontrol sistemi ve geniş oranda tarımsal ürünler için kullanım olarak rapor edilmiştir.

Azharul Karim ve arkadaşları (2006), kurutma uygulamaları için V-oluklu güneşli hava kolektörünün performansını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar düz levha güneş kolektörüyle karşılaştırıldığında V-oluklu kolektörün termal veriminin daha iyi olduğunu göstermiştir. Termal performans üzerinde işlem değişkenlerinin etkisi incelenmiş ve kolektör verimi ve çıkış sıcaklığı düşünüldüğünde çoğu kurutma uygulamaları için V-oluklu güneş kolektörünün tavsiye edilebilir nitelikte olduğunu belirtmişlerdir.

Fadhel ve arkadaşları (2005), Sultani üzüm çeşidini üç farklı güneş enerjisi sistemi kullanarak kurutma işleminin analizini yapmışlardır. Üzümler sırasıyla doğal konveksiyonlu güneş enerjili kurutucu da, güneşli tünel sera altında ve açık güneş altında kurutulmuştur. Sonuçta solar tünel sera altında kurutmanın doğal konveksiyon solar kurutma işlemine rakip ve memnun edici olduğu rapor edilmiştir. Güneşli tünel sera altında kurutma ve doğal konveksiyon solar kurutma sistemlerinde kurutma sırasıyla 5 ve 4 gün sürmüştür. Ancak büyük kurutma kapasitesi ve ilk yatırım maliyeti veya ek masraflarının olmamasından dolayı sera kurutmanın daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Dinçer ve arkadaşları (2004), kurutulan ürün maddeleri için nem dağılımını ve nem transfer katsayılarını tanımlamak için geliştirilen Biot sayısı-Dincer sayısı(Bi-Di) bağıntısını sunmuşlardır. Literatürdeki çeşitli kaynaklardan alınan deneysel verilerin büyük bir kısmı bu bağıntının gelişimi için kullanılmıştır. Boyutsuz nem dağılımları mevcut deneysel ölçümler ile katı dilim, silindir ve küre gibi düzgün şekilli maddelerin doğruluğunu kanıtlamak için bulunmuş, bağıntıdan tahmin edilen değerler ve ölçülen deneysel incelemeler arasında yüksek uyumluluk olduğu görülmüştür.

Togrul (2005), açık güneşte kurutma şartlarında (doğal konveksiyon) ürün kurutmadaki konvektif ısı transfer katsayılarını bulmak için sakız kabağı, patlıcan, mısır, yeşil fasulye, arnavut biber, yeşilbiber, patates, soğan ve armut olmak üzere 9 ürün kullanmıştır. C ve n sabitlerini deneysel verilere göre lineer regresyon analiziyle bularak bu sabitlere göre konvektif ısı transfer katsayılarını tanımlamıştır. Çalışılan ürünler için konvektif ısı transfer katsayılarının 0,25-3,3 W/m²°C aralarında üründen ürüne değiştiğini rapor etmiştir.

Toğrul ve arkadaşları (2004), doğal şartlar altında kurutma süresince meyvelerin davranışını tanımlamak için 27–43°C çevre sıcaklığı ve 0.72–2.93 MJ/m²h güneş ışınımında erik, şeftali, üzüm, incir ve SO₂ veya NaHSO₃ ile kükürtlenmiş kaysı üzerinde açık güneşte kurutma deneyleri yapmışlardır. Meyvelerin kuruma oranlarına uygun 12 matematiksel model denemişlerdir. Modeller arasında incir ve kaysı (ön işleme tabi tutulmamış veya SO₂ ile

kükürtlenmiş) için difüzyon modeli yaklaşımı, erik, üzüm ve kaysı(NaHSO_3 ile kükürtlenmiş) için düzeltilmiş Henderson ve Pabis modeli yaklaşımı, şeftali için Verma ve arkadaşları tarafından önerilen model yaklaşımı meyvelerin açık güneşte kurutma davranışlarını açıklamak için en uygun modeller olarak bulunmuştur.

Raisul Islam ve arkadaşları (2003), bir boyutlu sıvı difüzyon modelini kullanarak ürün yüzey sıcaklığı ve kuruma oranının tahminlerini büzülmenin etkisini hesaba katarak tanımlamışlardır. Model olarak düşük sıcaklıkta konvektif olarak kurutulan patates dilimleri kullanılmıştır.

Vagenas ve arkadaşları (1991), meyve ve sebze kuruma kinetiğini üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanarak çalışmışlardır. Denklem sistemleri aynı zamanda kuruma boyunca numunenin büzülmesini de içermektedir. Yapılan model tahminleri sebze ve meyvelerin deneysel nem içeriğini doğrulamıştır. Difüzyon katsayısı ve difüzyonun aktivasyon enerjisi için literatürdeki değerler ile bu çalışmada bulunan sonlu eleman çözümleri uyumluluk göstermiştir.

Gallali ve arkadaşları (2000), üzüm, incir, domates ve soğanın doğal ve güneş enerjili kurutma sisteminde kurutulmasıyla kül içeriği, nem, ekşilik, toplam şeker azalımı ve C vitamini gibi kurutulan numunelerin bazı kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Güneş enerjili kurutma sisteminde kurutulan üzümlerin doğal kurutmaya göre incelenen bütün kalite özellikleri için daha yüksek uygunluk gösterdiği rapor edilmiştir.

Garg ve arkadaşları (2000), yarı silindirik tünel kurutucunun kolektörünün termal performansını ve modellemesini çalışmışlardır. Hacimsel debi ve giren havanın sıcaklığındaki artış dizayn parametrelerine göre doğal sirkülasyon modu için optimize edilmiştir. Aynı zamanda farklı eğimler için kolektör performansları hesaplanmış ve doğal ve zorlanmış sirkülasyonlar için performans hesapları yapılmıştır.

Hussain ve arkadaşları (2004), silindirik nesnelerin kuruma süresince ısı ve kütle transferinin iki boyutlu sayısal analizini yapmışlardır. Silindirik nesnelerin kuruma süresince ısı ve kütle transferinin iki boyutlu sayısal analizi explicit sonlu fark yaklaşımını kullanmışlardır. Nemli nesnenin içindeki sıcaklık ve nem dağılımları farklı zaman periyotları için bulunmuş ve sunulan analizdeki sonuçlar literatürdeki mevcut deneysel verilerle karşılaştırıldığında oldukça iyi uyum sağlandığı görülmüştür.

Doymaz (2005), laboratuvar tipi bir kurutucuda siyah üzümlerin ince tabaka kurutma davranışını incelemiştir. 1.1 m/s hava hızı ile 60 °C’ de kurutulan siyah üzümlere çeşitli ön işlemler uygulamış ve siyah üzümlerin ethyl oleate+potasyum karbonat çözeltisine batırılmasıyla en kısa kurutma zamanı (25 h) elde edilmiştir. Farklı ince tabaka kurutma modelleri (Lewis, Page, Handerson, Pabis) çeşitli çözeltiyle ön işleme tabi tutulmuş siyah

üzümlerin nem değişimi için uygulanmış ve siyah üzümlerin tanımlanan kurutma eğrileri için en uygun modelin Page modeli olduğu tespit edilmiştir.

Torres ve arkadaşları (2003), sundukları çalışmada güneş enerjili kurutma işlemlerinin termal performans analizlerini incelemişlerdir. Deneysel dolaylı güneş kurutucu cihazının termal karakteristiği için yarı amprik modeller tanımlamışlardır. Güneş enerjisinin termal değişimi boyunca minimum entropi üretimini tanımlama temeline dayanan dizayn edilen güneş kolektör için basitleştirilmiş bir metod geliştirmişlerdir. Ayrıca güneş enerjili kurutucunun başlangıç dizaynının sonuçlarını termodinamiğin ikinci kanunundan türetilen metod ve termal analiz işlemi kullanarak incelemişlerdir.

Matteo ve arkadaşları (2004), sundukları çalışmada çekirdeksiz üzümlerin kuruma oranını artırmak için aşındırıcı bir madde kullanarak üzüm kabuğunu aşındırarak alternatif fiziksel bir metod denemişlerdir. Bu yeni işlemin etkinliğini geleneksel etil oleate çözeltisine daldırılmış üzüm kurutma işlemiyle karşılaştırmışlardır. Ayrıca bu iki ön işlemin kurutma kinetiğini üzüm kabuğundaki suyun dağılımını da hesaba katan üzüm ön işlemindeki matematiksel modeli kullanarak tekrar yapılandırmışlardır. Aşınma metodu geleneksel metoda göre daha etkili bulunmasına rağmen sonuçtaki ürün daha koyu renkte elde edilmiştir ve bu da tüketici tarafından daha az tercih edilen bir durumdur.

Kaymak ve arkadaşları (2004), yaptıkları çalışmada 30 °C, 45 °C ve 60 °C’ de üzüm, kaysı, elma ve patates için nem sorpsiyon izotermelerini tanımlamışlardır. Sorpsiyon denklemlerinin sabitlerini hesaplamak için nonlinear regresyon analiz metodunu kullanmışlardır. Halsey denklemi incelenen su hareketi ve sıcaklık oranları üzerinden denenen bütün maddeler için deneysel sorpsiyon verilerine en iyi uygunluğu göstermiştir. GAB modeli patates ve üzümler için sorpsiyon verilerine en yakın model olarak belirlenmiştir. Bu modellerin deneysel ve tahmin edilen değerleri arasındaki uyumluluk memnun edici görülmüştür.

Mathioulakis ve arkadaşları (1998), endüstriyel tip tepsili hava kurutucusu imal etmişlerdir. Kurutma odası içerisindeki hava hareketini sayısal akışkan dinamiği(CFD) ile simule etmişlerdir. Ürünlerin üzerindeki kurutma odasındaki hava hızları ve basınç profilleri CFD ile tanımlanmış ve ürünlerin üzerinde hava hızlarının homojen olmadığı görülmüştür. Kurutma deneyleri birkaç meyve için yapılmış ve kuruma sonuçları ağırlık kaybına bağlı olarak ifade edilmiştir. Bir kaç tepsideki kuruluk derecesindeki değişim, kurutma odasındaki bazı bölgelerdeki üniform olmayan alanlarla açıklanmıştır. Kurutma deneyleri ve CFD ile bulunan veriler hava hızı ve kuruma oranı arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Bennamoun ve arkadaşları (2006), çalışmalarında dış şartların değişimine göre kurumanın kinetik davranışını incelemişlerdir. Bunun için Fick Kanunu temeline dayanan difüzyon modeli kullanmışlardır. Isıtılan havanın termofiziksel özelliklerinin değişimi ve

büzülmenin etkisini göz önüne almışlardır. Difüzyon katsayısı deneysel verilerden hesaplanmış, hız ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Ürün içindeki nem dağılımının hesabı için kütle transfer denklemi sayısal olarak çözülmüştür.

Mabrouk ve arkadaşları (2006), sabit yataklı tünel kurutucularda taneli ürünlerin ısı ve kütle transferi için sayısal model geliştirilmiştir. Kuruma işlemi deneysel kuruma kinetiği ve ince tabaka modeli temelinde gerçek işlem şartları altında simule edilmiştir. Basitleştirilmiş ısı ve kütle transferi sayısal modeli kullanılan denklemlere ve taneli ürünlerin ince tabaka yatak kuruma oranına dayanarak geliştirilmiştir. Bulunan nonlinear kısmi diferansiyel denklem sistemi sonlu hacim metodu ile sayısal olarak çözülmüştür. Simülasyonlar ince tabaka modelinde üzümlerin kurumasından elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Pahlavanzadeh ve arkadaşları (2001), İran beyaz çekirdeksiz üzümlerin kurumasını laboratuvar tip kurutucuda yığın şeklinde incelemişlerdir. Sabit hava hızında üzümlerin kuruma oranı üzerinde sıcaklık ve ön işlemin etkisini araştırmışlardır. Ön işlem çözeltileri farklı sıcaklık ve yoğunluklarda farklı alkalın maddelerini içermektedir. Alkalın çözeltilisine daldırılan üzümlerde kuruma oranının büyük ölçüde arttığı belirtilmiştir. Kurutucudaki hava sıcaklığının 60 °C'den 70 °C' ye artmasıyla önışlemlili üzümün kuruma oranı hızlanmıştır. Üzümler hava sıcaklığı ve ön işleme bağılı olarak 450-900 dakikada kurumıştır. Daha kısa kurutma zamanı ve en iyi kalitede kuru ürün 42 °C' de % 5 potasyum karbonat çözeltilisine daldırılan üzümlerde tespit edilmiştir.

Mettawee ve arkadaşları (2006), gizli ısı depolama temeline dayalı faz değişim malzemeli(FDM) güneş kolektörünün performansını incelemişlerdir. Bu kolektörde emici levha-kap birimi hem FDM depolamakta hem de güneş enerjisini absorbe etmektedir. Güneş enerjisi FDM olarak kullanılan parafin mumunda depolanmaktadır. Isı parafin mumunun içine yerleştirilen borulardan akan soğuk suya verilmektedir. Deneysel sonuçlar şarj işleminde eriyen tabaka kalınlığının artmasıyla ortalama ısı transfer katsayısının arttığını deşarj sırasında da suyun kütleli debisinin artmasıyla faydalı ısı kazancının arttığını göstermiştir.

Karathanos ve arkadaşları (1999), ince tabaka modelini kuşüzümü, sultana, incir ve erik gibi yüksek şeker içeren tarımsal ürünlerin kurumasına uygulamışlardır. Page denkleminin iki parametresini değerlendirerek taze meyvelerin kurumasını modellemek için page denklemi çözülmüştür. Page denklemindeki sapmanın tipik kuru meyveden(% 15 nem içeriği) daha düşük nem içeriği ve nispeten yüksek kuruma sıcaklıklarında şekerin çözülmesine bağılı olarak ağırlıktaki fazla azalmadan kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Kadam ve arkadaşları (2006), karnıbaharın kurutulması için güneş enerjisi destekli kurutma sistemi imal etmişlerdir. Birbirlerine paralel 4 panel düzenlemesi yaparak çevre ve

kolektör çıkış sıcaklıkları ve rölatif nem belirli aralıklarla ölçülerek kolektörlerin termal verimi hesaplanmıştır. Ortalama günlük verimin % 16. 5 civarında bulunduğu açıklanmıştır.

Kaya ve arkadaşları (2006), dikdörtgen biçimde nemli maddelerin kuruması boyunca ısı ve kütle transferinin iki boyutlu analizini nemli maddelerin bütün yüzeylerinde konvektif sınır şartı uygulayarak sonlu fark metodu kullanarak yapmışlardır. Dış akış ve sıcaklık alanları Fluent CFD paket programıyla sayısal olarak belirlenmiştir. Bu dağılımlardan konvektif ısı transfer katsayısının yerel dağılımlarını tanımlayarak termal ve konsantrasyon sınır tabakaları arasındaki ilişkiden konvektif ısı transfer katsayısı yerel dağılımları ortaya konulmuştur. Aynı zamanda nemli madde içinde ısı ve kütle transferini tanımlamak için geliştirilen denklemler kullanılarak farklı zaman periyotları için sıcaklık ve nem dağılımları tespit edilmiştir. Sunulan analizden bulunan sonuçlar literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırıldığında iyi uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir.

Olgun ve Rzayev (2000), yaptıkları çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesinde yetiştirilen fındık, tütün, mısır, gibi çeşitli ürünlerin güneş enerjisinden yararlanarak kurutulabilmesi için ucuz, çok amaçlı kullanılabilen kurutucular tasarlayarak imal etmişlerdir. Bunlardan kabinet, dolap ve çadır olmak üzere üç farklı güneş enerjili kurutma sisteminin tasarım esaslarını vermişlerdir. Bu üç kurutucuda; dalından toplanmış, nem oranı yüksek fındıklar kurutulmuş ve kuruma eğrileri verilmiştir. Çalışma sonuçları, açık havada yapılan doğal kurutma sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda açık havada 82 saat civarında fındığın kuruduğu tespit edilmiştir. Kabinet tipli kurutucuda ise ek ısıtıcı kullanılması durumunda 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığı durumda ise yaklaşık 50 saatte fındığın kuruduğu belirtilmiştir. Çadır tipli kurutucuda 73 saatte ve ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise yine 72-76 saat içerisinde fındığın kuruduğu görülmüştür. Kurutulmuş fındıklardan alınan numuneler görüntü ve tat analizine de tabi tutulmuş ürünlerde herhangi bir bozulmaya rastlanılmadığı ifade edilmiştir.

İsmail (2005), çekirdeksiz yaş üzümünün kurutulmasında, kurutmadan önce ürüne uygulanan çeşitli ön işlemlerin, kuruma hızına ve kalite üzerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla bir çalışma yapmıştır. Kurutma işlemi yatay hava akımlı bir kurutma cihazında yapılmış cihaz içindeki hava akımının hızı 1,5 m/s olarak ayarlanmıştır. Üzüm kurutmalarında potasyum karbonatın farklı konsantrasyondaki çözeltileri kullanılmıştır. Her iki çözeltiye daldırılan üzümler daha sonra 60 ve 70 °C ta hava ile kurutulmuştur. Bunun yanında kuruma süresini karşılaştırmak amacıyla aynı ürün doğal olarak aynı sıcaklıklardaki hava ile kurutulmuştur. Kurutma sırasında, üzümlerin ağırlıkları 15–20 dakika ara ile numuneler sabit tartıma gelinceye kadar kaydedilmiş ve ölçülen değerler yardımıyla kuruma eğrileri çizilmiştir. % 5 K₂CO₃-%0,5 zeytinyağı çözeltilisine daldırılarak kurutulan üzümlerin daha kısa sürede

kuruduğu saptanmıştır. Kurutulmuş üzümün renk analizleri yapılarak en iyi sonuçların yine %5 K₂CO₃-%0,5 zeytinyağı çözeltisine daldırılarak kurutulan üzümlerden elde edildiği görülmüştür.

Sarı ve Kaygusuz (2002), yaptıkları çalışmada enerji depolamak için faz değişim malzemesi olarak palmitik asitin deneysel incelemesini yapmışlardır. Basit bir boru-boru ısı değiştirgeci sisteminin performansını ve ısı transfer karakteristiklerini inceleyerek ve bulunan sonuçları literatürde verilen diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda akışkan fazındaki taşınımın ısı transferinin erime işleminde önemli bir rol oynadığı tespit edilmiş ve denenen hızlarda FDM borusuna ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ve akış debisinin faz değişim işlemi üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. FDM borusunun ısı depolama kapasitesinin yapılan çalışmada umulan kadar iyi olmadığı ve ortalama ısı depolama veriminin(ısı değiştirgeci etkinliği) % 53.3 olduğu belirtilmiştir.

Öztürk (2005), 180 m² döşeme alanına sahip serayı ısıtmak için gizli ısı depolama tekniği ile FDM olarak parafin mumu kullanarak mevsime bağlı termal enerji depolamayla ilgili bir çalışma yapmıştır. Sistem düz levha güneş kolektörü, gizli ısı depolama birimi sera, ısı transfer birimi ve veri kazancı birimi olmak üzere 4 kısımdan meydana gelmektedir. Dış ısı toplama birimi 55 ° güneye doğru eğimli 27 m² alana alana sahip havalı güneş kolektörüdür. Gizli ısı depolama birimi olarak 1.7 m çapında, 11.6 m³ toplam hacimde çelik tank kullanılmıştır. Gizli ısı depolama birimine 6000 kg parafin yerleştirilmiştir. Sistemin verimini değerlendirmek için enerji ve ekserji analizleri uygulanmıştır. Gizli ısı depolama biriminde transfer edilen ısı miktarı 1.22-2.63 kW aralığında ve depolanan ısı miktarı ise 0.65-2.1 kW aralığında bulunmuştur. Ayrıca gizli ısı depolama biriminde transfer edilen ve depolanan termal ekserji miktarının sırasıyla 111.2 W ve 79.9 W olduğu belirtilmiştir. Ortalama net enerji ve ekserji verimleri ise sırasıyla % 40.4 ve % 4.2 olarak hesaplanmıştır.

Baran ve Sarı (2003), erime ve katılaşma işlemleri boyunca faz değişim malzemesi (FDM) olarak palmitik ve stearik asitlerin ötektik karışımının faz değişim ve ısı transfer karakteristiklerini dikey iç içe iki borudan oluşan sistemde deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma üç kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak palmitik asit(PA) ve stearik asit(SA) ikili sisteminin birleşim oranlarının tanımı ve diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) yardımıyla termofiziksel özelliklerin ölçümü, ikinci olarak toplam erime ve katılaşma sıcaklıkları ve zamanı, eriyen ve katılaşan FDM' deki ısı transfer biçimleri, faz geçiş davranışı üzerinde ilk ısı transfer akışkanının şartları olarak Stefan ve Reynolds sayılarının etkisi gibi karışımın faz geçiş karakteristiklerinin tanımı, üçüncü olarak ta FDM ve ısı transfer akışkanı borusunun cidarı arasındaki ısı transfer katsayısının hesaplanması yapılmıştır. DSC sonuçları ağırlıkça %

64.2:35.8 karışım oranında PA-SA ikili sisteminin 52.3°C’ de eridiğini ve 181.7 J/gizli ısıya sahip olduğunu göstermiştir.

Jain ve Jain (2004), derin yatak kurutucu ve termal depolamayla birleştirilmiş güneşli hava ısıtıcısının zamana bağlı analitik modelini çalışmışlardır. Güneşli hava ısıtıcısının performansı derin yatak kurutma modeli yaklaşımı kullanılarak derin yatakta pirinç kurutmak için değerlendirilmiştir. Tahıl sıcaklığı üzerinde kolektörün eğim açısı, uzunluğu ve genişliğindeki değişimin etkisi incelenmiştir. Kurutma havasının nemi ve nem buharlaşma hızı tahıl yatağının farklı derinlikleri için kuruma zamanı ile analiz edilmiştir. Sonuçta yatak nem içeriğinin zamanla azaldığı ve havanın nemi ile kurutma hızının kurutma yatağındaki derinliğin artmasıyla arttığı belirtilmiştir.

Üzümün kurutulması en kolay yöntem olup kuruma sırasında kuru üzüm rengindeki kararmalar enzimsiz veya enzim etkisi ile olmaktadır. Enzimsiz kararma ve esmerleşme ilk olarak Maillard tarafından ortaya çıkarılmıştır. Maillard 1912’de renksiz glikoz ve glikolü ısıtarak esmer rengin oluştuğunu göstermiştir. Enzimatik kararmada ortdifenol enzimi rol oynamaktadır. Ortdifenol enziminin ortdifenolü oksitlemesi sonucu oluşan ortokinonun polimerizasyonu koyu renk oluşturmaktadır[37].

Bandırma çözeltisinin etkili maddesi, yağda bulunan etil esterlerdir. K_2CO_3 higroskopik özelliğinin yanı sıra çözeltinin alkaliliğini sağlar. Üzümlerin alkali+yağ çözeltisine bandırılmasındaki esas amaç dane yüzeyindeki mumsu tabakanın kimyasal yapısının bozularak su çıkışını hızlandırmak ve kurumayı normale göre 3 kat daha hızlandırmaktır. Gmcarevic ve Radler, üzümlerin kurutulmasında mumsu tabakasının önemini belirlemek amacıyla çok kapsamlı çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada üzümlerin her bir cm^2 ’sinde 0,1 mg kadar mum olduğu tespit edilmiştir. Üzüm mumunun esas bileşimi Oleanolik asittir. Diğerleri ise alkoller, yağ asitleri, uzun zincirli alkollerin esterleri, asitler, aldehytler ve az miktarda hidrokarbonlardan oluşmaktadır.

Üzüm tanesindeki wax tabakası sert ve yumuşak mum diye iki grup altında incelenmektedir. Bu nedenle sert ve yumuşak mumun ayrılması farklı kimyasal çözücülerde yapılmaktadır. Üzüm mumunda uzun zincirli aldehytler az bulunur ve kuruma sırasında bunlar bozulur. Bunun bir sonucu olarak da kuru üzümün yumuşak mum kısmının bileşimi taze üzümünkinden farklı bulunmuştur[38].

Ülkemizde kullanılan üzüm kurutma yöntemi, bandırma yapılarak güneşte kurutmadır. Bu yöntemle kurutma zamanı kısaltılarak açık renkli, elastikiyeti iyi, yüksek kalitede kuru üzüm elde edilmektedir. Kaynama noktasındaki %0.2-0.3 konsantrasyonda NaOH içeren bandırma

çözeltisine 2-3 saniye bandırılarak açık güneşte kuruyan üzümler kırmızı kahverengi renktedirler[37].

Çevre sıcaklığında yapılan bandırma işlemine soğuk bandırma adı verilmektedir. Bu işlem kurumayı hızlandırarak, üzümlerin açıkta güneşte 20 günlük kuruma süresini %50, kurutucularda ise 3-5 günlük kuruma süresini %25 oranında azaltmıştır.

Bandırma çözeltisi potasa ve zeytinyağı ile hazırlanmaktadır. Potasanın %60-75'i K_2CO_3 ; diğer kısmını ise K_2SO_4 , Na_2CO_3 , KCL ve K_2PO_4 'dan oluşmaktadır. K_2CO_3 higroskopik özellikte bir madde olması nedeniyle üzümün yapısında bulunan suyun dışarı çıkışını kolaylaştırır ve kabuktaki oleanolik asit gibi kimi serbest asitleri nötralize ederek kuruma olayını hızlandırmıştır[38]. Zeytinyağının etkili maddesi ise doymuş yağ asitlerinin etil esterleri ve serbest yağ asitleridir. Bunlar, üzüm tanesi üzerindeki mumsu (wax) tabakanın monomoleküler yapısının bozularak geçirgenliğinin artması ve bunun sonucu olarak da kurumanın daha hızlı olmasını sağlamaktadır.

Bandırılmadan doğrudan doğruya sergi yerlerine serilen üzümlerde su kaybı çok yavaştır. Kurumanın çok uzun sürede gerçekleşmesi, şeker konsantrasyonunun yavaş artmasına ve enzim aktivitesinin hızlanmasına neden olmaktadır. Böylece koyu renkte, natürel üzüme özgü bir tat da kuru üzüm elde edilir. Kararmayı önlemek için enzimin çalışmasını durdurmak oksijeni azaltmak ve polimerleşmeye engel olmak gerekmektedir[39]. Bandırma eriyiğinin hazırlanmasında zeytinyağı, pamukyağı ve ayçiçek yağının denendiği uygulamalarda en iyi sonuç zeytinyağından elde edilmiştir. Pamukyağı, zeytinyağına yakın etki göstermesine karşılık, ayçiçeği yağı kuru üzüm kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir[40].

Köylü, yaptığı araştırmada %20-22-24 ve 26 kuru madde içeriğine eriştiklerinde hasat edilen çekirdeksiz üzümlerin, %1-3-5-7-9 ve 11 K_2CO_3 konsantrasyonları ile %0.5-1.0 ve 1.5 zeytinyağı dozlarından oluşan bandırma çözeltilerine bandırıldıktan sonra, meteorolojik şartlara bağlı olarak beton sergi yerlerinde gösterdikleri kuruma özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca 6 farklı özellikteki sergilerde kurutulmuş olan çekirdeksiz üzüm örnekleri, mikrobiyal açıdan incelenerek sergiler arası hijyenik farklılıklar da ortaya konmuştur[37].

Doymaz (1998), üzüm ve biberlerin sıcak hava ile kurutulmasında değişik bandırma çözeltileri ile kalitesini yükseltmek amacıyla deneysel çalışma yapmıştır. Etiloleat(AEEO) ve POTAS çözeltilerine daldırılan üzümler daha sonra 50, 55, 60 ve 70° C' deki hava ile kurutulmuşlardır. Bunun yanında kuruma süresini karşılaştırmak amacıyla aynı ürün doğal olarak 60 ve 70° C' deki hava ile kurutulmuştur. AEEO çözeltisine daldırılan üzümlerin, gerek POTAS çözeltisine daldırılıp kurutulanlarla ve gerekse natürel olarak kurutulanlara göre daha kısa sürede kuruduğu saptanmıştır.

Saito ve arkadaşları (2001), termal enerji depolamak için kullandıkları jelleştirilmiş glauber tuzu(sodyum sülfat dekahidrat) için analitik ve deneysel çalışma yapmışlardır. Ayensu ve arkadaşları, çeşitli tropikal ürünlerin kurutma karakteristiklerini incelemek için enerji depolamalı, konvektif ısı ve kütle transferi temeline bağlı mekanik olmayan güneş enerjisi destekli kurutucu imal etmişlerdir. 32°C sıcaklıkta kurutma havasına 118 W/m² transfer edecek güçte güneş kolektörü kullanarak kurutma işlemi boyunca nem kaybını ve kurutma sabitlerini hesaplamışlardır.

El-Kashef ve arkadaşları (1999), güneş enerjisi depolama malzemesi olarak parafinin termo-optik özelliklerini tespit etmek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Cabeza ve ark[38] faz değişim enerji depolama malzemesi olarak kullanılan sodyum asetat trihidratın kristalleşmesini önlemek için kullanılan sıkılaştırıcıların termal performansa etkileri incelenmiştir.

Sarı (2003), Türkiye’de bazı bölgelerin iklim şartları altında güneş enerjisi depolamak için erime sıcaklığı yüksek olan palmitik asit(61,2°C) ve miristik asit(52,2°C)’in ağırlıkça %42 ve 58 oranlarında karıştırılmasıyla hazırlanan ötektik karışımı deneysel olarak incelemişlerdir. Bu karışımla birlikte erime sıcaklığı 42,6°C’ye düşürülmüştür ve erime gizli ısısı 169,7 J/g olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu karışımın termal karakteristikleri incelenmiştir.

Rabin ve arkadaşları (1995), %48 CaCl₂, 4.5KCL, 0.4 NaCl, ve 47.1 H₂O’ e %1 BaCl₂.2H₂O eklenerek elde edilen ötektik karışımdan oluşan faz değişim malzemesini(13.4 kg) prototip bir deney setinde güneş kolektörü yardımıyla ısı depolamak için kullanmışlardır. Güneş enerjisi tuz hidrat FDM ile depolanmış ve ısı değiştirgecinden akan soğuk suya ısı aktarımı gerçekleştirilmiştir. Birleştirilmiş kolektörün şarj işlemi için teorik model sunulmuştur. Deneysel ve teorik çalışmaların uygunluğunu göstermişlerdir. Kullanılan karışımın faz geçiş sıcaklık aralığı 27-29°C ve gizli ısısı 164.5 kJ/kg olarak tespit edilmiştir.

Kaygusuz, güneş enerjili ısı depolama tankında kalsiyum klorür heksahidrat kullanmış ve gizli ısı depolama için bu maddenin uygun olduğunu göstermiştir[13].

Akpınar (2002), siklon tipi bir kurutucunun yaş gıda kurutulmasındaki kullanılabilirliğini araştırmıştır. Dönel akış ortamında 80, 70, 60 °C kurutma havası giriş sıcaklığında, 1.5 m/s 1 m/s kurutma havası hızlarında farklı boyutlardaki patates, elma ve kabak örneklerinin kuruma kinetiğini incelemiştir. Düz akışta da tekrarlanan kurutma deneyleri sonucunda, dönel akış ortamında yapılan kurutmada kurutma süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda deneysel çalışma sonucunda bulunan kurutma eğrileri literatürde bulunan kurutma eğrisi modelleriyle karşılaştırılmış ve sonuçların çok iyi olduğu gösterilmiştir.

Mazman (2000), Adana iklim koşullarında deneysel bir yapı kurarak üç farklı yağ asidi karışımı (koko, palm pil, palm stearin) ve bir çeşit parafin (erime noktası:42-44°C) için pasif

güneş enerjisi depolama sistemi denemeleri yapmıştır. Faz değiştiren malzeme olarak denenen organik kimyasal maddelerin pasif sistemde güneş enerjisi depolama performansları ve depolanan güneş enerjisinin güneşin battığı zaman aralıklarında ortam sıcaklığı üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda koko karışımının Adana iklim koşullarında en etkili madde olduğu, palm oilin kullanımının verimli olmadığı, palm stearin ve parafinin yüksek erime noktalarından dolayı özel amaçlı kullanımlarda kullanıma uygun oldukları belirlenmiştir. Kullanılan organik maddelerin uzun erime donma döngüleri boyunca kimyasal yapısını, erime noktası aralığını ve erime entalpisini değiştirmedikleri maddeler 100 defa eritildikten sonra diferansiyel taramalı kalorimetre ve IR(infrared) sonuçları alınarak belirlenmiştir.

Sarsılmaz (1998), kaysının fiziksel ve kimyasal özellikleriyle birlikte karakteristik kuruma özelliklerinin belirlenmesi, güneş radyasyonu, dış hava sıcaklık ve nemi, havalı kolektör giriş-çıkış sıcaklıkları, kurutma odasındaki raflar arası sıcaklık ve oda içi nemi, kurutma odası giriş-çıkış sıcaklıkları ile kurutma boyunca kayısı içi sıcaklık değişimini araştırmış ve ayrıca güneş enerjisi destekli kurutucudan elde edilen kaysıların nem değişimleri ile doğal olarak açıkta kurutulan kaysılardan elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Kükürtlemenin aynı kurutucuda yapılmasıyla hem zamandan hem işçilikten kazanç sağlayan döner sütunlu silindirik kurutucu olarak adlandırılan kurutucuda açık sergilerde geleneksel kurutma ile 10 gün olan kuruma süresinin 2 güne indiği gösterilmiştir.

Akgün (1994), yaptığı çalışmada iç içe geçmiş iki silindirik borudan oluşan deney düzeneğinde $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın gizli ısı depolama kapasitesi, radyal yöndeki sıcaklık değişimi ve genleşme miktarını hesaplamıştır. Ve deneyler sonucunda kalsiyum klorür heksahidratın uzun süreli ve düşük sıcaklıkta ısı depolama için uygun olduğu gösterilmiştir.

Akarsu (2002), gün boyunca güneş enerjisinin depolanmasını sağlamak ve depolanan enerjiyi güneşin etkinliğini yitirmesinden itibaren sıcak su elde etmek için bulunması kolay ve düşük maliyetli bir tuz hidrat olan Sodyum TiyoSülfat PentaHidrat'ı ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ısı depolama materyali olarak kullanmıştır. PCM'nin güneş enerjisi ile ısıtma sistemleriyle kombine olarak çalışabildiği, kış şartlarına girilmekte olmasına rağmen güneş enerjisinin etkin bir şekilde depolanabildiği gösterilmiştir. Fakat $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 'ın 15-20 çevrim sonunda fiziksel özelliklerinde bozulmalar meydana geldiğini ve 25-30 çevrim sonucunda da faz değiştirme kabiliyetini tamamen yitirdiği belirtilmiştir.

3. GÜNEŞ ENERJİLİ KURUTMA SİSTEMLERİ

Güneş enerjili kurutma sistemleri, kurutulan ürün ve işletme şartları açısından farklılıklar göstermektedir.

Bütün kurutma sistemleri öncelikle kullandıkları sıcaklık aralığına göre yüksek sıcaklıklı kurutucular ve düşük sıcaklıklı kurutucular olarak ikiye ayrılabilir. Ayrıca, kurutucular yaygın şekilde kullandıkları ısı kaynağına da göre fosil yakıtlı (klasik kurutucular) ve güneş enerjili kurutucular olarak da sınıflandırılırlar. Pratik olarak şu ana kadar kullanılan yüksek sıcaklıklı kurutucular fosil yakıtlı olup, düşük sıcaklıklı kurutucular fosil yakıtlı veya güneş enerjisi kaynaklı olabilirler[53].

3.1. Yüksek Sıcaklıklı Kurutucular

Hızlı bir kurutmaya ihtiyaç duyulduğunda ve kurutulacak ürünün kuru hava ile kısa süre temas etmesi gerektiği durumlarda yüksek sıcaklıklı kurutucular kullanılırlar. Çalışma sıcaklıklarının çok yüksek olması nedeniyle kurutucu hava ile ürün “ürün nem dengesine” ulaşmaya kadar temas halinde kalırsa aşırı kuruma meydana gelir. Bu yüzden ürün yalnızca istenilen nem dengesine ulaşmaya kadar kurutulur ve sonra soğutulur.

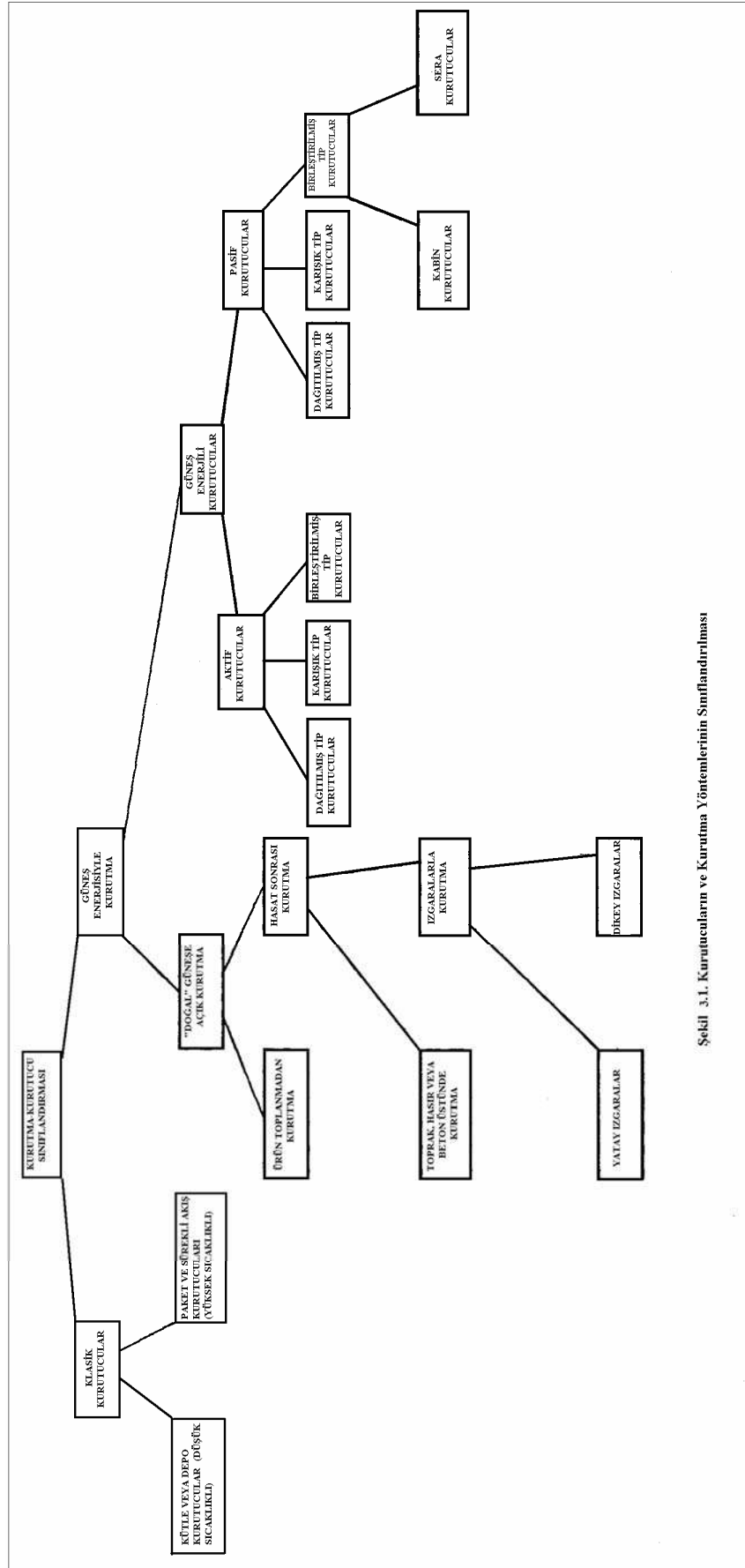
3.2. Düşük Sıcaklıklı Kurutucular

Düşük sıcaklıklı kurutma sistemlerinde ürün içindeki nem seviyesi kurutucu havadaki nem seviyesine sürekli bir kurutucu hava döngüsü ile sağlanır. Bu yüzden bu sistemler sürekli veya değişken ısı girişlerine sahiptirler. Bu yöntem ürünlerin büyük miktarlar halinde kurutulmasına imkan verdiği gibi ayrıca uzun süreli depolamalar için daha sağlıklı bir yöntemdir. Bu nedenle kitle veya depolama kurutucuları olarak da adlandırılabilirler. Isı girişlerindeki uzun süreli kesintilere toleranslı olması bu yöntemi güneş enerjili uygulamalar için elverişli kılmaktadır[54].

3.3. Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinin Sınıflandırılması

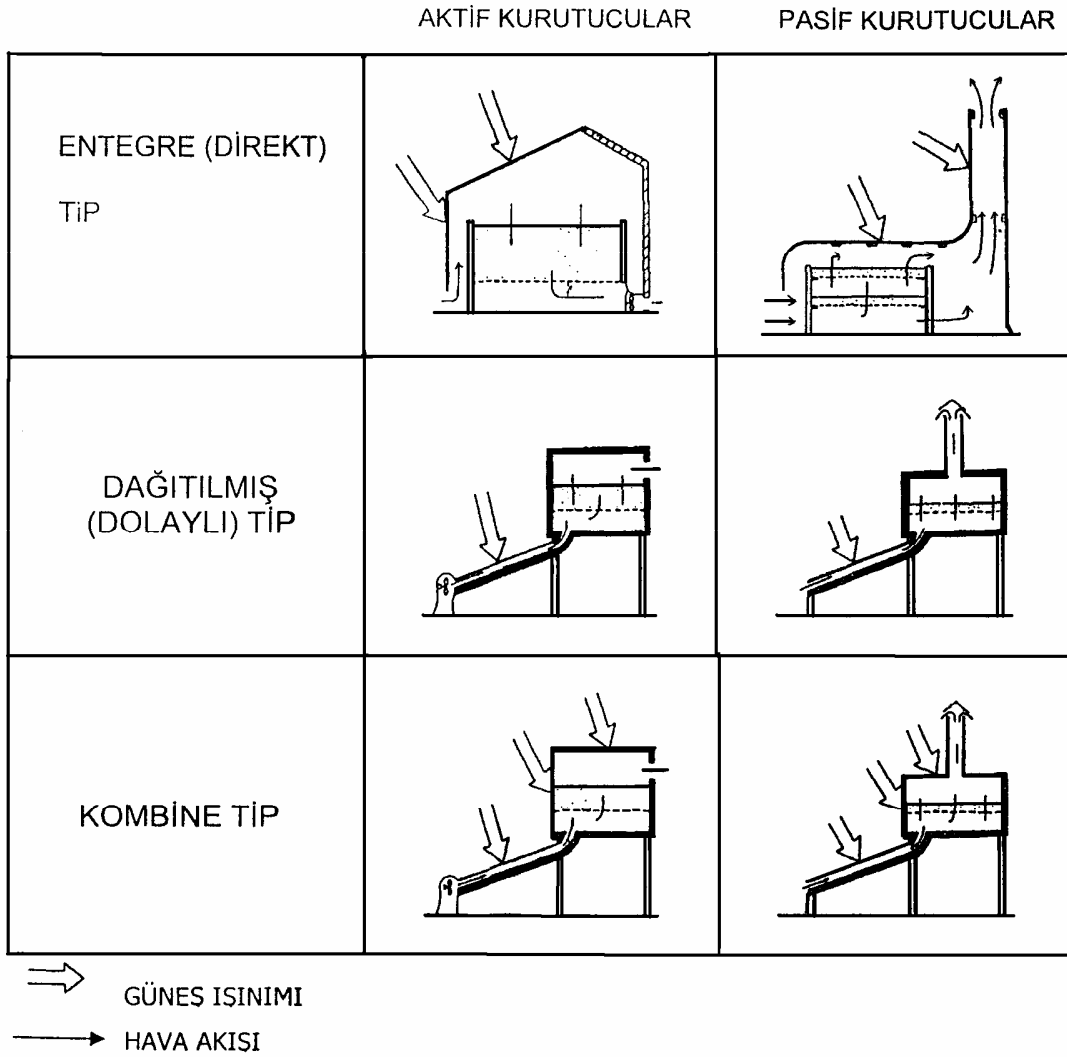
Şekil 3.1’de kurutucuların ve kurutma yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmektedir. Buna göre güneş enerjili kurutma sistemleri öncelikle ısıtma yöntemlerine ve güneş enerjisinin kullanılma yöntemine göre sınıflandırılır.

- a-) Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri
- b-) Pasif güneş enerjili kurutma sistemleri



Şekil 3.1. Kurutucuların ve Kurutma Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Tipik güneş enerjili kurutucuların temel dizayn özellikleri Şekil 3.2. de gösterilmiştir[55].



Şekil 3.2. Tipik güneş enerjisi kurutucu düzenekleri

Güneşle Kurutmada temel olarak kullanılan iki yöntem vardır.

- 1-) Doğal Güneşte Açık Kurutma
- 2-) Güneş Enerjili Kurutucular

Doğal güneşe açık kurutmada, ürün tarlada bitkisinden ayrılmadan bitkisi kesilmiş veya kesilmemiş vaziyette kurutulmaya bırakılır. Ürün tarlada, beton üzerinde yere yayılır. Yüzeysel veya dikey raflarda güneşe karşı bırakılır. Doğal hava akımlarından yararlanır. Ürün zamanla karıştırılarak her bölgesinin güneşle yüzleşmesi ve havalandırılması sağlanır.

Teknolojik olmamakla birlikte bu tür yöntemler hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Kuruluş maliyetleri çok az olduğu gibi işçi maliyeti dışında genellikle bir işletme maliyeti yoktur. Gelişmekte olan ülkelerde sıklıkla tek uygulanabilir yöntemdir. Yaygın olarak kullanılmakla birlikte açık havada güneşle kurutma yönteminin bazı sınırlandırmaları vardır. Yanlış kurutma sonucu ürün kayıpları, küflenme ve böcek etkileri, kuşların ve kemirici hayvanların saldırısı ve diğer hava etkilerinden dolayı elde edilen miktar ve verim olarak düşük kalitelidir.

Daha gelişmiş güneşle kurutma sistemleri geliştirilmiş olmasına rağmen geleneksel kurutma yöntemlerinin bazı olumlu özellikleri vardır.

- Düşük kurulum maliyetleri
- Düşük işletme maliyeti
- Yakıt kaynaklarından bağımsız olması

3.3.1. Doğal Sirkülasyonlu (Pasif Tip) Güneş Enerjili Ürün Kurutucular

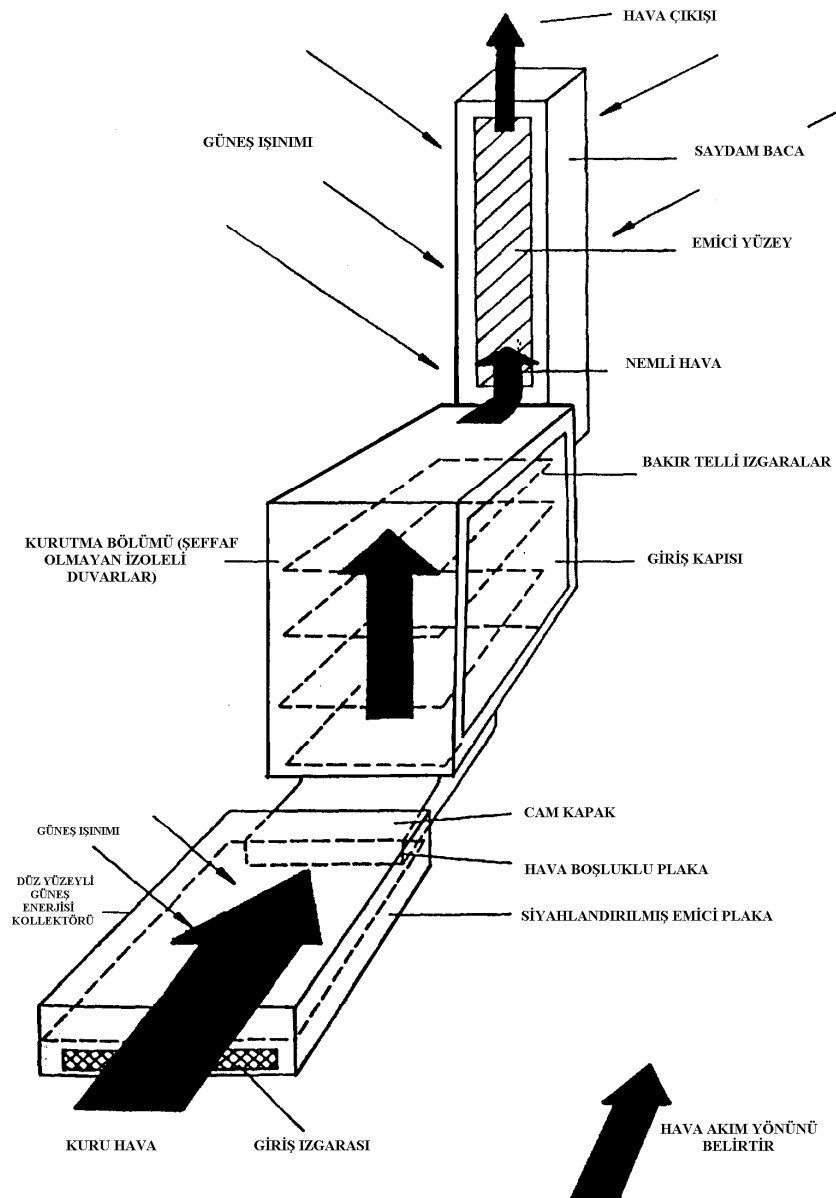
Bu tür sistemlerde güneş ışınlarıyla ısıtılan havanın sirkülasyonunun yapay olarak veya doğal olarak rüzgar basıncının kullanılması ile veya her ikisinin kombinasyonu alınarak sağlanır. Bu tür sistemler hava sirkülasyonunun sağlanması amacıyla fan kullanılan sistemlerden ayrılmaları için “pasif” olarak adlandırılmaktadır.

Doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucular kırsal kesimler için daha caziptir. Bu tür kurutucular işletme ve ekonomik sonuçlar açısından açık havada güneşle kurutmalı sistemlere karşı daha üstün özelliklere sahiptirler. Bu özellikler:

- Geleneksel yöntemlerle açık havada güneşle kurutma işleminde kullanılan geniş alanlara nazaran çok daha küçük alanlara ihtiyaç duyarlar.
- Daha yüksek miktarlarda ve kalitede ürün sağlarlar. Çünkü küf, böcek, kemirici hayvan ve benzeri etkilere karşı korunaklıdır.
- Kurutma periyodu geleneksel yöntemlere göre daha kısadır.
- Ani yağışlara karşı ürün korunma altındadır.
- Ticari olarak uygundur. Kurulum ve bakım onarım maliyetleri düşüktür. Yerel işçi gücünden faydalanılabilir. Yapımları için malzemeler kolaylıkla bulunabilir[53].

3.3.1.1. Dağıtılmış (Dolaylı Tip) Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Kurutucular

Şekil 3.3.'te bu tip bir kurutucu görülmektedir. Burada ürün ızgaralar veya raflarda odacık içerisine yerleştirilmiş ve hava dolaşımı ile ısıtılmaktadır. Hava alçak basınçlı kolektör (toplayıcı) içinden akış esnasında ısınır. Güneşin radyasyonu doğrudan ürüne yansıtılmaz. Böylece direk ısı yansıtmasından kaynaklanan zararlar engellenir. Ayrıca bu yöntem direkt olarak güneş ışığı altında vitamin kayıplarının düştüğü bazı bozulabilir türler ve meyveler için tavsiye edilebilir.



Şekil 3.3. Tipik bir doğal sirkülasyonlu dağıtılmış (dolaylı) tip güneş enerjili kurutucu

Dağıtılmış (Dolaylı Tip) güneş enerjili kurutucular direkt kurutuculara ve güneşte açıkta kurutuculara nazaran daha yüksek çalışma sıcaklığına sahiptirler. Daha yüksek kalitede ürün elde etmek mümkündür. Bu yüzden derin tabakalı kurutmalar için tavsiye edilirler. Eksik yanları ise ısıtıcı bölümden ayrılan havadaki ısıda oluşan dalgalanmalar ve bu yüzden sabit bir çalışma ısısının sağlanamamasıdır. Kurutma adasının içinde ısı sabitlenememektedir. Ayrıca ürünün yüklenmesi, boşaltılması ve karıştırılması da zordur. Fonksiyonel olarak daha yüksek verim elde edebilmek için tasarlanabilirler. Entegre (Direkt tip) güneş enerjili kurutuculara nazaran daha yüksek kurulum, bakım ve işletme maliyetleri vardır[56].

Temel bir Dağıtılmış (Dolaylı Tip) güneş enerjili kurutucu şu bölümlerden meydana gelir:

- Hava ısıtmak için güneş enerji toplayıcısı (Kollektör)
- Uygun şekilde izolasyonlu kanallar
- Kurutma odası
- Baca

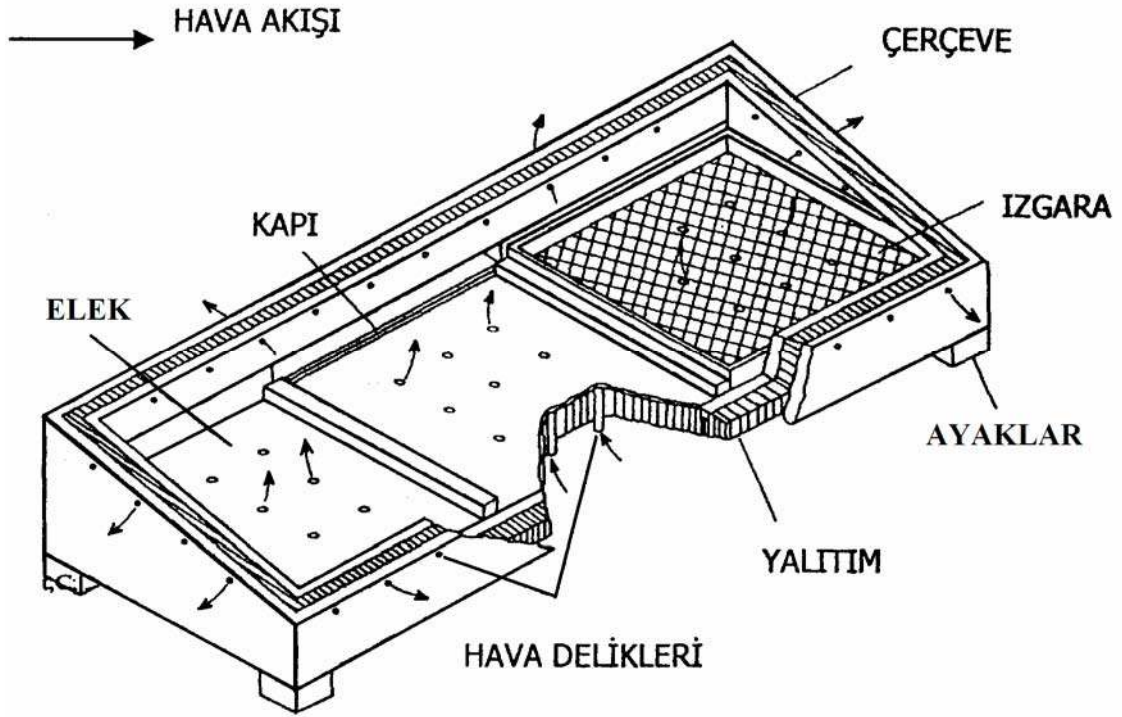
3.3.1.2. Entegre (Direkt Tip) Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Kurutucular

Bu tür kurutucularda ürün kurutma odasının duvarları saydam olup, ürün kuruması için güneş ışınlarının geçişine izin verir. Güneş enerjisi ürünle direk temas ederek ürün içindeki nemin ayrılmasını sağlar ve havanın bağıl nemini düşürerek havanın nem taşıma kapasitesini artırır. Ek olarak, ısı havanın kurutma içinde genişlemesine böylece bir sirkülasyon oluşumuna yol açar.

Direkt tip doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucular dolaylı tipe nazaran daha basit yapılı ve ucuzdur. Kanal ve güneş kolektörü gibi ayrıntılara gerek duymazlar. Bunun yanında aşırı ısınma sonucu üründe bozukluklara yol açabilir. Nemle doymuş havanın dışarıya atılması zorluğu yüzünden kuruma süresi uzun zaman alır. Bu olumsuzluğu gidermek için bir güneş enerjili baca, sisteme eklenebilir. Entegre tip pasif kurutucular, kabin ve sera tip olarak ikiye ayrılırlar[57].

Pasif Entegre Kabin Kurutucular:

Genellikle ev tipi küçük miktarlarda meyve, sebze, balık ve et kurutmak için kullanılır. Genelde tek veya çift camlı yalıtılmış tabanlarında üst bölüm kenarlarında delikler olan kutulardır(Şekil 3.4).

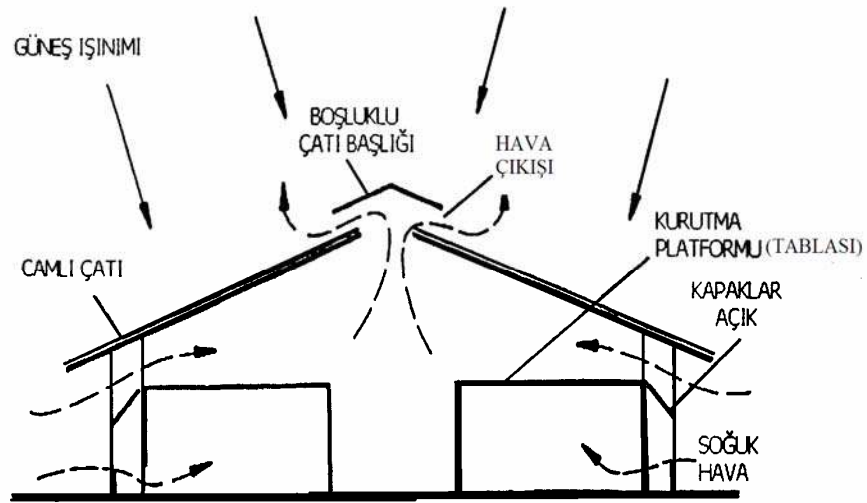


Şekil 3.4. Tipik bir doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucu kabini

Pasif Entegre Sera Tip Kurutucular;

Pasif entegre sera tip kurutucular çadır kurutucular olarak da bilinirler. Hava akışını uygun şekilde düzenleyecek büyüklükte ve pozisyonlarda hava girişleri ile donatılmışlardır.

Şekil 3.5 paralel iki sıralı kurutucu platformu'ndan oluşan eğimli cam çatısı olan, ahşap kolonlar üzerinde galvanizli örgüden yapılmış pasif bir entegre sera tip kurutucuyu göstermektedir[58].



Şekil 3.5. Doğal sirkülasyonlu cam çatılı güneş enerjili kurutucu

Tablo 3.1. Doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucuların karşılaştırılması

Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Kurutucuların Karşılaştırılması		
	Kurutucu Tipi	
	Doğrudan Tip	Dolaylı Tip
Ürüne ısı transfer yöntemi	Radyasyon(Güneşten radyasyonun direkt emilmesi.)	Güneş Enerjisi kolektörü içerisinde ön ısıtılmış havadan ısı transfer yöntemi ile
Kısımlar	Pencereli kurutma odası ve baca	Hava ısıtıcı güneş enerji kolektörü, kanallar, kurutma odası ve baca
İlk yatırım maliyeti	Artan maliyet	Artan maliyet
Yapım, işletme ve bakım	Basit yapım ve işletme. Düşük miktarda bakım gerektirir.	Hassas işlenmiş yapım ve malzemeler gerektirir. Kurutma işletme maliyeti yüksektir. Ürün yüklenmesi boşaltılmasında ve karıştırılmasında zorluklar vardır.
Verimlilik	Basitliği ve kurutma işlevinin kontrol zayıflığı yüzünden düşük verimlidir.	İyi bir tasarım yapıldığında verimi çok artırılabilir.

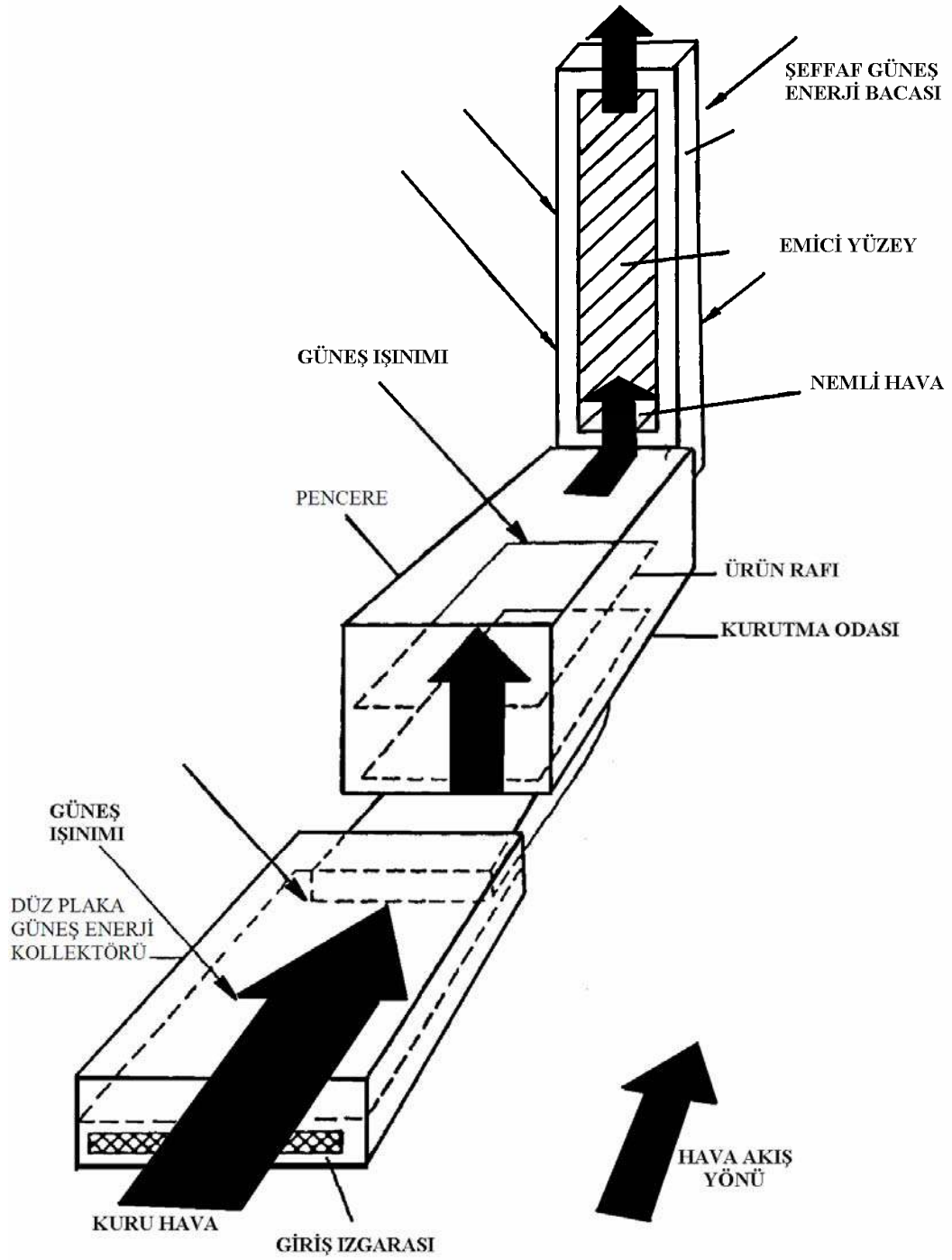
3.3.1.3. Kombine Tip Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjisi Kurutucuları

Bu tip kurutucular Ayrık ve Birleşik tipli doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucuların özelliklerini yansıtır. Güneş radyasyonu hem ürünün üzerine doğrudan düşürülür hem de güneş enerjisiyle ön ısıtılmış hava kurutma işleminde kullanılır.

Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi hem ayrı bir güneş enerjisi ısıtıcı bölümünün yanında aynı zamanda kurutma odasının duvarlarındaki pencerelerden güneş enerjisi direk olarak ürüne yansımaktadır.

Kombine tip doğal sirkülasyonlu güneş enerjisi kurutucuları,

- Rüzgarla dönen pervaneli kombine tip güneş enerjili kurutucu
- Büyük ölçekli kombine tip tropikal güneş enerjili kurutucu şeklinde sınıflandırılır[54].



Şekil 3.6. Tipik bir kombine tip doğal sirkülasyonlu güneş enerjili kurutucu

3.3.2. Aktif Güneş Enerjili Kurutucular

Bu tip kurutucular ısıtma işlemi için farklı enerji kaynakları kullanabildiklerinden kısmen güneş enerjisine bağımlıdır. Güneş Enerjisinin yanında elektrikli, fosil yakıtlı ısıtma sistemleri ve hava sirkülasyonu için fanlar içerirler. Güneş Enerjisinin yeterli olmadığı durumlarda örneğin geceleri fosil yakıtlar kullanılarak kurutma işlemi kontrollü bir sıcaklıkta sürdürülebilir. Dehidratör (fosil yakıtlı kurutucu) içeren bu tür sistemler “Hibrit Güneş Enerjili Kurutucu” olarak da bilinirler.

Yüksek sıcaklıklı kurutucularda yüksek bir hava akış hızı gerektirdiğinden bu tür kurutucularda fanlar kullanılır.

Aktif Güneş Enerjili kurutucular;

- Entegre
- Dağıtılmış
- Kombine Tip

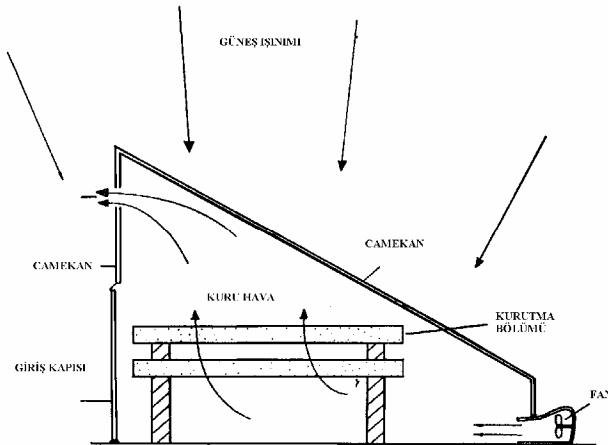
olarak üç kısımda incelenebilirler[53].

3.3.2.1. Entegre Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutucular

Bu tür sistemlerde kurutma işlemi tek bir bölümde yapıldığı için özel kanallama sistemlerine gerek yoktur. Bu tip kurutucular

- A) Direkt absorpsiyonlu kurutucular
- B) Güneş kolektörlü çatı-duvar tipi kurutucular
- C) Dahili absorpsiyonlu sera tipi kurutucular

Bunlardan direkt absorpsiyonlu kurutucularda ürün doğrudan güneş radyasyonunu absorbe ettiğinden ayrı bir güneş kolektörüne ihtiyaç yoktur (Şekil 3.7).

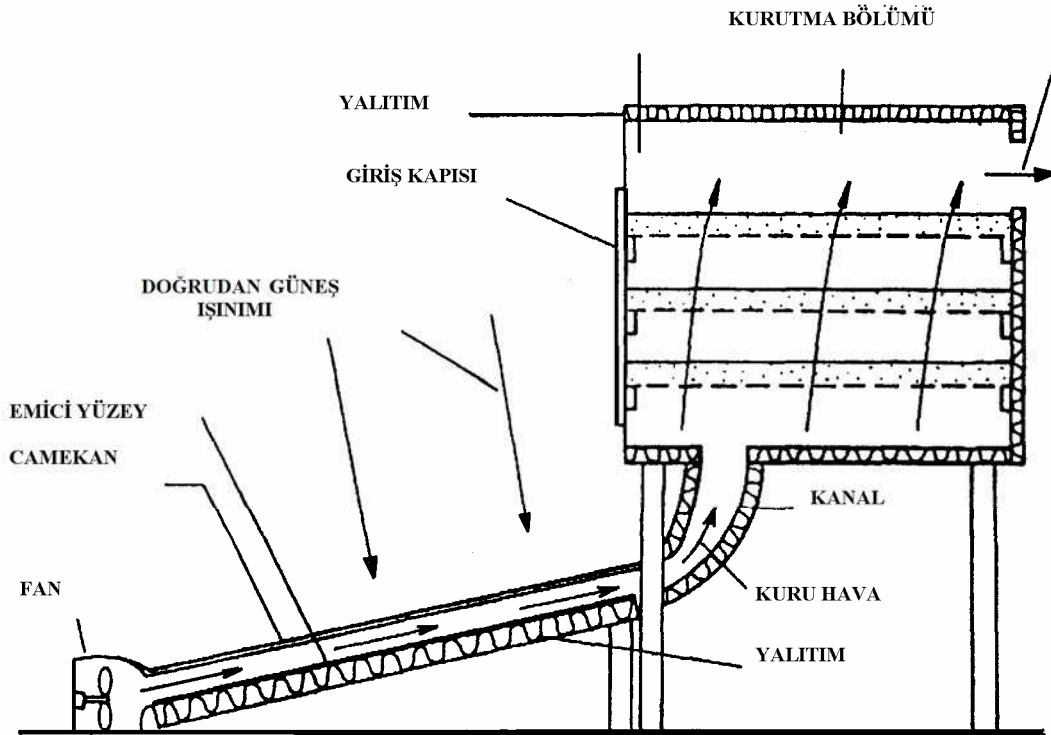


Şekil 3.7. Aktif havalandırmalı sera tipi güneş enerjili kurutucu

3.3.2.2. Dağıtılmış Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri

Bu tiplerde güneş kollektörü ile kurutma bölümü ayrılmıştır. 4 ayrı temel bölüm vardır (Şekil 3.8).

- Kurutma Bölümü
- Güneş enerjisi hava ısıtıcısı
- Fan
- Kanal



Şekil 3.8. Dağıtılmış tip aktif güneş enerjili kurutucu

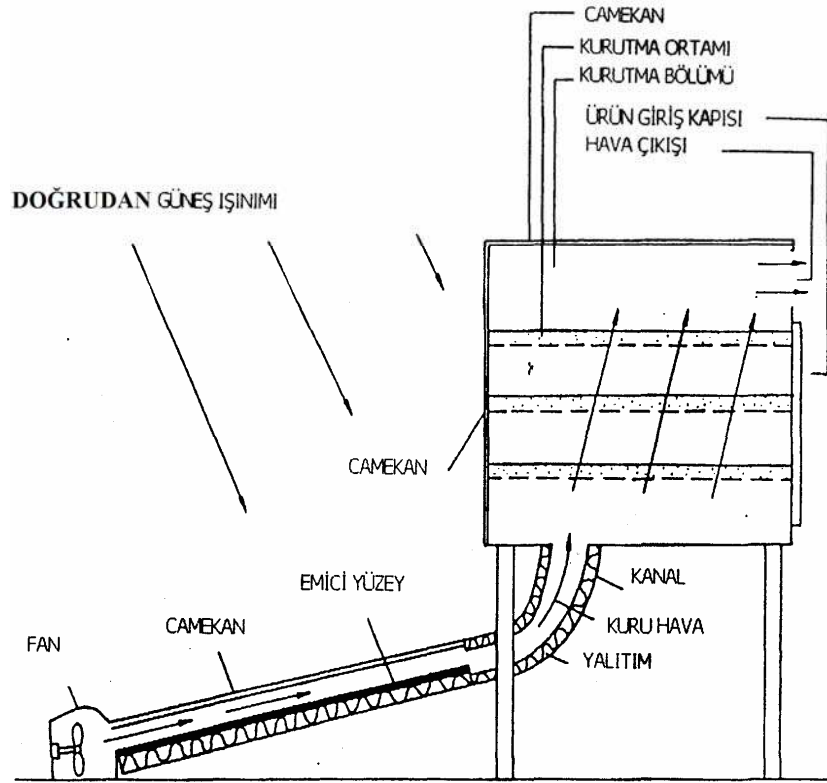
3.3.2.3. Kombine Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutucular

Şekil 3.9 'da görüldüğü gibi bir güneş enerjili hava ısıtıcı bölüm, kanallama, ayrı bir kurutma bölümü ve fan içerirler. Ayrıca kurutma bölümü direkt absorbsiyor sağlamak için pencereleştirilmiştir.

Daha verimli bir enerji verimini sağlamak için bazı aktif güneş enerjili kurutucular ısı toplayıcı bölümler içerirler (Kaya veya çakıl yatağı gibi). Böylece akşam ve gece vakitleri gibi

sıcaklığın düşük olduğu dönemlerde de kurutma işlemi sürer. Kurutma odasının içine nem emici maddeler konularak havanın nem taşıma kapasitesi artırılabilir.

Nem emici maddeler hava akışına olan direnci artıracığından bu tip maddeler zorlanmış tipli sistemlerde kullanılmalıdır. Daha önce de belirtildiği gibi büyük kapasiteli ticari amaçlı aktif güneş enerjili kurutucular hava ısıtıcı güneş kolektörü desteği ile elektrik veya fosil yakıt tüketiminin azaltılmasını sağlar[53].



Şekil 3.9. Kombine tip aktif güneş enerjili kurutucu

Uygun şekilde dizayn edildiklerinde aktif güneş enerjili kurutucular, doğal sirkülasyonlu kurutuculara nazaran daha verimli ve kontrol edilebilirler. Fakat elektrik veya fosil yakıt gerektirdiklerinden gelişmekte olan ülkelerdeki kırsal kesim çiftçileri için pahalıdır.

3.4. Diğer Kurutma Yöntemleri

Halen dünyada sebze ve meyvelerin kurutulmaları için uygulanan çok değişik yöntemlerle, bu ürünlerin, değişik biçim ve boyutlarda doğranmış ya kurutulmuş ya da toz veya granül halinde üretimleri gerçekleştirilmektedir. Sebze ve meyvelerin kurutulmasında kullanılan çok değişik kurutma yöntemleri vardır. Bu kurutma tekniklerini güneşte veya güneş enerjisi ile kurutma dışında aşağıdaki gibi sıralanabilir[6].

a) Konvensiyonel tekniklerle ısıtılmış sıcak hava ile kurutma:

Sebze veya meyve herhangi bir güneş enerjisi dışındaki enerji kaynağı ile ısıtılmış sıcak hava yardımı ile kurutulur. Çok değişik kurutucu tiplerinde uygulanabilmektedir.

b) Akışkan yatakta kurutma:

Kurutulmak istenen ürünün hareket yönüne dik olarak gönderilen sıcak hava, ürünü hareketli, akışkan bir yatak durumuna dönüştürür. Bu kurutma yönteminde sıcak hava ile kurutulan ürünün arasında iyi bir ısı geçişi sağlanarak daha hızlı ve homojen bir kurutma işlemi sağlanmaktadır.

c) Dönen silindirler üzerinde kurutma:

Sıvı veya yarı katı(pelte, salça vb. yapıda) gıda maddeleri dönen, ısıtılmış(genelde yüksek sıcaklıklı buhar veya kızgın yağ) silindirler üzerine dökülerek ince bir tabaka halinde kurutulur ve kuru ürün silindirlerden sıyrılarak elde edilir.

d) Püskürterek kurutma:

Bu yöntem sıvı gıda maddelerinin kurutulmasında uygulanır. Kurutulacak sıvının sıcak hava akımı içine pulverize olarak püskürtülmesi ile oluşan sıvı damlacıklarının kurutulması esasına dayanır. Hava ile birlikte sürüklenen kuru ürün siklon ve torbalı filtre benzeri ayırıcılar kullanılarak elde edilir.

e) Pnömatik kurutma:

Basınçlı hava ile kolaylıkla nakledilecek un vb. nitelikteki ürünlerin kurutulmasında uygulanan bir teknik olup bir besleyiciden gelen ürün basınçlı ve sıcak hava hareketi ile iletilirken aynı zamanda kurur. Pnömatik taşımayı genelde radyal vantilatörlerle hareketlendirilen ve ısıtma ünitesinden (genelde buhar serpantinli) geçen sıcak hava sağlar. Pnömatik iletilip kuruyan ürün siklon veya torbalı filtre benzeri ayırıcılar kullanılarak elde edilir.

f) Vakum altında kurutma:

Kurutucu içine vakum uygulanarak, buharlaşma ve dolayısıyla kurutma işlemi daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Sebze, meyve kurutulması için pahalı bir yöntemdir. Laboratuarlarda kuru madde tayininde, analizlerde yaygın olarak kullanılabilir.

g) Köpük kurutma:

Sıvı gıda maddelerinin kurutulmasında kullanılan bir yöntemdir. Kurutulacak olan sıvı, herhangi bir biçimde köpüklendirildikten sonra, sıcak hava tüneli içine hareket eden bant üzerinde kurutulur.

h) Dondurarak kurutma:

Kurutulacak gıda maddesinin içerdiği su önce dondurularak buz haline dönüştürülür. Daha sonra buzun vakum altında, erimeden buhar fazını geçmesi sağlanır(sublimasyon). Bu yöntemle elde edilen ürün üstün kalitededir.

Burada belirtilen kurutma yöntemlerinden başka kızartılarak, tuz çözeltileri veya solventlerle yapılan kurutma gibi yöntemlerde vardır. Ayrıca kurutmada kızılötesi ışınlar veya mikrodalga gibi enerji kaynaklarından da yararlanılabilir.

4. GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİ

Güneş kollektörleri, güneş radyasyonunu alıp bir akışkan (sıvı ya da hava) bünyesine geçiren birer ısı değiştiricisidirler. Üç grupta sınıflandırılırlar. Birinci grup düz yüzeyli kollektörler olup, güneş ışığını odaklamazlar. Genellikle sabit olarak çalışırlar ve akışkan sıcaklıkları 95°C'nin altındadır. İkinci grup odaklamalı kollektörlerdir. Güneş ışınlarını sürekli olarak bir odak noktasına toplarlar. Sadece direkt radyasyondan faydalanırlar. Yüksek sıcaklık temin edebilirler. Bunların arasında hem düz yüzeyli hem de odaklamalı kollektörlerin özelliklerini taşıyan kollektörler üçüncü grubu oluşturur. Odaklamalı kollektörler kadar yüksek sıcaklık sağlayamazlar. Ancak sıcaklık 175°C kadar çıkabilir. Her grubun uygulama alanları farklı olup, ısıtma ve soğutma uygulamalarında düz yüzeyli kollektörler yaygın olarak kullanılırlar.

Kollektörlerden yüksek verimlilik, uzun ömür, ucuz fiyat ve kolay montaj özellikleri beklenir. Verimli bir kollektör aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- 1) Üzerine düşen güneş enerjisi miktarının çoğunu absorbe edebilmelidir.
- 2) Kollektörlerden çevreye olan ısı kayıpları en az düzeyde olmalıdır.
- 3) Absorbe ettiği enerjiyi içindeki ısı taşıyıcı akışkana yüksek bir verimlilikle geçirebilmelidir.

TS 3680'e göre güneş kollektörlerinin sınıflandırılması aşağıdaki şekildedir[59]:

Isı taşıyıcı akışkan cinsine göre;

- Sıvılı güneş kollektörleri
- Havalı güneş kollektörleri Kollektörlerin yerleştirilme şekillerine göre;
- Sabit güneş kollektörleri
- Hareketli güneş kollektörleri

Kasaların imal edildiği malzemenin cinsine göre;

- Alüminyum kasalı
- Paslanmaz çelik kasalı
- Galvaniz sac kasalı
- Plastik kasalı Ağaç kasalı güneş kollektörleri

Soğurucuların imal tekniğine ve imal edildikleri malzemenin cinsine göre;

- Roll-Bond alüminyum soğuruculu
- Ekstrüde alüminyum soğuruculu
- Ekstrüde bakır soğuruculu
- Dikiş kaynak-paslanmaz çelik soğuruculu
- Dikiş kaynaklı bakır soğuruculu

- Dikiş kaynaklı DKP saç soğuruculu
- Dikiş kaynaklı-derin sıvamatik saç soğuruculu
- Lehimli bakır boru-bakır levha soğuruculu
- Kaynaklı bakır boru-bakır levha soğuruculu
- Sıvama bakır boru-bakır levha soğuruculu
- Kalıplanmış plastik soğuruculu
- Kalıplanmış EPDM soğuruculu

4.1. Havalı Güneş Kolektörleri

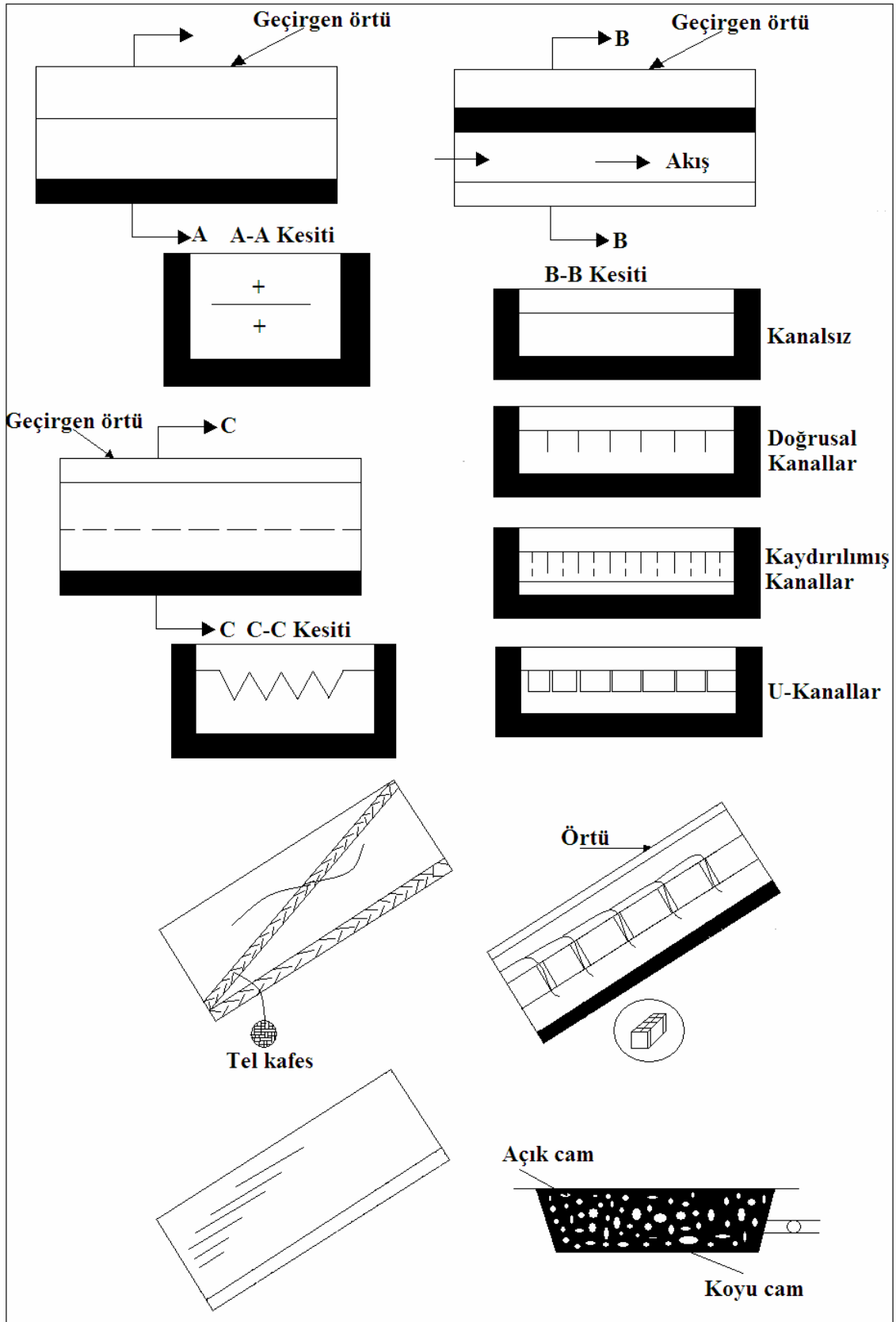
Havalı güneş kolektörleri, yutucu yüzey ile çalışma akışkanı hava yardımıyla güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Yutucu yüzeye gelen güneş ışınlarının büyük bir kısmı yutulur ve taşınım ile sistemde dolaştırılan çalışma akışkanı havaya aktarılır. Kolektörden elde edilen yararlı ısı; kolektörden geçirilen çalışma akışkanının giriş ve çıkış entalpileri farkına eşittir.

Havalı güneş kolektörleri, farklı tasarımlarda üretilmektedir. Yutucu yüzey olarak kanatçıklı metal levhalar, V-şekli verilmiş metaller, düz metal levhalar, içinden çalışma akışkanının geçtiği ağ şeklindeki malzemeler ile yarılmış ve açılmış metaller, sentetik ve doğal kürkler kullanılmaktadır. Ayrıca birden fazla yutucu yüzey kullanılması da mümkündür. Kolektör üzerine metal veya plastik elek şeklinde ikinci bir yutucu yüzey yerleştirilmesi gibi değişik modeller geliştirilmiştir. Şekil 4.1 'de farklı havalı güneş kolektörü tasarımları gösterilmiştir[60].

Havalı güneş kolektörlerinde, gelen güneş ışınımını yüksek oranda geçiren buna karşın kolektörden çevreye taşınım ile ısı transferine ve uzun dalga boylu ışınım geçişine engel olan levha veya film türünde saydam malzemeler kullanılır.

Havalı güneş kolektörlerinde, yutucu yüzey ile çalışma akışkanı arasında ısı transferi katsayısı, seçilen malzemenin (ısı transfer alanı / hacim) oranının büyük olması gerekmektedir. Bu şekilde ısı transfer alanı artacağından çalışma akışkanına aktarılan enerji miktarı da artar. Yutucu yüzeyin pürüzlü olması ısı transferinde artışa neden olur. Pürüzlülük ısı verimi olumlu yönde etkilerken, kolektörde oluşacak basınç kaybını, dolayısıyla fan gücünü artırır.

Havalı güneş kolektörleri, tarımsal ürünlerin kurutulması, bina ve seraların ısıtılmasında kullanılmaktadır.

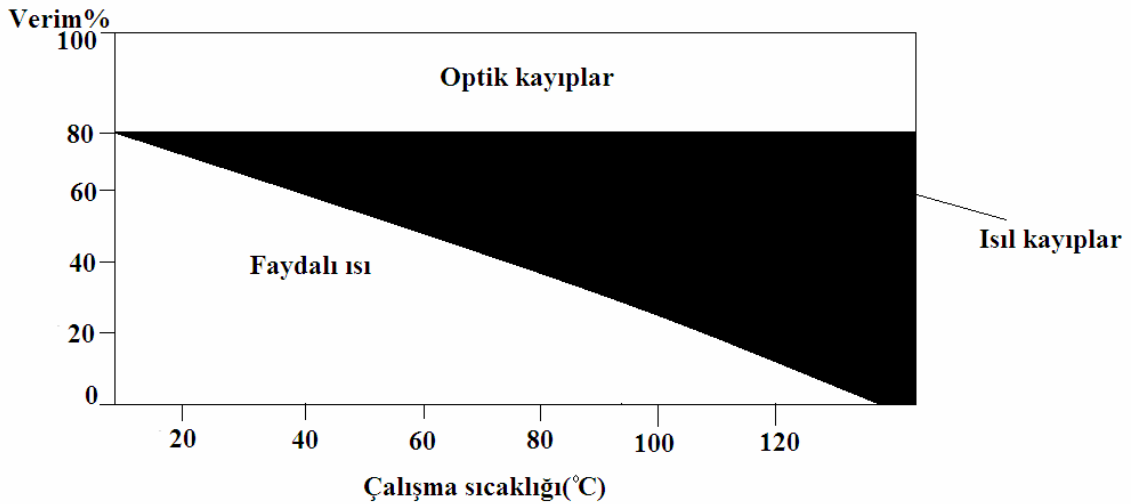


Şekil 4.1. Farklı havalı güneş kolektörü tasarımları

Kollektör üzerine gelen güneş ışınımının bir kısmı saydam örtüden yansır, bir kısmı yutulur ve geri kalan kısmı yutucu yüzeye ulaşır. Yutucu yüzeye gelen ışınımın, bir kısmı taşıyıcı akışkana geçerken, bir kısmı yüzeyde depolanır, geri kalan kısmı da çevrede kaybolmaktadır.

Kollektörlerde meydana gelen ısı kayıpları çok sayıda değişkene bağlıdır. Güneş ışınımı şiddeti, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı, kollektörün konstrüksiyonu, saydam örtü özellikleri, yutucu yüzeyin ışınım yutma, yayma değeri, ısı iletim katsayısı, kalınlığı, yalıtım malzemesinin cinci ve kalınlığı bu değişkenlerden bazılarıdır. Tüm değişkenler göz önünde tutularak kolektörün ısı analizi yapılmalıdır.

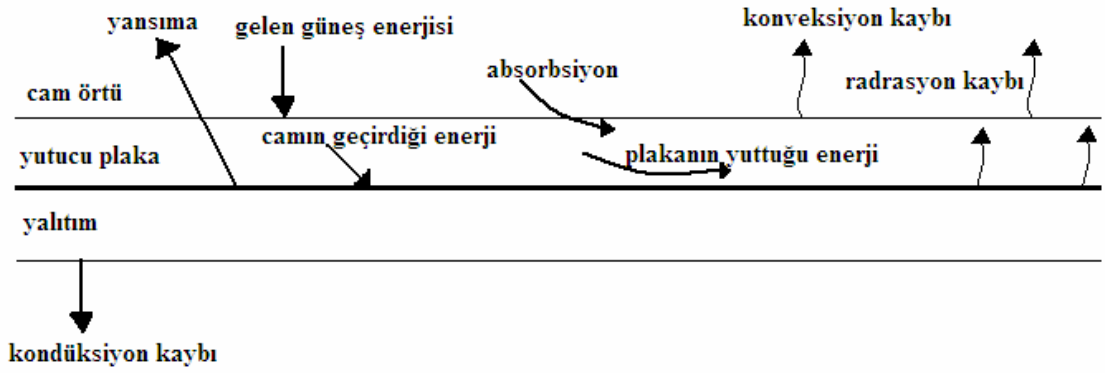
Uygulama alanına bağlı olarak, kollektörde meydana gelen kayıplar imalat sırasında azaltılabilmektedir. Optik ve ısı kayıpları birbirine zıt yönlerde artmaktadır. Cam örtü, ısı kayıpları azaltmasına karşılık optik kayıpları arttırmaktadır[61].



Şekil 4.2. Optik ve ısı kayıplarının kollektör verimine etkisi

4.2. Kollektör Anlık Verimi(η)

Kollektör yüzeyine düşen direkt ve difüz güneş ışınlarının belli bir kısmı, ısıya dönüşürken geri kalanı da çevrede kaybolmaktadır. Şekil 4.3'de, radyasyon, yansıma ve konveksiyonla oluşan bu kayıplar görülmektedir.



Şekil 4.3. Düzlemsel güneş kolektöründe ısı kayıpları

Bir düzlemsel güneş kolektörünün anlık verimi(η), çalışma akışkanından elde edilen yararlı ısının kolektör üzerine gelen güneş ışınlamına oranı olarak tanımlanır[62].

$$\eta = \frac{Q_f}{I \cdot A} = \frac{F_R \cdot I \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L (T_g - T_o)}{I} \quad (4.1)$$

Kolektörün faydalı enerjisi, hava giriş ve çıkış sıcaklıkları ile birim zamanda geçen hava kütlesi yardımıyla tespit edilir.

$$Q_f = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\varphi} - T_g) \quad (4.2)$$

5. KURUTMA TEORİSİ

5.1. Kuruma Evreleri

Kurutma kelimesi genel anlamıyla bir maddenin bünyesinde bulunan nemin alınmasını belirtir. Fakat teknikte bu işlem çok değişik metotlarla yapıldığından, bu metotları birbirinden ayırmak için daha dar bir anlamda kullanılır. Buna göre teknik anlamda kurutma, bir katının bünyesinde bulunan nemin bir gaz akımı içinde buharlaştırılarak gaza geçirilmek suretiyle alınmasını belirtir. Kısaca kurutma katı bir maddeden uygun miktarda suyun uzaklaştırılması işlemidir.

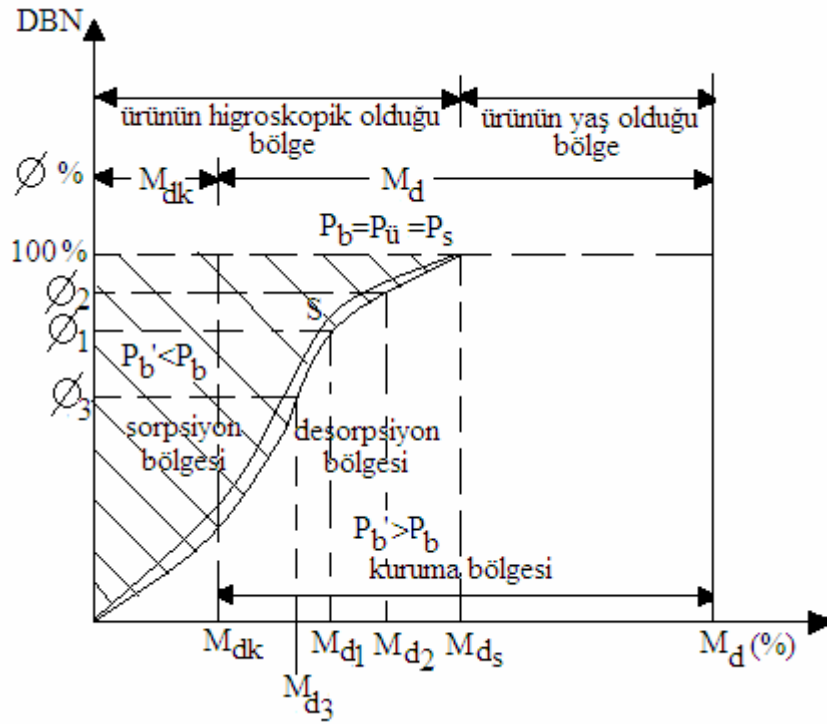
Kuruma sırasında materyal neminde meydana gelen değişimler ve etkili unsurlar, statik ve kinetik açılardan incelenebilir[63].

5.1.1. Kurumanın Statiği

Statik açıdan kurumanın incelenmesi sırasında, hava ile materyal arasındaki nem dengesi zaman dikkate alınmadan irdelenir. Denge, materyalin çevre havasına nem vermesi (desorpsiyon) veya çevreden nem alması (sorpsiyon) sonucunda oluşur. Denge oluştuğunda, havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı (P_u) birbirine eşittir. Kuruyan materyalin yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak çevre havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğundan, $P_u = P_b$ alınabilir. Bu nedenle, denge durumunda, materyalin ulaştığı nem (M_d), havanın kısmi buhar basıncına ve sonuç olarak bağıl nemine (Φ) bağlıdır.

Kurumakta olan bir materyalin hava ile arasındaki nem alışverişi sonucunda ulaşabileceği üst nem sınırı, o materyalin *Higroskopik Limiti* olarak tanımlanır. Bir başka deyişle higroskopik limit, bağıl nemin %100 olduğu şartlarda, bir materyalin ulaşabileceği en yüksek denge nemi değeridir (M_{ds}). Herhangi bir materyalin sorpsiyon izoterm eğrisi kurutma açısından incelendiğinde, sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 5.1 de gösterilen şekilde belirtilebilir.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, izotermin DBN eksenine ile arasında kalan bölge içindeki her noktanın P'_b değeri P_b den daha küçüktür. Bu bölge, materyalin bünyesine nem aldığı şartları belirtir. İzotermin M_d (Denge Nemi) eksenine ile arasında kalan bölge içindeki her noktanın P'_b değeri ise P_b den daha büyüktür. Bu bölge, materyalin çevreye nem verdiği şartları belirtmektedir.



Şekil 5.1. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statîği açısından anlamı

Tarım ürünlerinde bulunan suyun tümü, kurutma sırasında üründen tamamen alınamadığından gerçek kuruma bölgesi şekilde görülen alandan (eğri altında kalan) daha küçüktür. Bu nedenle Şekil 5.1 de kuruma bölgesi, ürünün ulaşabileceği en küçük denge nemi (M_{dk}) değerinden geçen bir eksenden başlatılarak gösterilmiştir.

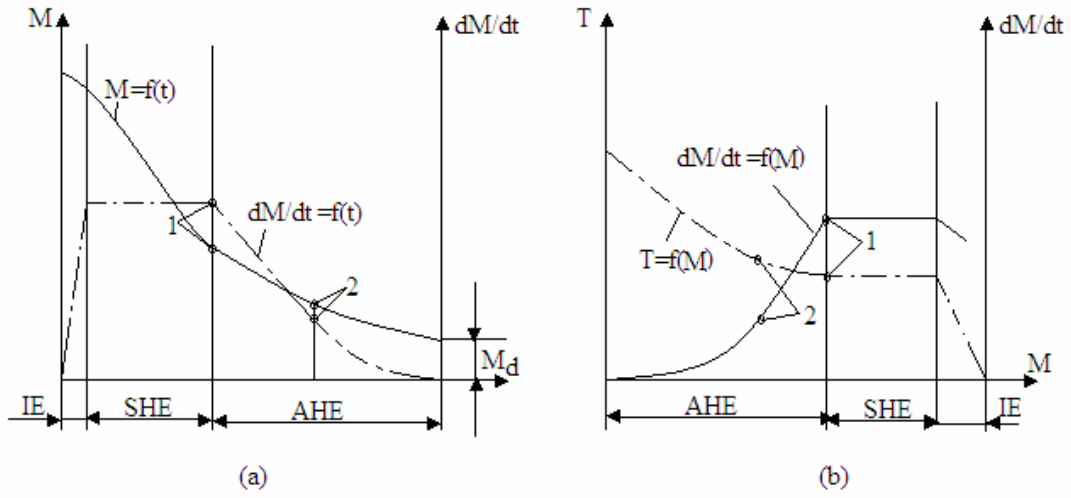
5.1.2. Kurumanın Kinetiği

Kurumanın kinetik açıdan incelenmesi sırasında, materyal ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zaman da dikkate alınarak irdelenir.

Herhangi bir materyalin kuruması kinetik açıdan incelenirken,

- Materyalin nemi ile kuruma süresi : $M = f(t)$
- Kuruma hızı ile materyal nemi: : $dM/dt = f(M)$
- Kuruma hızı ile kuruma süresi: : $dM/dt = f(t)$
- Materyal sıcaklığı ile nemi : $T = f(M)$

arasındaki ilişkiler dikkate alınır.



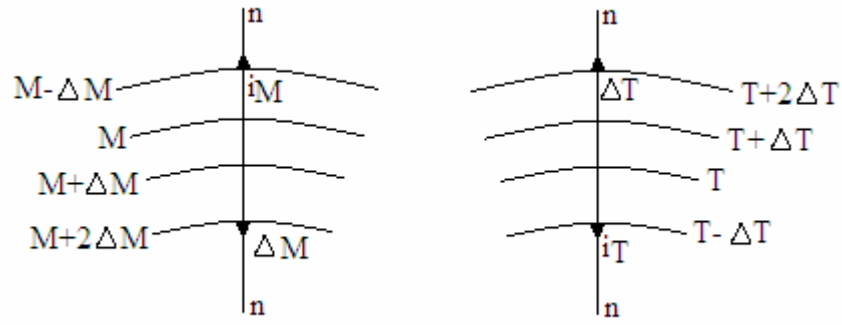
Şekil 5.2. Kurumanın kinetik eğrileri

Şekil 5.2 nin incelenmesi sonucunda, kuruma süreci içinde üç karakteristik evreyle karşılaşılmaktadır. Bu evreler,

- materyalin ısınma evresi (IE)
- sabit hızla kuruma evresi (SHE)
- azalan hızla kuruma evresi (AHE)

şekilde adlandırılabilir.

Yapısı içinde nem ve sıcaklık dağılımının düzgün olduğunu varsaydığımız bir materyal, kendisinden daha sıcak bir ortama yerleştirildiğinde çevreden ısı alarak sıcaklığı artmaya başlar. Sıcaklık artışı, yüzeyden başlayarak materyalin iç kısımlarına doğru ilerler. Sıcaklık artışına paralel olarak, yüzeyde bulunan nem hızla buharlaşarak ayrılır. Bu oluşumların sonucunda, materyal içindeki nem ve sıcaklık dağılımının başlangıçtaki tekdüzeliği bozulmaya başlar. Yüzey sıcaklığı iç kısımlara göre artarken, bu katmanlardaki nem giderek azalır. Materyalin yapısı içinde, sıcaklık ve nem konsantrasyonu açılarından farklı değerlere sahip katmanlar oluşur. Bu katmanlarda oluşan eşit sıcaklıktaki noktaların birleştirilmesiyle izotermal, eşit nem değerine sahip noktaların birleştirilmesiyle de izopotansiyel çizgileri elde edilir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Kuruyan materyalde oluşan izotermal ve izopotansiyel çizgileri

Kuruyan materyalde nem konsantrasyonu iç katmanlardan dışa doğru azalırken, sıcaklık değeri ise ters yönde, dış katmanlardan içe doğru azalır. Materyalin içindeki nemin hareketi sırasında bu iki gradientin etkisi birbirine terstir. Nem, konsantrasyon farkına bağlı olarak, iç kısımlardan dış katmanlara doğru hareket eder, sıcaklık farkına bağlı olan nem hareketinin yönü ise, sıcaklık dış katmanlarda daha yüksek olduğundan, dıştan iç kısımlara doğrudur.

Sıcaklık ve nem gradientlerine göre oluşan nem hareketlerinin birbirine zıt yönlü olması nedeniyle, kuruma sırasında bunlardan hangisi daha baskın durumdaysa, nem, o etkenin belirlediği yönde hareket eder. Diğeri ise, nemin taşınımında bir direnç unsuru olarak ortaya çıkar. Araştırmalar, tarım ürünlerinin konveksiyonla kurutulmaları sırasında, nem taşınımının, nem konsantrasyon farklılaşması tarafından daha çok etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle, nem taşınım yönü, ürünün iç kısımlarından dışa doğrudur. Sıcaklık konsantrasyon farkından doğan ters etki nedeniyle kuruma hızındaki azalma, oransal olarak, ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Kuruma başlangıcında görülen ısınma evresi (IE) sırasında materyalin yüzey sıcaklığı hızla yükselir. Kuruma hızı (birim zamanda buharlaşarak uzaklaşan nem miktarı) giderek artar ve bu evrenin sonunda en yüksek değerine ulaşır. Materyalin ortam havası tarafından bir denge sıcaklığı oluşana kadar ısıtılması nedeniyle ortaya çıkan IE süresinin, tüm kuruma süresine kıyaslanınca, çok kısa olduğu anlaşılır. Bu nedenle, genellikle dikkate alınmaz ve kuruma eğrilerinde gösterilmez.

Kuruma sırasında IE'nin sona erdiği andan itibaren sabit hızla kuruma evresi (SHE) başlar. Şekil 5.2 den de görüldüğü gibi bu evre sırasında $[M = f(t)]$ eğrisi oldukça doğrusal bir değişim gösterir. Kuruma hızı eğrisi $[dM/dt = f(M)]$ ise bu evre boyunca apsise paralel olarak uzar. Bu durum, kuruma hızının, IE sonunda ulaştığı en yüksek değerinin, SHE süresince de korunduğunu göstermektedir.

SHE sırasında nem, materyalin yüzeyinden, herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden buharlaşan suyla aynı davranışı göstererek buharlaşır. Nemin buharlaşması için kullanılan ısının tümü, suyun buharlaşma gizli ısısı olarak kullanılır. Materyali ısıtmaz. Bu nedenle, buharlaşma süresince yüzey sıcaklığı sabit kalır. Konveksiyonla kurutma sırasında materyal yüzey sıcaklığının, büyük bir yaklaşıklıkla, kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu kabul edilir. Bu kabul sırasında, kondüksiyon ve radyasyon yoluyla ısı iletiminin ihmal edilebilecek ölçüde küçük olduğu varsayılmaktadır.

SHE süresince, materyal yüzeyi tamamen suyla kaplı olmalıdır. Bu nedenle birim zaman dilimi içinde iç katmanlardan yüzeye iletilen su miktarı, aynı zaman diliminde yüzeyden buharlaşan su miktarına eşit olmalıdır. Bir başka söyleyişle SHE süresince suyun yüzeye iletim hızı ile yüzeyden buharlaşma hızı birbirine eşit olmalıdır.

SHE sırasında, suyun materyal yüzeyine, kılcal borucuklar, ozmotik basınç, büzülme nedeniyle oluşan sıkıştırma basıncı vb. etkilere bağlı olarak taşındığı kabul edilir. Kuruyan materyalin iç kısımlarından yüzeye doğru süren nem taşınması nedeniyle, iç katmanlardaki nem miktarı giderek azalır ve buna bağlı olarak tabakalar arasındaki konsantrasyon farkı küçülür. Materyal içinde tabakalar arası konsantrasyon farkının azalması, bu etkene bağlı olarak hareket eden su miktarının azalmasına neden olur. Ortaya çıkan bu yeni durum nedeniyle, kurumakta olan materyalin yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktarda su, iç kısımlardan yüzeye ulaşamaz. Bunun sonucunda, materyal yüzeyinin tamamen serbest suyla kaplı olma durumu sona erer. Yüzeydeki nem, materyalin higroskopik limit değerine iner ve kuruma eğrilerinin eğimlerinde belirgin sapmalar gözlenir. Bu anda materyalin sahip olduğu nem düzeyine birinci kritik nem ve kuruma eğrilerinde bu durumu belirleyen noktaya birinci kritik nokta (BKN) adı verilir (Şekil 5.2 de 1 nolu nokta).

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi SHE, IE'nin sona erdiği nokta ile BKN arasında yer alır. Bu evre sırasında buharlaşan su miktarı, kuruyan materyalin cinsine, tipine ve şekline bağlı değildir. SHE sırasında buharlaşma hızının,

- materyal yüzeyindeki suyun buhar basıncı ile kurutma havasının kısmi buhar basıncı arasındaki fark
- kurutma havası hızı

ile ilgili olarak, tamamen çevre koşullarına bağlı olduğu kabul edilir.

Tarım ürünlerinin, özellikle tahılların, hasat sırasında sahip oldukları nem genellikle BKN değerinden daha azdır. Bu nedenle, sebze ve meyvelerin dışında kalan çoğu tarım ürününün kurutulması sırasında SHE rastlanmaz.

BKN değerinden sonra kuruma eğrisinin eğimi, azalan yönde hızla değişir. Bu noktadan itibaren, kuruma hızının zaman içinde giderek azaldığı bir başka evre başlar. Bu evre, ardışık

birim zaman aralıklarında buharlaşan nem miktarının, bir önceki zaman dilimine göre azalma göstermesi nedeniyle azalan hızla kuruma evresi (AHE) şeklinde tanımlanır.

AHE sırasında, suyun materyalin iç kısımlarından yüzeye iletim hızı, yüzeyden meydana gelen buharlaşma hızından az olduğu için, materyal yüzeyini tümüyle kaplayan ince su tabakası ortadan kalkar; yer yer kuru bölgeler oluşur. Yüzeyde oluşan su buharı basıncı, SHE sırasındaki doymuş buhar basıncı değerinden daha küçük değerlere iner. Yüzeydeki kuru alanların artmasıyla, materyal ısınmaya ve yüzey sıcaklığı kurutma havasının yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkmaya başlar. Yüzey tabakalarından iç katmanlara doğru ilerleyen sıcaklık artışının etkisiyle nem, materyalin içinde buharlaşmaya ve yüzeye gaz difüzyonu yoluyla ulaşmaya başlar. Kurumanın ileri aşamalarında, materyalin nem içeriği azaldıkça, suyun yüzeye ulaşmasında içsel buhar difüzyonunun önemi artar. Bu sonuç, SHE sırasındaki yüzey buharlaşmasına karşılık, AHE sırasında yüzeyden iç kısımlara doğru kuruma ilerledikçe kalınlığı giderek artan bir tabakadan, bölgesel buharlaşmanın ortaya çıktığını göstermektedir.

AHE'nin başlarında, yüzeye nem taşınımı üzerinde, SHE deki unsurların etkili olduğu görülür. Bu nedenle, AHE'nin başlarında buharlaşma hızının değişimi, yaklaşık olarak doğrusaldır. Ancak, belirli bir nem değerinden sonra kuruma hızında, nem azalması ve materyal sıcaklığı artışında izlenen düzgünlük değişir. Sıcaklık artışı hızlanırken, kuruma hızı ve nem azalması yavaşlar. Değişim eğrisel bir görünüm alır. Bu durum Şekil 5.2 de verilen ilgili eğrilerden de görülebilir. AHE sırasında kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı noktaya *ikinci kritik nokta* (IKN) ve materyalin bu andaki nem değerine *ikinci kritik nem* adı verilir (Şekil 5.2 de 2 no.lu nokta).

AHE sonunda, materyalin sıcaklığı ile çevrenin sıcaklığı eşit hale gelir. $M = f(t)$ eğrisi M_d değerine, $dM/dt = f(M)$ eğrisi sıfır değerine ulaşır (Şekil 5.2).

AHE sırasında kuruma hızı, dış çevre ile materyal iç yapısının özelliklerinden etkilenir. Bu evrenin başlarında, SHE de olduğu gibi dış etkenler daha önemlidir. Kurumanın ileri safhalarında ise iç etkenler daha baskın olmaya başlarlar. Örneğin, bu evrenin başlarında hava hızı kuruma hızı üzerinde etkiliyken, daha sonraları bu etkisini kaybeder[63].

5.2. Denge Nemi

Nem içeriği belli bir gıda maddesi, sıcaklığı ve bağıl nemi sabit bir ortamda yeterli bir süre bekletilirse, havadaki su buharı basıncıyla gıda maddesi tarafından tutulan suyun buhar basıncı arasındaki farka bağlı olarak, gıda maddesi nem alır veya nem verir. Denge halinde, gıda maddesinde gözlenen ağırlık değişimi durur. Bu durumda gıda maddesi tarafından tutulan suyun buhar basıncı, havadaki su buharı basıncına eşittir. İçinde bulunduğu havayla denge halinde bulunan gıda maddesinin içerdiği nem miktarına denge nemi, denge halindeki gıda maddesini

çevreleyen havanın bağıl nemine de denge bağıl nemi denir. Bir katı maddenin nemi

$$W_k = \frac{M_{H_2O}}{M_k}$$

M_{H_2O}

M_k : Katının kuru ağırlığı

W_k : Katının nem içeriği(%)

Kurutma işlemi sırasında denge nemi, kurutma sıcaklığına ve kurutmada kullanılan havanın bağıl nemine bağlı olarak kuru ürünün içerebileceği en az su miktarını gösterir[64].

5.3. Tarım Ürünlerinin İnce Tabaka Formunda Kuruması

İnce tabaka kavramı, kurutulacak ürünün yalnızca bir tanenin kalınlığına sahip olacak şekilde serilmesiyle elde edilen, kuramsal bir ürün tabakasını belirtir. Bu kavram, kurutma havasının bu tabakanın içinden geçerken sıcaklık ve nem değerlerinde bir değişikliğin olmadığı kabulünü yapabilmemizi sağlamaktadır.

Tarım ürünlerinin ince tabaka halinde kurutulması sırasında ısı ve kütle iletimi sabit ve azalan hızla kuruma evreleri için ayrı ayrı incelenir[65].

5.3.1. Sabit Hızla Kuruma Evresi

SHE, daha önce de belirtildiği gibi, ürünün içerdiği nem birinci kritik nem değerinden daha fazla olduğunda görülebilir. Tahılların kurutulması sırasında, eğer taneler doğrudan suyla temasa gelmemişlerse, bu evre görülmez[66].

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 yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu, 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 buharlaşandan yaklaşık %30 daha az olduğunu göstermektedir.

Bu evre sırasında, kurutma havası ile ürün arasındaki ısı ve kütle iletimi aşağıdaki eşitliklerle belirtilebilir[63]:

→ Kurutma havasından ürüne iletilen ısı miktarı

$$q = h.A.(T - T_s) \quad (5.2)$$

→ Üründen kurutma havasına birim zamanda iletilen su buharı miktarı

$$m_s = h_D.A(K_y - K_h) = \frac{h_D.A.M_s}{R.T_m} (P'_b - P_b) \quad (5.3)$$

→ Üründen ayrılan suyun buharlaşabilmesi için gerekli enerji:

$$E = m_s.q''_b \quad (5.4)$$

(5.2),(5.3) ve (5.4) numaralı eşitliklerden yararlanılarak, birim zaman içinde üründen ayrılan nem miktarı (kuruma hızı) aşağıda belirtilen eşitlik yardımıyla bulunabilir.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_D.A}{R_b.T_m} (P'_b - P_b) = \frac{h.A}{q_b} (T - T_s) \quad (5.5)$$

SHE sırasında, kurumayla ilgili bazı değerlendirmeler için, daha önce belirtilen esaslar göz önünde tutularak geliştirilmiş başka eşitliklerden de yararlanılabilir.

5.3.2. Azalan Hızla Kuruma Evresi

Azalan hızla kuruma evresi sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi sabit hızla kuruma evresine göre daha karmaşıktır. Yalnızca materyalin yüzeyinden konveksiyonla ısı ve kütle iletimi söz konusu değildir. Bu evrede, ürün içindeki ısı ve kütle difüzyonunun da dikkate alınması gerekmektedir.

Azalan hızla kuruma evresi sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematik modellerden yararlanmak mümkündür. Bu modellerin bazı yararlı ve sakıncalı yönlerinin olduğu kuşkusuzdur. Teorik modeller, her madde ve koşul için uygulanabilirler. Ancak, çözümü gereken eşitliklerin birçok parametre ve karmaşık yapı içermesi, bu tür modellerin kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Yan teorik modeller, daha az karmaşık olmakla birlikte, içerdikleri parametrelerin yalnızca ele alınan ürünlerle ilgili olması yaygın kullanım alanı bulmalarını engellemektedir. Deneysel yollarla elde edilen verilere dayanarak kuruma hızının belirlenmesinde, karmaşık matematik eşitlikler yoktur. Ancak, elde edilen eşitlikler deneme yapılan materyal ve deneme koşulları için geçerlidir; başka koşullarda kullanılamazlar.

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

- Ürün içindeki nem dağılımı homojendir.
- Kuruma madde içindeki nemin su ve buhar fazında difüzyonu sonucu oluşur.
- Difüzyon
 - nem konsantrasyonu farkı,
 - sıcaklık konsantrasyonu farkı ve
 - buhar basınçları konsantrasyonu farkı

gibi etkenlere bağlı olarak oluşur.

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

5.3.2.1. Azalan Hızla Kuruma Evresi İle İlgili Teorik Modeller

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 matematik model üç kısmi diferansiyel denklem takımından oluşmaktadır[66].

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P\end{aligned}\tag{5.6}$$

Yukarıdaki eşitliklerde 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 unsurlardan vazgeçilip, sadeleştirmeler yapılır. Örneğin, toplam basınç farkı nedeniyle oluşacak nem iletimi, tarım ürünlerinin kurutulması sırasında söz konusu dahi olamayacak derecede yüksek sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek büyüklüğe geleceğinden, denklem takımlarındaki basınç unsuru ihmal edilebilir. İkinci bir sadeleştirme, sıcaklık konsantrasyonu farkından ötürü meydana gelen nem iletiminin ihmal edilmesiyle yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, nem konsantrasyon farkına bağlı olarak

meydana gelen nem iletimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık farkına bağlı iletim, dikkate alınmayabilecek ölçülerdedir.

Yukarda sıralanan sadeleştirmeler sonucunda, AHE sırasındaki kuruma hızı, yalnızca bir kısmı diferansiyel denklemle ifade edilebilir şekle getirilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M \quad (5.7)$$

(5.7) numaralı eşitlikte “K” katsayısı yerine, difüzyon katsayısı “D” kullanılabilir. Bu durumda elde edilen denklem kartezyen ve küresel koordinat sistemlerine göre yazılırsa (5.8) ve (5.9) numaralı eşitlikler elde edilir.

(5.7) numaralı eşitliğin, kartezyen koordinat sistemine göre üç boyut için yazılışı:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right)}{\partial z} \quad (5.8)$$

(5.6) numaralı eşitliğin, küresel koordinat sisteminde difüzyon katsayısının sabit kaldığı durum için tek boyutlu yazılışı:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(R^2 \cdot D \cdot \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (5.9)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte R, materyalin ele alınan boyutunu (örneğin, materyal küre şeklindeyse yarıçapını) belirtmektedir.

(5.9) numaralı eşitliğin, küre, sonsuz yassı levha ve sonsuz silindirik cisimlerin, herhangi bir “t” anındaki ortalama nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan genel çözümü aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) \quad (5.10)$$

(5.10) numaralı eşitlikte yer alan M_o , M ve M_e sırasıyla ürünün ilk nemini, gözlem anındaki (t) nemini ve denge nemi değerlerini belirtmektedir. B_n ve μ_n çeşitli geometrik şekiller için eşitlikte yer alması gereken ifadeleri belirtmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.1. Çeşitli geometrik şekiller için B_n ve μ_n ifadeleri

GEOMETRİK ŞEKİL	B_n	μ_n
Küre	$6/\pi^2$	$n\pi$
Sonsuz yassı düz levha	$2/\mu_n^2$	$(2n-1)\pi/2$
Sonsuz silindir	$4/\mu_n^2$	$J_o(\mu_n^2)$ $\mu_1 = 2,405$ $\mu_2 = 5,520$ $\mu_3 = 8,654$ $\mu_4 = 11,792$

(5.10) numaralı eşitlikte yer alan “Fo_m” Fourier sayısını belirtmektedir. Fourier sayısı,

$$Fo_{m0} = Dt / R^2$$

olduğundan, bu değer (5.10) numaralı eşitlikte yerine koyulup, eşitlik küre şekilli cisimler için yeniden düzenlenirse

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-n^2 \pi^2 \frac{D \cdot t}{R^2}\right] \quad (5.11)$$

elde edilir. $\left[\pi^2 \frac{Dt}{R^2}\right]$ ifadesinin 1,2 den büyük olması durumunda, serinin yalnızca ilk teriminin dikkate alınmasıyla yapılan hata %5’i geçmez. Bu hata tarım ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili işlemler için kabul edilebilir olduğundan, seri açılımının ilk terimi alınıp ayrıca $\left[\pi^2 \frac{Dt}{R^2}\right]$ yerine (k) yazılarak, küre için basitleştirilmiş,

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (5.12)$$

eşitliği elde edilir.

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.

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)} \quad (5.13)$$

Eğer yassı düz levha için $\ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)}$ ifadesine karşı zaman grafiği çizilirse bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden D difüzyon katsayısı hesaplanır [67].

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 [65].

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_e) \quad (5.14)$$

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

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (5.15)$$

veya

$$\frac{dM}{M - M_e} = -kdt \quad (5.16)$$

Denklem 5.16' de ki diferansiyel eşitliğin çözümü aşağıdaki şekildedir,

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt) \quad (5.17)$$

Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulan (5.17) numaralı eşitlik Newton modeli olarak tanımlanır. (5.17) denklemi yardımıyla hesaplanan sonuçlar, deney

sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elde edilen değerlerin azalan hız evresinin birinci bölümüyle iyi bir uyum gösterdiği, ancak ikinci bölümde bazı sapmaların ortaya çıktığı görülür [63].

5.4. Tarım Ürünlerinin Kalın Tabaka Formunda Kuruması

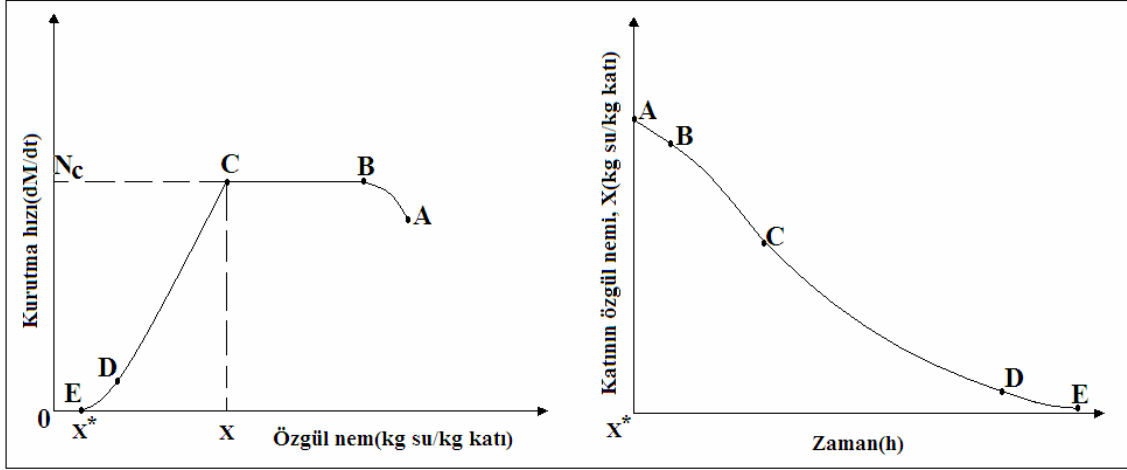
Kurumakta olan ürünün oluşturduğu tabakanın kalınlığı, bir tane kalınlığını aştığında, ince tabaka formundaki kuruma için geliştirilen eşitlikler yetersiz kalır. Bunun baş nedeni, kurutma havası özelliklerinin, kalın ürün tabakasından geçerken sürekli olarak değişime uğramasıdır. Kalın tabaka formundaki ürün yığınının kurumasına ilişkin olarak geliştirilen yöntemler, ürün tabakasının hareketsiz ve hareketli olmasına göre farklılık gösterir[65].

5.5. Kurutma Hızı

Kurutmacılıkta esas, kurutulacak ürünlerdeki suyu buharlaştırmak, sonra da bu buharı ortamdaki uzaklaştırmaktır. Bu durumda buharlaşma ısısını sağlamak gerekir. Bu ısı normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak 1 kg su için 590 kcal'dir [68]. Kurutma işlemi Şekil 5.4 ve 5.5'de gösterilmiştir. Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını belirler. Kurutma hızını teorik yoldan elde etmek oldukça zordur. Bu büyüklük en sağlıklı şekilde deneysel yoldan belirlenir. Deneyler sırasında madde nemi zamana bağlı olarak ölçülür. Deneylerden hesaplanan kuruma hızı, zaman veya katıdaki serbest nem üzerinden diyagramlara taşınırsa genel olarak kurutma eğrileri elde edilir. Kuruma hızı-zaman eğrileri kuruma zamanını verdiğinden ayrı bir önem taşır. Kaliteli ürün eldesi ve ısı ekonomisi açısından kurutma hızı büyük önem taşımaktadır. Bir ürünü kuruturken en elverişli kurutma hızını elde etmek için örnek kurutma çalışmaları yaparak kurutma eğrilerini belirlemek gerekmektedir[69].

Kurutucularda ürünün kurutulması için kullanılan havanın hızı, nemi, sıcaklığı ve kuruyan yüzey üzerindeki akış yönü sabittir. Kurutulacak olan ürünün ağırlığı zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenerek (kuru madde baz alınarak) nem içeriği tespit edilebilir. Şekil 5.4'de bu durumun değişim grafiği görülmektedir. Burada C değeri, kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili bir çok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın oluştuğu duruma kritik nokta adı verilir. Kritik nokta sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgeler. Şekil 5.5'de AB bölgesi kurutucu ve ürünün ısınma süresini göstermektedir. BC bölgesinde buharlaşma ürünün yüzeyinde oluşan sıvı film tabakasıyla gerçekleşmektedir. Şekil 5.4'de gösterilen kurutma hızı eğrisi kurumadaki çeşitli periyodları içermektedir. Başlangıçta nem, doymuş halde bulunan yüzeyden buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Kurutma ilerledikçe doymuş halde bulunan yüzey alanı kademeli olarak azalır. Bunu maddenin iç kısmındaki suyun buharlaşması izler. CD bölgesinde

ise ürün yüzeyine difüze edilebilen su buharlaşmaktadır. Bu nedenle BC bölgesinde kurutma hızı sabit kalmakta ve CD bölgesinde ise doğrusal olmaktadır. DE bölgesi, ürün içindeki suyun yüzeye çok yavaş difüze edildiği bölgedir. Şekil 4.4'deki AB kararsız durumu, BC ise sabit hız



Şekil 5.4. Özgül nemin bir fonksiyonu olarak kurutma hızının değişimi

Şekil 5.5. Kurutma eğrisinin zamana göre değişimi

5.6. Kurutma Modellerinin Sınıflandırılması

Bundan önceki kısımda özet şeklinde verilen kurutma mekanizmalarının yardımı ile azalan kuruma devresinde oluşan kurutma olayını açıklamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bu kurutma modelleri genel olarak basit modeller ve karmaşık modeller adı altında iki ana başlık altında toplanır. Basit model türünde kurutma mekanizmalarından sadece bir tanesinin azalan kuruma hızı devresindeki kurutma hızını kontrol ettiği kabul edilir. Karmaşık modellerde ise iki veya daha fazla kurutma mekanizmalarının aynı anda meydana geldiği ve kurutma hızını beraberce etkiledikleri kabul edilir. Basit modeller başlıca iki şekilde olur[71].

- Difüzyon Modeli
- Kılcal Akım Modeli

Karmaşık modeller için genel bir adlandırma mümkün olmadığı için, ilgili modeller konusunda uzun süre araştırma yapan grupların liderlerinin isimlerine göre tanımlama yapılması uygun görülmüştür. Bu yaklaşım sonucu karmaşık kurutma modelleri şunlardır.

- Peck Modeli
- Lykon Modeli
- Morgan Modeli

5.6.1. Basit Kurutma Modelleri

Difüzyon Modeli

Azalan kuruma devresinde katının iç gözeneklerinden yüzeyine doğru sıvı nem akımı meydana geldiğini kabul eder. Bu akımı kontrol eden, ilgili noktalar arasındaki nem konsantrasyonu farkının etkisi ile etkilenen ve Fick kanununa uyan sıvı nemin akım hızı, çeşitli sınır şartları için

$$\frac{dC}{dt} = D_L \frac{d^2 C}{d^2 X} \quad (5.18)$$

çözülmesi ile elde edilir. Elde edilmiş çözümlerin geçerliliği birçok maddenin kurutulmasında deneysel yöntemlerle ispatlanmıştır. Genel olarak bu difüzyon modelinin iç gözenekleri çok küçük olan katılarda geçerli olduğu gözlenmiştir.

Kılcal Akım Modeli

Katının iç gözenekleri büyük olursa, katının azalan kuruma devresindeki nem akımının gözenekler arasından kılcal akım mekanizması prensiplerine göre oluştuğu kabul edilerek, kurutma hızı çeşitli kılcal akım modellerine göre hesaplanır. Bu model kurutma mekanizmasını difüzyon modeline göre daha iyi bir biçimde tanımlamasına rağmen, modelin matematiksel formülasyonu oldukça zordur. Bunun yanında difüzyon modeli kurutma zamanını tam olarak vermemesine rağmen, kullanılması oldukça basittir.

5.6.2. Karmaşık Kurutma Modelleri

Bu modele göre katının sıvı nemi kurutma sırasında yüzeye doğru kılcal akım ve difüzyon kurutma mekanizmalarının birbirlerinin seri veya paralel biçimde tamamlanması sonucu hareket eder. Modelin kurutma zamanını kolayca açıklayabilmesi için katı maddenin iki fiziksel özelliğinin bilinmesi gereklidir. Birincisi, difüzyon akımını simgeleyen su buharı-sıcak hava difüzyon katsayısı ve ikincisi ise, kılcal akım potansiyelini simgeleyen nem iletkenlik katsayısıdır. Bu iki katsayı genellikle katının cinsine, gözeneklerin yapısına ve katıdaki sıcaklık, nem değişimine bağlıdır. Dolayısı ile ancak deneysel yollarla elde edilebilir. Modelin kullanılabilmesi için gerekli olan katsayıların fazlalığı, deneysel yollarla elde edilebilme mecburiyeti, sıcaklık ve nem değişiminin değişken bir fonksiyonu olması ve hatta tüm bu gereksinimler sağlansa bile kurutma hızını hesaplamak için çok karmaşık ve uzun bir hesaplama yöntemine ihtiyaç göstermesi bu modelin başlıca arzu edilmeyen tarafıdır.

Peck Modeli

Azalan kuruma devresinde kurutma hızını etkileyen faktörlerin sadece katının özelliklerini yansıtan içyapısal faktörlerden oluştuğu bu modelde kabul edilmemiş ve katının içinde oluşan kurutma mekanizmasına ilaveten yüzeyde dış etkenlerden meydana gelen diğer faktörlerde göz önünde tutulmuştur. Kılcal akım mekanizmasının kurutma hızını kontrol ettiği varsayılmış, yüzeyde Newton soğuma ifadesi yardımı ile meydana gelen kurutmaya engel olan etkenlerin, katının içindeki engellemeye olan oranları matematiksel olarak bulunmuştur.

İnce katıların düşük sıcaklıklarda kurutulduğu durumlarda bu model oldukça tatminkar sonuçlar vermiştir.

Lykon Modeli

Kurutma sırasında katının içinde oluşan ısı ve kütle transferine ilave olarak hidrodinamik kuvvetlerin etkisi altında meydana gelen üçüncü bir transfer mekanizması bu modelde öngörülmüştür.

Sistem modeli karmaşık ve birbirini tamamlayıcı bir özellik gösterdiği ve deneysel yollarla elde edilmesi gereken çok fazla katsayıya ihtiyaç gösterdiği için eldeki mevcut çözümleri genellikle uygulamaya dönük değildir.

Morgan Modeli

Bu modele göre katı madde iki kısma ayrılır. Birinci kısımda katının iç gözenekleri tamamen sıvı nem ile doludur ve bu kısım adeta bir su havuzu durumundadır. Kurutma sırasında bu havuz içindeki nem kılcal borular ile yüzeye doğru hareket eder ve bu sırada da sıcaklığı yükselir. Belli bir sıcaklıktaki sıvı hala katı yüzeyine ulaşmamışken buharlaşma meydana gelir. Buhar haline geçen nem tamamen kuru katının ikinci bölgesinde difüzyon mekanizması ile yükselir ve yüzeye ulaşır. Kurutma devam ederken kuru olan ikinci bölgeyi birinci kısımdan ayıran ve yüzeye paralel bir şekilde hareket ettiği varsayılan buharlaşma düzlemi ayırır. Kurutmaya karşı çıkan en büyük fiziksel engelleme başlıca iki şekilde olur. Buharlaşma düzleminde sıvı nemin buhar haline dönüşümü ve buhar halindeki nemin kuru kısımdan difüzyon mekanizmasına göre hareketi. Bu modeldeki yaklaşım çok karmaşık bir matematiksel modelleme ve çözümüne gereksinim gösterdiği için model genellikle bir boyutlu sistem geometrisi için incelenebilmiştir.

5.7. Kurutmanın İç ve Dış Koşulları

Bir katının kurutulması sırasında aynı anda iki temel prensip birden oluşur.

a) Sıcak gazdan, katı bünyesinden buharlaşan sıvıya doğru "ısı transferi" ve

b) Katının iç kısımlarından dış yüzeyine doğru, sıvı yada buhar olarak, dış yüzeyden sıcak gaz içine doğru ise "kütle transferi" işlemleridir.

Bu işlemleri belirleyen koşullar aynı zamanda kurutma işlemlerini de belirleyen koşullardır. Bunlar iki kısımda incelenir.

a) Katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan, iç difüzyon, kılcallık gibi iç koşullar.

b) Kurutucu olarak kullanılan sıcak gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış koşullar.

Kurutma üzerinde yapılan araştırmalarda önceleri iç koşullara bağlı çalışmalar esas alınmıştır. Son zamanlarda, daha kolay uygulama imkanları vermesi, daha çabuk tasarım ve değerlendirmeler yapılabilmesi, en önemlisi de kontrol edilebilir olması nedeniyle dış koşullara bağlı çalışmalar genellik kazanmıştır [69].

5.8. Kurutmada Meydana Gelen Başlıca Değişmeler

5.8.1. Fiziksel Değişmeler

Yöresel kuru madde birikimi: Meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında çoğu geri dönüşsüz fiziksel ve kimyasal değişmeler belirlemektedir. Bunlardan birisi olan yöresel kuru madde yığılması, doğrudan doğruya kuru madde yığılması ve doğrudan doğruya kuru madde hareketine bağlıdır. Kuruyan materyalin dış yüzeyindeki suyun uzaklaşmasına paralel olarak, iç tabakalardaki su yüzeye hareket etmektedir böylece suyun dokudaki gözenekler içindeki hareketi, doğrudan doğruya bir sıvı hareketi şeklinde veya su buharı şeklinde veya bireysel serbest su molekülleri şeklinde olmak üzere değişik tipte olabilmektedir. Eğer suyun hareketi kurumunun başlangıç aşamalarında olduğu gibi bir sıvı hareketi şeklindeyse, su içerisinde erimiş maddelerde beraberinde taşınır. Böylece alt tabakalardaki kuru madde su ile yüzeye kadar taşınır ve su uzaklaşıp gidince, yüzeyde bir kuru madde yığılması görülür. Ancak bu yolla yüzeyde kuru madde konsantrasyonu artınca, iç kısımlarda düşmüş konsantrasyonu dengelemek amacıyla bu defa yüzeyden içeri doğru bir kuru madde akımı belirir. Şüphesiz buda, iç tabakalarla yüzey arasında devamlı bir sıvı bağlantısı bulunması durumunda yani, suyun yüzeye “sıvı hareketi” şeklinde hareket ettiği dönemde gerçekleşebilir. Kurutmada uygulanan koşullara göre, kuru maddenin tanımlanan bu hareketlerinden biri egemen olabilir ve bunun sonucu olarak yüzeyde veya merkezde aşırı bir kuru madde birikimi belirebilir. Meyve ve sebzelerde hücre suyu, hücre duvarını aşarak dışarı çıktığından hücre zarının geçirgenliğine bağlı olarak, su ile hareket eden maddelerin niteliği farklıdır. Ancak genellikle bunlar küçük moleküllü maddelerdir[72].

Benzer bir olayda hücre sıvısının tümünden yüzeye ve hatta dışarı akmasıdır. Ancak bu, daha farklı bir şekilde gelişir. Meyve ve sebzelerin kurutulmasında daha kurumunun başlangıcında dahi, yüzeyde kuru bir tabaka oluşur. Hatta kuruyan materyal, içten dışa doğru bir alttakine göre biraz daha kurumuş tabakalar halinde bulunur. Kurumuş tabakalar büzülerek iç

kısımlara basınç yapar. Bu basınç ise, iç tabakalardaki hücre sıvısının gözenek ve çatlaklardan dışarı doğru akmasına neden olur. Böylece yüzeye ulaşan sıvının hücre içinde bulunan tüm maddeleri içerdiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle yüzey; yapışkan, cıvık bir sıvı ile kaplanır. Bu olgu özellikle, erik ve kaysı gibi yumuşak dokulu meyvelerin kurutulmasında kendini gösterir.

Kabuk bağlama: Kabuk bağlama kurutma koşullarının hatalı seçilmesi sonucu oluşan bir olaydır. Kabuk bağlama; kurumanın ilk aşamasında yüksek sıcaklık uygulamasından kaynaklanır. Böylece yüzeyde hızla oluşan kuru tabaka büzüşme, sonucu alt tabakalara baskı yapar. Ancak alt tabakalar henüz o kadar ıslaktır ki, üstten yapılan basınca direnç gösterir. Bu durumda kuruma sonucu büzüşme olanağı bulamayan üst tabaka gerilip sert bir kabuk haline dönüşür. Böylece oluşan sert kabuk, kurumanın ileri aşamalarında, alt tabakalar kuruyup buruşsa dahi bir daha göçmez ve fakat alt tabakalardan ayrılarak sert bir tabaka yapısını korur. Kabuk bağlama ile birlikte kuruma hızı birden bire düşer.

Kabuk bağlama şeker ve benzer maddelerce zengin materyallerde, örneğin meyvelerde, sık görülür. Bunlarda olay biraz daha farklı gelişir. Nitekim bu tip materyallerde oluşan kabuk, su buharının difüzyonunu engelleyici camsı bir nitelik gösterir. Bu durumda alt tabakalardaki su, bu tabakayı aşamadığından kuruma tümünden durur ve ürün; dışı kuru ve sert, içi ıslak bir halde kalır. Artık kurumanın tamamlanması çok zorlaşmıştır.

Tanımlanan bu oluşumlara kabuk bağlama denir. Görüldüğü gibi kuruma hızı, kurutulmuş ürünün kalite ve niteliklerini etkileyen en önemli faktördür. Kurutma koşulları ayarlanarak, “kabuk bağlamanın” önlenmesi olanaklıdır.

Kitle yoğunluğunda değişimler: Herhangi bir materyalin birim hacminin ağırlığına kitle yoğunluğu denir. Kurutulmuş bir ürünün kitle yoğunluğu, onun kurutulmasında uygulanan koşulların bir belirteçidir. Ayrıca kitle yoğunluğu, kurutulmuş ürünün bir kalite ölçüsüdür.

Eğer kurutulan herhangi materyalde hiçbir büzüşme, buruşma olmasa ve materyal kurutma sonunda da başlangıçtaki boyutlarını korusa, bu materyalin kurutma sonundaki kitle yoğunluğu sadece kaybedilen su kadar azalır. Fakat kurutulan maddelerde, özellikle meyve ve sebzelerde daima bir buruşma, büzüşme ortaya çıkar.

Gıda maddeleri genelde elastik özellik gösteren materyallerdir. Kusursuz elastik bir maddeden su uzaklaşınca büzüşme miktarı ile kaybedilen su arasında doğrusal bir ilişki vardır. Ancak gıdalar her ne kadar elastik özellikteyse de kusursuz bir elastikiyet taşımadıklarından kurutulan gıdalarda büzüşme ile su kaybı arasında lineer bir ilişki görülmez. Her ürün, kurutmada uygulanan koşullara bağlı olarak kendine özgü bir buruşma niteliği gösterir. Buna göre kurutulan materyalin hacmi az veya çok düşerek kurutulmuş ürünün kitle yoğunluğu değişir.

Kurutma koşulları eğer; iç kısımlarına göre materyal yüzeyinin daha fazla ve hızlı kurumasına neden olmayacak kadar ılımlıysa, tüm kitle beraberce kurur ve muntazam bir buruşma belirterek materyal şeklini kaybeder ve hacmi son derece küçülür. Böyle bir ürünün kitle yoğunluğu çok yüksektir. Buna karşın önce yüzeyde aşırı bir kuruma oluşacak şekilde hızlı bir kurutma uygulanırsa, dış tabakalar sertleşir ve ürünün içi henüz ıslak kalır. Daha sonraki kuruma aşamalarında nihayet alt tabakalarda kurur. Ancak sertleşmiş dış tabaka, daha sonra kuruyan alt tabaka üzerine çökemediğinden kurumuş ürünün içinde kat kat boşluk ve çatlaklar oluşur. Böyle bir kurumuş ürün dış görünüşüyle, orjinaline benzer ve sanki hiç buruşma olmamış veya çok az olmuş izlenimini verir. Bunlarda kitle yoğunluğu çok düşüktür. Kitle yoğunluğu düşük olan kurutulmuş ürünlerin iç kısmında bir sürü boşluk ve çatlak bulunduğundan bunların kesiti incelenirse bazen bir petek görüntüsü ortaya çıkar.

Açıklıkla ortaya konduğu gibi kitle yoğunluğu, bir ürünün kurutma koşulları hakkında bilgi veren önemli bir değerdir. Aynı ürünün; düşük kitle yoğunluğunda ve yüksek kitle yoğunluğunda olmasının olumlu ve olumsuz yönleri vardır. Kitle yoğunluğu düşük olanlar tüketici tarafından tercih edilir. Çünkü her şeyden önce aynı ağırlıktaki mal daha fazla görülür. Ayrıca bunların rehidrasyon yetenekleri daha iyidir, yani daha fazla ve hızlı su absorbe ederler. Kurumuş ürün orjinaline daha fazla benzer. Ancak bunların ambalaj, depo ve taşınma masrafları daha fazladır. Ayrıca içerdeki boşluklar aynı miktar ürünün yüzey alanının çok stabilitesi azdır. Ayrıca rehidrasyonda bazen tabaka tabaka dağılma görülebilir. Yoğunluğu daha fazla olan kuru ürünler, özellikle bunları başka ürünlere işleyen imalatçılar tarafından tercih edilirler.

Kurutulmuş ürünün rehidrasyon yeteneği: Kurutulmuş bir üründe aranan en önemli nitelik, bunun kullanılması sırasında verilen su ile eski haline dönüşebilme düzeyidir. Yani kurutulmuş bir ürün suda tutulunca, taze halinde içerdiği kadar su alarak eski haline ve şekline dönüşürse, mükemmel niteliklerde olduğu kabul edilir. Bu özellik dondurularak kurutulmuş ürünlerde önemli ölçüde sağlanabilirse de, geleneksel kurutma yöntemleriyle kurutulanlarda önemli ölçüde kaybedilmiş olur. Rehidrasyon yeteneği sadece parça halinde kurutulan ürünlerde değil, aynı zamanda sıvı halde kurutulup toz haline getirilen, meyve tozu, domates tozu ve süt tozu gibi ürünler içinde geçerlidir. Özellikle toz halindeki bu ürünlerin suda tümünden ve hızla eriyip dağılması istenir. Bu niteliğe “instant özellik” denir. Ürünlerin rehidrasyon yeteneği veya instant özelliği kuruma koşulları ile yakından ilgilidir.

5.8.2. Kimyasal ve diğ er değişmeler

Kurutma sırasında yukarıda değinilen fiziksel değişmelere paralel olarak çeşitli kimyasal değişmelerde belirir. Bu değişiklikler kendisini, kurutulmuş ürünün veya rehidre edilmiş ürünün, renginde, lezzetinde, tekstüründe, viskozitesinde, besleme değeri ve depolama stabilitesinde gösterir. Bu değişmelerin oluşumu veya düzeyi her üründe kendine özgü bir şekilde değişir. Ayrıca, kurutma işleminde uygulanan ısının şiddeti, bu değişimlerin düzeyini etkileyen en önemli faktördür. Ancak her kurutulan üründe daima ortaya çıkan olumsuzluk rengin esmerleşmesidir. Renk esmerleşmesi kurutmadan önce, kurutma sırasında ve/veya depolama süresinde oluşur. Renk esmerleşmesi enzimatik veya enzimatik olmayan reaksiyonlar sonucu olabilir. Meyveler başta olmak üzere haşlanmadan kurutulan ürünlerde oksidasyon enzimlerinin faaliyetiyle, başta polifenoller olmak üzere birçok maddenin oksidasyonuna dayalı renk esmerleşmesi kendini gösterir. Kurutmada uygulanan havanın sıcaklık derecesi, materyaldeki enzimleri inaktif hale getirmeye çoğu kez yeterli gelem ez. Bilindiği gibi materyal, kurutma sırasında uygulanan yüksek sıcaklığa rağmen suyun buharlaşması sonucu daima soğuk kalır.

Renk esmerleşmesini önlemede en önemli olanak, ürünün kükürt dioksit gazı ile kükürtlenmesidir. SO_2 bir taraftan enzimleri inaktif hale getirmekte, diğ er taraftan özellikle enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarını engellemektedir. Kükürt dioksit gazı ayrıca daha önce oluşmuş esmer rengin açılıp düzeltilmesini de sağlamaktadır. Ancak SO_2 , antosiyaninlerle reaksiyona girerek onların renginin kaybolmasına neden olduğundan pembe mor renkli ürünlerde uygulanmazlar.

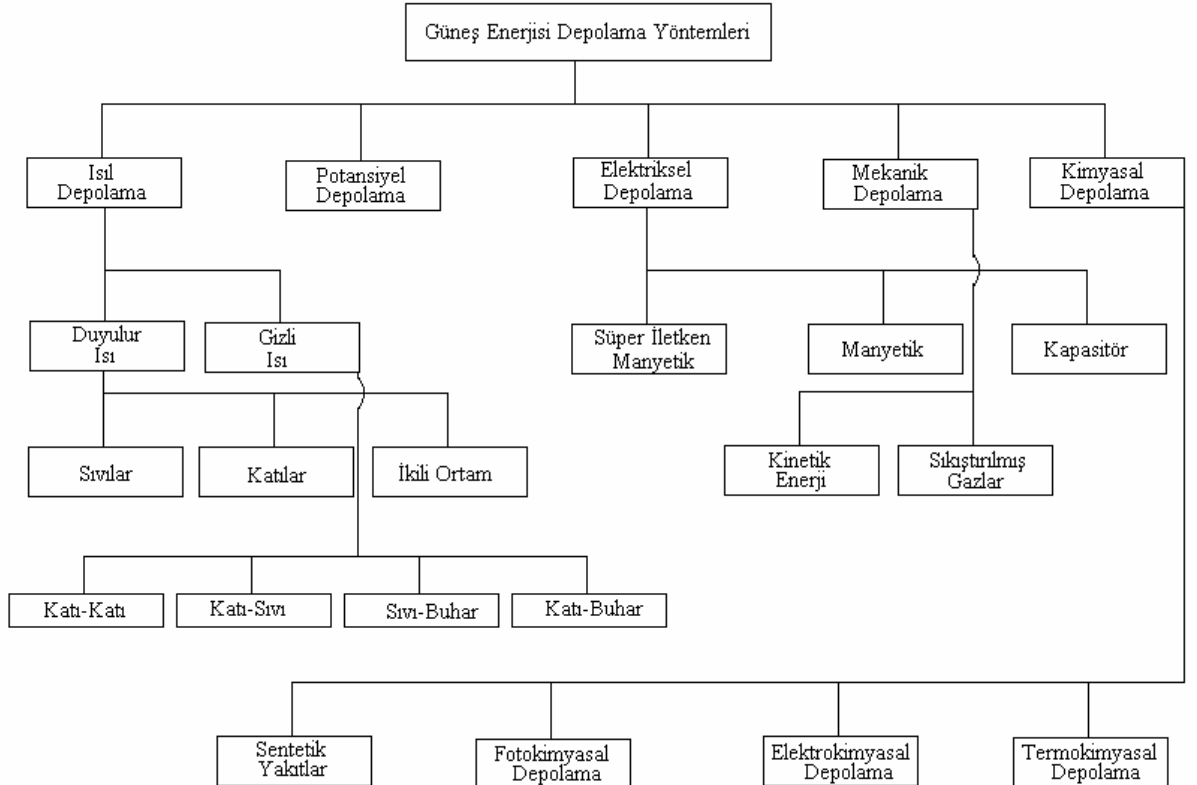
6. GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Güneş enerjisinin en büyük dezavantajlarından biri düzensiz olmasıdır. Bulutlu havalarda güneşten elde edilen enerji düşer. Mevsimlerin değişimi ile gün uzunluğu ve güneşlenme süresi değişir. Geceleri ise hiç yoktur. Bu etkenler güneş enerjisinin depolanması gereğini ortaya çıkarır.

Güneş enerjisinin temel depolama yöntemleri;

- Isıl depolama
- Potansiyel enerji olarak depolama
- Elektriksel depolama
- Mekanik enerji olarak depolama
- Kimyasal enerji olarak depolama

başlıkları altında toplanabilir(Şekil 6.1). [73]



Şekil 6.1. Güneş enerjisi depolama yöntemleri[73]

6.1. Isıl Depolama

Mevcut ısının sonradan kullanılması için, başka bir maddeye çeşitli yollarla depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda tekrar bu ısının kullanılması işlemine ısı depolama denilmektedir.

Isı depolama sistemleri; yüksek ısı depolayıcıları ve düşük ısı (güneş ve düşük termal enerji) depolayıcıları olarak ikiye ayrılırlar.

Yüksek ısı depolayıcıları; 235 ° C ve 345 °C arasında çalışırlar. İyi dizayn edilmiş yüksek ısı depolama tankının verimi % 85-95 arasında olmalıdır[74].

Düşük ısı depolayıcıları; ısı enerjisinin suyun normal kaynama noktası olan 100 °C 'yi geçmediği sistemlerdir[75]. Düşük sıcaklıkta mevcut enerjinin depolanabilmesi, enerji kaynağı olarak güneş enerjisinden faydalanılıyorsa; gündüzden geceye, ya da ihtiyaç duyulduğu günlerde kullanmaya, eğer termal enerjiden faydalanılıyorsa; sonra kullanılmaya imkan verirler.

Enerji ısıtma amaçlı olarak kullanılıyorsa depolama da ısı olarak yapılabilir. Böylece hiç bir dönüşüm yapılmayacağından basit malzemeler kullanılacak ve dönüşümden kaynaklanan enerji kayıpları oluşmayacaktır.

Isıl depolayıcı maddelerde istenen bazı temel özellikler aşağıda verilmiştir[52].

- Kompakt olmalı, birim hacim ve kütle için ısı depolama kapasitesi yüksek olmalıdır.
- Depolama verimliliği yüksek olmalıdır.
- Sıcaklık dağılımı düzenli olmalıdır.
- Çalışma sıcaklığı aralığı ısı depolama ortamı ile uyumlu olmalıdır.
- Çevrimsel işlem geçirebilme özelliklerinde olmalı, yapısı bozulmamalıdır.
- Çok fazla sayıda ısı depolama ve ısı depolama çevrimlerinde, ısı depolama kapasitesi ve verimliliğinde kayıp olmaksızın çalışabilmelidir.
- Çevreye olan ısı kayıpları ve çevrimin gerçekleşebilmesi için harcanan ısı ihmal edilebilecek kadar küçük olmalıdır.
- Uzun ömürlü olmalıdır.
- Kurulum ve işletme maliyetleri düşük olmalıdır.
- Korozyon olmamalı, kullanılan malzemeye uyumlu olmalıdır.
- Yangın ve zehirlenme tehlikeleri olmamalıdır.

6.2.1. Düşük Sıcaklıkta Isı Depolama

Depolama sıcaklık aralığı 0-100 °C olan, iki tip düşük sıcaklıkta ısı depolama sistemi bulunmaktadır. Bunlar duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama şeklindedir.

6.2.1.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama, maddenin faz değiştirmeden sıcaklığının yükseltilmesi ile ısı depolanmasıdır. Depolama ortamı olarak çeşitli maddeler kullanılabilir. Bunlardan en çok kullanılanları sudur. Kolay bulunabilen ve maliyeti çok düşük olan suyun diğer üstün özellikleri; çalışma aralıklarının ideal aralıklarda olması, ısı depolama kapasitesinin yüksek olmasıdır[76]. Suyla yapılan depolamanın en genel şekli ülkemizde sıkça kullanılan kolektör ve depo sistemidir. Bu sistemde su sadece birkaç gün depolanabilir.

Diğer bir ısı depolama şeklide yeraltında bulunan sulara depolamadır. Güneşten alınan ısı enerjisi, bir ısı değiştiricisi yardımıyla yeraltından çekilen suya verilir ve su tekrar yeraltına gönderilir. Su, ısı iletim katsayısı çok düşük olan ve su geçirmeyen taşlı ya da killi tabakaların arasında bulunmalıdır ve sabit olmalıdır.

Duyulur ısı depolamanın bir diğer yolu da katı maddelerde depolamadır. Isı depolama materyali olabilecek bir çok madde mevcut olmakla birlikte depolamada kullanılan malzeme genellikle çakıl taşlarıdır. Çakıl taşlarının ısı depolama katsayılarının çok yüksek olmamasına rağmen kolay bulunması ve maliyetlerinin düşük olması tercih edilmelerine sebep olur.

Duyulur ısı depolama sistemlerinin etkili olması, kullanılan maddenin özgül ısıya ve hacim önemiyse depolama maddesinin yoğunluğuna bağlıdır. Tablo 6.1’de önemli duyulur ısı maddeleri için yoğunluk (ρ) ve özgül ısı (C_p) değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1. Duyulur ısı depolama maddelerinin C_p ve ρ değerleri[77]

Madde	Yoğunluk(kg/m ³)	Özgül ısı(J/kgK)
Su	1000	4179
Çakıl taşı	2500-3500	880
Dökme demir	7280	540
Saf bakır	8954	383
Beton	2240	1130
Motor yağı	888	1880
Su-etilen glikol	1050	347

Sıcaklığı T_1 ve kütlesi m olan bir maddenin sıcaklığının T_2 sıcaklığına yükseltilmesi durumunda, ısı kapasitesi ve dolayısıyla duyulur ısı;

$$Q_d = mC_p (T_2 - T_1) = v\rho C_p \Delta T \quad (6.2)$$

şeklinde yazılabilir[51].

ΔT sıcaklık farkında depolanan ısı enerjisinin fazla olması için, hacimsel özgül ısısının (ρC_p) büyük olması gerekmektedir.

Depolama sisteminin performansına; çalışma sıcaklığı, depolama maddesinin ısı iletkenliği, yüksek çalışma sıcaklığında maddenin kararlılığı ve sistemin maliyeti gibi faktörler etki eder.

Duyulur ısı depolama sistemlerinin en cazip özelliklerinden birisi de, şarj-deşarj işleminin tersinir olmasıdır. Maddenin tersinirlik özelliği ekonomik ömrü boyunca devam eder.

Duyulur ısı depolama sistemlerinin genel işletme problemlerinin önemli olanları aşağıda verilmiştir;

- Isı depolama esnasında depolama sıcaklığı devamlı arttığından, sistemdeki ısı kayıpları orantılı olarak artar.
- Sistemden ısı çekerken depolama sıcaklığı devamlı azalacağından maddenin ısı verme kapasitesi devamlı düşer.
- Isı depolama işlemi, çevre sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta olmaktadır. Bundan dolayı sistemde iyi bir izolasyon gereklidir. Buda sistemin maliyetini artırmaktadır.
- Isı kaynağının sıcaklığının devamlı olarak değişmesi nedeniyle depolama sıcaklığı sabit tutulamamaktadır.

Isı ortamına göre duyulur ısı depolama; sıvı ortamda depolama, katı ortamda depolama ve ikili(karışık) ortamda depolama şeklinde sınıflandırılabilir[51].

6.2.1.2. Gizli Isı Depolama

Herhangi bir maddenin ısıtılması veya soğutulması esnasında faz değiştirirken sıcaklığının sabit kaldığı andaki ısı gizli ısı olarak adlandırılır.

Bir sıvı soğutulmaya başladığı zaman molekülleri gitgide daha yavaş hareket etmeye başlar. Soğutma sırasında öyle bir sıcaklığa gelir ki, moleküller olabildiğince düşük kinetik enerjiye sahip olurlar ve moleküller arası çekim kuvvetleri onları bir kristal içinde istiflemeye

başlar. Bu durumda sıvı donmaya başlıyor denir. Kristal içinde belli noktalarda yerlerini alan moleküllerin kinetik enerjileri sıvı fazda kalanlara oranla daha düşüktür. Bu nedenle sıvı fazdaki moleküllerin sıcaklığı ve dolayısıyla ortalama kinetik enerjileri yükselecektir. Bu durumda sıvı fazdan ısı çekerek sıcaklığın düşürülüp donma olayının hızlandırılması gereklidir.

Katı ve sıvının 1 atm basınç altında dengede bulunduğu sıcaklığa normal donma noktası adı verilir. Donma sıcaklığı tüm sıvı donana kadar sabit kalır. Donma noktasındaki bir mol sıvıyı dondurabilmek için sistemden uzaklaştırılması gereken enerjiye molar kristallenme (donma) enerjisi adı verilir. Sıvı ve katı fazların enerjileri arasındaki farka eşit olan bu büyüklük ΔH_d ile gösterilir.

Kristal halindeki maddeler ısıtıldıklarında 1 atm basınç altında kurulan katı-sıvı dengesinin sıcaklığına normal erime noktası denir ki, bu sıcaklık donma sıcaklığı ile aynıdır. Bir mol katıyı erime sıcaklığında sıvı hale getirmek için sisteme verilmesi gereken ısıya molar erime ısısı denir. ΔH_e ile gösterilir.

Molar erime ısısı, sisteme dışarıdan verildiği için(endotermik) artı işaretlidir. Molar donma ısısı sistemden dışarıya verildiği için(ekzotermik) eksi işaretlidir. Molar donma ısısı ile molar erime ısısı mutlak değerce birbirine eşittir.

Bir katı cismin birim kütlesini sıcaklık değişimi olmadan sıvı hale getirmek için, verilmesi gereken ısı miktarına erime gizli ısısı denir.

Bütün maddeler faz değiştirebilir, fakat bir çok maddenin faz değişimi arzulanan sıcaklıkta değildir. Gizli ısı depolanmasında bazı kimyasal maddelerin faz değişimi sırasında enerji absorbe etme yetenekleri kullanılır. Kullanılan malzemelerin ısı depolama kapasiteleri genellikle yüksektir ve düşük sıcaklık aralıklarında büyük ısılar depolanabilir. Faz dönüşümü katı-katı, katı-sıvı, sıvı-buhar ve katı-buhar şeklinde olabilir.

Katı-katı faz dönüşümü bir maddenin kristal yapısının değişmesi ile meydana gelir. Depolanın ısı ve hacimdeki değişim ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu yüzden uygulamada genellikle bu çeşit faz dönüşümü kullanılmaz.

Katı-buhar ve sıvı-buhar dönüşümlerinde depolanın ısı çok yüksektir. Ancak buhar halindeki maddeyi tutmak için gerekli hacim çok büyük ve basınç taşıyabilecek yetenekte olmalıdır. Bu da sistemin pahalı ve karmaşık olmasına neden olur ve sistem uygulanabilirlikten uzaklaşır.

Gizli ısı depolanmasında, daha çok katı-sıvı faz değişiminden yararlanılır. Güneş enerjisiyle her maddeye katı-sıvı faz değişiminde enerji depolanmaz. Bunun nedeni güneş

enerjisiyle depolayabilmek için kullanılacak maddelerin düşük sıcaklıkta faz değiştirme özelliklerine sahip olmaları gerekmesindendir[78].

Eriyerek faz değiştiren maddelerle, gizli ısı depolaması yanında duyulur ısı depolaması da yapılır.

Erime sıcaklığı T_e olan bir maddenin katı haldeki sıcaklığı T_1 ve sıvı haldeki sıcaklığı T_2 ise katı halden sıvı hale geçen bir maddenin depoladığı ısı miktarı;

$$Q_g = m(c_p)_k (T_e - T_1) + mh_{ks} + m(c_p)_s (T_2 - T_e) \quad (6.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; m maddenin kütlesi, h_{ks} erime gizli ısıdır.

Herhangi bir maddenin faz değişimi esnasındaki gizli ısısından faydalanarak güneş enerjisinin depolanmasında kullanılan bu malzemelere literatürde FDM(Faz Değiştiren Madde) adı verilmektedir.

Katı-sıvı değişiminin ısı depolama kapasitesi buhar dönüşümlerine göre daha düşüktür ancak hacimdeki değişim çok düşüktür ve % 10'u geçmez. Ayrıca dönüşüm düşük bir sıcaklık aralığında gerçekleşir. Bu gibi nedenler katı-sıvı faz dönüşümünün uygulanabilir olmasını sağlar ve gizli ısı depolamada bu yöntem kullanılır[79].

Gizli ısı depolamasının gücü, katı maddelerin eritilmesi için birim ağırlık başına gereken ısıнын fazla olmasından gelmektedir. PCM tamamen eritildikten sonra eklenen fazla ısı PCM' in sadece duyulur ısısını artırır[49]. Gizli ısı depolamanın diğer tekniklere göre bazı üstünlükleri vardır.

- Duyulur ısı depolamaya göre ısı depolama kapasitesi yüksektir ve ısı deposu hacmi daha düşüktür
- PCM birim kütlesinin ısı depolama kapasitesi yüksektir
- PCM 'lerin faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur
- Sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için uygundur

Isıl depolama için kullanılacak faz değiştiren malzeme seçilirken bazı kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kriterler kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir[75];

—Termodinamik Kriterler

- Ergime noktası istenilen çalışma sıcaklığı sınırında olmalıdır.

- Birim kütlesinin ergime ısısı yüksek olmalıdır. Böylece yüksek bir enerji miktarı elde etmek için daha az depo maddesi kullanmak yetecektir.
- Küçük hacimdeki depolara yerleştirilebilmesi için yoğunluğu yüksek olmalıdır.
- Önemli miktarda duyulur ısı depolayabilmesi için özgül ısısı yüksek olmalıdır.
- Isıl iletkenliği yüksek olmalıdır. Böylece depo maddesine ısı doldurulması ve geri kazanılması için gerekli sıcaklık aralığı düşük olacaktır.
- Materyal tamamıyla ergiyerek tekdüze bir ergime göstermelidir. Aksi durumda katı-sıvı fazları arasında yoğunluk farkı olursa faz ayrışması gerçekleşir ve materyalin özellikleri değişir.
- Faz değişimi sonucunda hacim değişimi az olmalıdır. Böylece basit bir depo ve ısı dönüştürücüsü kullanılabilir.

—Kinetik Kriterler

- Donma sırasında çok az aşırı soğuma eğilimi göstermeli veya hiç göstermemelidir. Eriyiğin kristallenmesi maddenin termodinamik donma noktasında olur. Bunun başarılı olması için çekirdekleşme hızı yüksek ve kristal oluşum hızı büyük olmalıdır(aşırı soğuma çekirdekleştirici eklenerek engellenebilir).

—Kimyasal Kriterler

- Kimyasal özellikleri değişmemelidir(kimyasal olarak kararlı olmalı).
- Kullanım süresinin uzun olması için kimyasal ayrışmaya uğramamalıdır.
- Depo malzemesi için korozyon etkili olmamalıdır.
- Yanıcı, zehirleyici ve patlayıcı özellikleri olmamalıdır.

—Ekonomik Kriterler

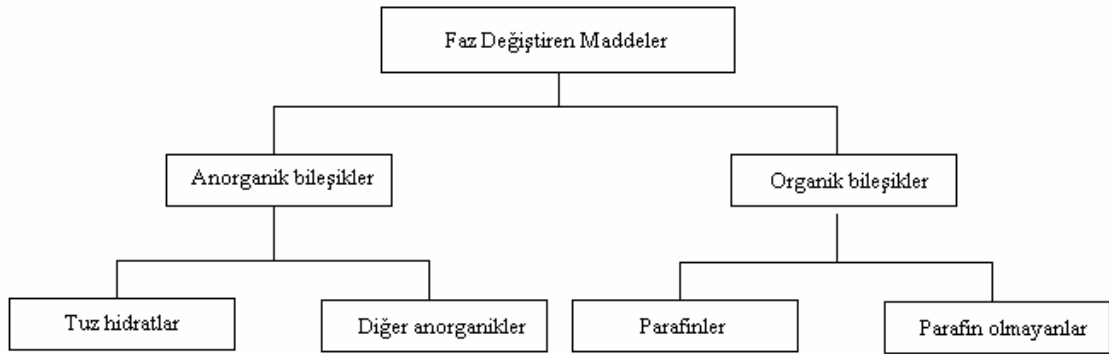
- Bol miktarda bulunmalıdır.
- Pahalı olmamalıdır.

Faz değiştiren maddelerle belli bir miktardaki ısının depolanabilmesi için gerekli hacim, duyulur ısı depolama maddelerinin kaplayacağı hacimden daha düşüktür. Depodan ısı çekme sırasında, depo sıcaklığı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Diğer taraftan gizli ısı depolama

maddeleri, duyulur ısı depolama maddelerinden (su, çakıl taşı) daha pahalıdır. Organik bileşikler düşük enerji depolayıcıları için daha uygundur[80].

Eriyerek faz değiştiren maddelerde gizli ısı depolamayla birlikte duyulur ısı depolama da yapılır. Düşük sıcaklıkta ısı depolamada kullanılan FDM 'lerin ısı iletim katsayıları küçük olduğundan depoya uygun şeklin verilmesine dikkat edilmelidir. Depo içerisindeki maddenin erimesi için şarj veya deşarj edici akışkan, deponun ortasından geçmeli ve ısı transfer yüzeyi çok büyük olmalıdır.

Kolayca anlaşılacağı gibi tek başına hiçbir materyal istenilen özellikleri karşılayamamaktadır. Bu yüzden PCM belirlenirken arzulanan sıcaklık aralıklarında faz değişimi göstermesine bakılır. 0-120°C aralığında sıcaklık değişimi gösteren maddeler PCM olarak kullanılmaya adaydırlar. Bunlar organik ve inorganik bileşikler ve onların karışımları şeklinde gruplandırılırlar. Bunlarda kendi içlerinde alt gruplara ayrılır. Gizli ısı depolamada kullanılan maddeler Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Faz değiştiren ısı depolama maddelerinin sınıflandırılması[75]

Katı-sıvı faz dönüşümüne uygun olan maddeler temel olarak organik ve inorganik olarak iki grupta incelenir. İnorganik bileşiklerin ergime ısıları yüksektir(250-400 MJ/m³ arasında) ve dar bir sıcaklık aralığında faz değiştirirler. Organik bileşikler ise yaklaşık olarak inorganik bileşiklerin yarısı kadar ısı depolama kapasitesine sahiptir(150-200 MJ/m³ arasında) ve daha geniş bir sıcaklık aralığında faz değiştirirler bunun yanında organik malzemelerin erime-donma olaylarında kararlı davranması ve korozyon olmaması gibi bazı üstünlükleri vardır[75].

Faz değiştiren maddelerden en çok tuz hidratlar, parafinler ve parafin olmayan organik maddeler kullanılır. 0-50 °C sıcaklıkları arasında faz değişim ısısından faydalanan inorganik maddelerin en önemlisi tuzhidratlardır.

6.3. Tuz Hidratlar

M_nH_2O olarak gösterilirler. M burada inorganik bileşiktir. Tuz hidratlar 0-150 °C arasındaki sıcaklıklarda, hacimsel ısı depolama kapasitesinin yüksekliği nedeniyle inorganik bileşikler arasında önemli bir grubu oluşturur. Tuz hidratların en büyük üstünlüğü faz değişimi sırasında düşük hacimsel değişim ve yüksek ısı depolama yeteneğidir. Organik bileşiklerle kıyaslandığında ısı iletim katsayılarının da yüksek olduğu görülür. Isı depolama tekniğinde kullanılan bazı tuz hidratlar ve bunların fiziksel özellikleri Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’de [81] verilmiştir.

Katı haldeki tuz hidrat, verilen ısıyı depolayarak erirken kristalleşme sularını serbest bırakır. Tuz, açığa çıkan su içerisinde çözünür ve sıvı eriyik oluşur. Katılaşma sürecinde bu işlemin tersi olur. Depolanan ısı serbest bırakılırken tuz kristalleri çözeltiden katılaşmaya başlar.

Tuz hidratlar faz dönüşümü sırasında kararsızlık gösterebilir. Ergime sırasında açığa çıkan su, tuz kristallerini çözmek için yeterli miktarda olmayabilir. Bu durumda aşırı doymuş çözelti meydana gelir ve su tarafından çözülmeyen tuzlar katı halde kalarak depo dibine çöker. Çözelti depoladığı ısıyı geri verirken depo dibine çöken bu katı tabaka su içeren bir kristal yapı oluşturmaz. Tekrarlanan çevrimler ile birlikte dibe çöken katı madde miktarı artar. Çözeltinin ısı kapasitesinde önemli bir azalma ve diğer fiziksel özelliklerinde farklılıklar görülür. Çözeltiye fazladan su ilave edilerek malzemenin daha fazla çevrim yapması sağlanabilir. Ancak asıl problem maddenin erirken homojenliğini yitirmesi olduğundan sistemin iyileştirilmesini sağlayacak çözüm homojenliği korumak olacaktır. Bunu sağlamak için aktif ve pasif yöntemler geliştirilmiştir. Çözeltiye yüksek yoğunluklu bir madde ilave ederek bir süspansiyon ortam elde edilir ve sistemin en az %25 daha sorunsuz çalışması sağlanır. Çok sık kullanılan bazı tuz hidratlara ilave edilebilecek uygun maddeler Tablo 6.4’ de[82] gösterilmiştir. Mekanik yöntemler kullanılarak sorun tamamen aşılabılır fakat bu işlem sistemi karmaşık hale getirir ve enerji harcandığı için kısa zaman aralıklarında incelendiğinde verimi düşürür. Mekanik çözümün temel prensibi erime esnasında ya da erimenin hemen ardından çözeltiyi karıştırmaktır. Depo içerisine yerleştirilen bir pervane yardımıyla ya da deponun kendisini döndürerek karıştırma sağlanır. Başka bir yöntemde deponun alt kısmına bir fan yardımıyla hava basılmasıdır. Depo dibinde oluşan kabarcıklar yüzeye çıkarken çözeltiyi karıştırır.

Tablo 6.2. Isı depolama tekniğinde kullanılan faz değişim malzemeleri ve özellikleri

	Parafin mumu (CH ₂) _n -CH ₃	Polietilen Glikol (Polietilen oksit) HO(C ₂ H ₄ O) ₈ C ₂ H ₄ OH	Polietilen Glikol (Polietilen oksit) HO(C ₂ H ₄ O) ₁₂ C ₂ H ₄ OH	Kalsiyum klorit heksahidrat CaCl ₂ .6H ₂ O	Kalsiyum klorit heksahidrat(ticari) CaCl ₂ .6H ₂ O	Kalsiyum bromit heksahidrat CaBr ₂ .6H ₂ O
Erime alanı(noktasal)	43-56°C 316-329 K	7°C 280 K	23°C 296 K	29.6°C 302.8 K	27°C 300 K	34.3°C 307.5 K
Erime ısısı	266 kJ/kg	99.6 kJ/kg	127.3 kJ/kg	190.8 kJ/kg	192 kJ/kg	115.5 kJ/kg
Özgül ısı(akışkan)	2.51 kJ/kgK	2.08 kJ/kgK	2.05 kJ/kgK	2.10 kJ/kgK	2.2 kJ/kgK	
Özgül ısı(katı)	2.95 kJ/kgK			1.42 kJ/kgK	1.32 kJ/kgK	
Yoğunluk(akışkan)	0.760x10 ³ kg/m ³	1.122 x10 ³ kg/m ³	1.123 x10 ³ kg/m ³	1.562 x10 ³ kg/m ³	1.53 x10 ³ kg/m ³	1.956 x10 ³ kg/m ³
Yoğunluk(katı)	0.818 x10 ³ kg/m ³			1.802 x10 ³ kg/m ³	1.71 x10 ³ kg/m ³	2.194 x10 ³ kg/m ³
Termal iletkenlik(akışkan)	0.24 W/mK			0.540 W/mK	0.54 W/mK	
Termal iletkenlik(katı)	0.24 W/mK			1.088 W/mK	1.09 W/mK	
Vizkozite	1.9 kg/msec	0.055 kg/msec	0.081 kg/msec	0.0118 kg/msec	0.0118 kg/msec	
Moleküler ağırlık(ortalama)	332 g/mol	400 g/mol	600 g/mol	219.0784 g/mol	219.0784 g/mol	307.9904 g/mol
Suda çözünme ısısı				72.0 kJ/kg	72.0 kJ/kg	
Kristalleşme	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Uyumluluk	Uyumlu, korozyif değil	Uyumlu	Uyumlu	Uyumlu	Uyumlu	korozyif
Güvenilirlik	Kolay tutuşan toksik yok, güvenli	güvenli	güvenli	güvenli	güvenli	toksik
Kaynama noktası				405 K	405 K	422 K
Buhar basıncı				933 Pa	933 Pa	
Kararlılık-geçiş sayısı	Sürekli	Sürekli	Sürekli	Sürekli	Sürekli	Sürekli

Tablo 6.3. Isı depolama tekniğinde kullanılan faz değişim malzemeleri ve özellikleri

	Magnezyum nitrat heksahidrat $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Lityum nitrat trihidrat $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Potasyum florit tetrahidrat $\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Magnezyum klorit heksahidrat $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Kalsiyum klorit/bromit heksahidrat $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Sodyum karbonat dekahidrat $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Erime alanı(noktasal)	89.8°C 383 K	29.8°C 303.1 K	18.5°C 301.7 K	116.7°C 389.9 K	14.7°C 287.9 K	33°C 308 K
Erime ısısı	162.8 kJ/kg	296.0 kJ/kg	231.0 kJ/kg	168.8 kJ/kg	140 kJ/kg	
Özgül ısı(akışkan)	2.48 kJ/kgK		2.39 kJ/kgK	2.61 kJ/kgK		
Özgül ısı(katı)	1.81 kJ/kgK		1.84 kJ/kgK	2.25 kJ/kgK		
Yoğunluk(akışkan)	$1.55 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$		$1.455 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	
Yoğunluk(katı)	$1.636 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$		$1.447 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.57 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.460 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Termal iletkenlik(akışkan)	0.480 W/mK			0.570 W/mK		
Termal iletkenlik(katı)	0.669 W/mK			0.704 W/mK		
Vizkozite						
Moleküler ağırlık(ortalama)	258.4142 g/mol	122.9921 g/mol	130.2 g/mol	203.3104 g/mol		286.1430 g/mol
Suda çözünme ısısı		1.02 kJ/kg		1273 kJ/kg		
Kristalleşme	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Uyumluluk	korozif	Uyumlu	Uyumlu	Uyumlu	Uyumlu	Uyumlu
Güvenilirlik	Güvenli	toksit	toksit	güvenli	güvenli	tehlikeli
Kaynama noktası	411 K	390 K	381 K	438 K		405 K
Buhar basıncı						
Kararlılık-geçiş sayısı	Sürekli			Sürekli	Sürekli	Sürekli

Tablo 6.4. Tuz hidratlara ilave edilen katkı maddeleri[82]

Tuz hidrat	Çekirdekleştirici madde
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	BaCO_3 SrCl_2 SrCO_3 BaF_2SrF_2
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Karbon siyahı
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
$\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_3 - 1/2\text{H}_2\text{O} + \text{S}$
$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaF}_2 + \text{S}$
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Karbon siyahı
$\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	KClO_4 Na_2SiF_6 K_2SiF_6 BaSiF_6
$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Sünger taşı
$\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Al_2O_3

Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’ de faz değişim malzemesi olarak kullanılan bazı tuz hidratların teknik özellikleri verilmiştir. Aşağıda en fazla kullanılan tuz hidratlarla ilgili bilgi verilmiştir.

6.3.1. Kalsiyum Klorür Hekzahidrat

Kalsiyum klorür hekzahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) genellikle pasif güneş enerjili ısıtma sistemlerinde kullanılan bir tuz hidrattır. Erime uygun olduğu zaman, bunun erime noktası 29.6°C olur ve erime ısısı 190.8 kJ/kg olur.

Hekzahidratın erime noktasının yaklaşık 2°C üzerindeki sıcaklık aralığında bir tetrahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) termodinamik olarak sabittir. Bu nedenle, tetrahidrat 32°C üzerindeki sıcaklığa uzatılarak, eriyiğin ısıtılması vasıtasıyla çözünebilir.

Bu FDM' nin ısı depolama kapasitesi, tetrahidrat oluşumundan dolayı, donma/erime çevrimlerinin sayısının artmasıyla azalmaya başlar. Tetrahidrat yukarda açıklandığı üzere ısıtılarak çözünür. Fakat, tetrahidratın oluşumunu azaltmak tercih edilir. Hekzahidratın üzerindeki tetrahidratın çözünürlüğünü artıran kimyasal maddelerin ilave edilmesiyle bu mümkün olur. Araştırmacılar kalsiyum klorür tetrahidratın oluşumunun ekstra su kullanımıyla tamamen engellenebileceğini belirtmişlerdir[83].



$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ kristallerinin her ikisi de erime noktaları birbirinden çok az farklı olan α ve β kristal tipleri gösterirler.

43.33°C'nin üzerine ısıtılan tuz, kristal suyunda tamamen çözünür. Soğuma anında ise 4 ayrı kristalin çeşitli tipleri oluşur. Kapalı kap içinde aşırı soğuyan tuzun çekirdekleşmesi gerekir. Kalsiyum klorür nispeten aşındırıcıdır ve fiyatı çok düşüktür.

Tuz hidratların en çok araştırma yapılanları glauber tuzu olarak bilinen sodyum sülfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve kalsiyum klorür hekzahidrat($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) gibi düşük maliyetlere sahip tuz hidratlardır. Bunlar pahalı ve zararlı değildirler ve en çok gereksinim duyulan özelliklere sahiptirler. Özellikle güneş enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar[78].

Bu çalışmada, güneş kolektörlerinden toplanan ısı enerjisi gizli ısı şeklinde depolanarak, istendiğinde depolanan bu ısı enerjisi kurutma odasına kaynak olarak kullanılmaktadır. Isı depolayıcı kimyasal madde olarak pek çok madde önerilmiştir. Bu çalışmada ise bunlardan kalsiyum klorür hekzahidrat($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) erime sıcaklığı ve maliyet olarak daha uygun görülerek seçilmiştir.

Bir tuz hidrat olan kalsiyum klorür hekzahidrat, CaCl_2 ' ye altı mol su ilavesiyle elde edilir. Tuz hidratlar içerisinde yüksek gizli ısı ve düşük sıcaklıkta ısı depolama uygulamaları için en kararlı yapıya sahip olan madde, kalsiyum klorür hekzahidratır[83]

Kalsiyum klorür hekzahidrat, soda fabrikalarının yan ürünü olarak elde edildiği için ekonomik olarak en uygun gizli ısı depolama malzemesidir. Soda fabrikalarından satın alınan CaCl_2 gizli ısı depolayıcı madde olarak kullanılmak istendiğinde; maddeye teorik miktarın

(ağırlıkça %51 CaCl₂ ve %49 H₂O) az fazlası su ilave edilir. Kristalleşmeyi sağlamak için CaCl₂'nin ağırlığının %2-4 oranında KNO₃(%99.8 saflıkta) ilave edilmelidir[51]. Tablo 6.5'te Kalsiyum klorür heksahidrat'ın bazı teknik özellikleri verilmiştir[84].

Tablo 6.5. Kalsiyum klorür heksahidrat'ın fiziksel özellikleri

Katı faz:	
Yoğunluk (ρ_s)	1.712 g/cm ³
Özgül ısı(C_{ps})	1.44 J/kgK(-21-3.3°C)
Erime sıcaklığı	29-34°C
Gizli ısı (Δ_{HF})	170 J/g
Isı iletim katsayısı(k_s)	1.11 W/mK(25°C)
Isı depolama kapasitesi	190 kJ/kg

6.3.2. Sodyum Karbonat Dekahidrat

Genelde kullandığımız yıkama sodasıdır. Dekahidrat %37 Na₂CO₃ ve %63 su kapsar, aynı zamanda farklı kristallenme özellikleri gösteren birkaç tuz hidratı da oluşturur.



36.11°C' de tuzun tamamına yakın bir kısmı çözünür. Sodyum bikarbonatın varlığı (%2-3) erime noktası ve çözünürlüğü düşürür, ancak basit kimyasal yöntemler ile bu madde ortamdan ayrılabilir[78].

6.3.3. Kalsiyum Nitrat

Öteki tuz hidratlardan daha pahalı olan Ca(NO₃)₂' nin içeriğinde %70 Ca(NO₃)₂, %30 su bulunur ve birçok kristal tipleri oluşturur.



Bu tuz hidrat 50°C’de tümüyle erir ancak 35°C’de aşırı soğur ve 40°C’de kristallenir. Bu tuzun kristallenme hızı oldukça yavaştır. Yinelenen çevrimler sonucunda yine kullanılabilir. Yüksek fiyat ve düşük erime ısısı bu maddenin dezavantajıdır[78].

6.3.4. Sodyum Sülfat Dekahidrat (Glauber Tuzu)Ve Ötektikleri

Sodyum sülfat dekahidrat, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, en ucuz ve kullanışlı kimyasal maddelerden biridir. Yan ürün olarak bol miktarda elde edilmesi mümkündür ve tuz gölleri ve diğer doğal kaynaklardan da elde edilebilir. Sodyum sülfat dekahidrat, % 44 sodyum sülfat ve % 56 su içerir.

34 gr sodyum sülfat uygun orandaki suda çözündürüldüğü zaman; sodyum sülfat dekahidrat, bir kısım katı sodyum sülfat artığı bırakır. 32.22 °C’de çözünür. Katı sodyum sülfat ağırlığı arttıkça (toplam ağırlığın % 15’i) kabın dibine çöker. Madde sürekli karıştırıldığında oluşacak kristalde birleşmiş artık sıvının bulunmayacağı bilinmektedir.

Çekirdekleşmedeki güçlükler, izoformik çekirdekleştirici katkı maddesi sodyum tetraborat dekahidrat boraksin kullanılması ile çözülmüştür. %3-4 oranında boraks, sodyum sülfat dekahidrata eklendiğinde erime noktası 31.66 °C’ye doğru düşer. Ancak maddenin 28.33 °C ile 29.44 °C kristallenmesinin başlaması ile aşırı soğuma oluşmaz[82].

6.4. Parafinler

Parafinler petrol türevleridir ve $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ şeklinde tanımlanan alkanları içerirler. Parafindeki alkan içeriği genellikle %75’in üzerindedir ve %100’e ulaşabilir. Sadece alkanları içeren parafinler, saf parafin olarak adlandırılır. Parafinlerin ergime sıcaklıkları ve ergime ısıları, molekül ağırlıklarıyla birlikte artar. $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ ‘dan $\text{C}_{40}\text{H}_{82}$ ’ye kadar olan seri içerisinde bir bileşik seçilerek 6-80°C arası istenen ergime noktası ve ısısında parafin kullanılabilir[85]. Kimyasal olarak kararlı ve ucuz parafinler, karbon atomu sayısı çift olanlardır ve uygulamalarda genellikle bunlar kullanılır.

Piyasadan kolay ve ucuz olarak temin edilebilecek parafinler saf halde değildir. Çeşitli alkanların ve kısmen yabancı maddelerin karışımı şeklinde olabilir. Tablo 6.6 ‘de [75] piyasada kolay bulunabilen ve faz değişimiyle enerji depolamaya uygun bazı parafinlerin fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 6.6. Bazı parafinler ve bunların fiziksel özellikleri

Parafin	Karbon Atomu Sayısı	Donma Noktası [°C]	Ergime Isısı [kJ/kg]	Yoğunluk		Özgül Isı (100°C) [kJ/kgK]	Isı İletimi (katı) [W/mK]
				(20°C) [kg/lt]	(70°C) [kg/lt]		
5913	C ₁₃ -C ₂₄	22-24	189	0,900	0,760	2,1	0,21
Oktadekan	C ₁₈	28	244	0.814	0,774	2,16	0,15
6106	C ₁₆ -C ₂₈	42-44	189	0,910	0,765	2,1	0,21
P116	-	45-48	210	0,817	0,768	2,5	-
5838	C ₂₀ -C ₂₃	48-50	189	0,912	0,769	2,1	0,21
6035	C ₂₂ -C ₄₅	58-60	189	0,920	0,795	2,1	0,21
6403	C ₂₃ -C ₄₅	62-64	189	0,915	0,760	2,1	0,21
6499	C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	0,930	0,830	2,1	0,21

6.5. Parafin olmayan organik maddeler

Faz değişimi için uygun malzemelerdir. Ergime ve donma süreçlerinde çok kararlıdırlar ve fiziksel özelliklerini kaybetmeden defalarca faz çevrimine girebilirler. Bu gruptaki çalışmalar genellikle yağ asitleri üzerine yoğunlaşmıştır. Ergime ısıları parafinlere yakındır ancak maliyetleri parafinlerin 2-2,5 katıdır.

Düşük sıcaklıkta gizli ısı depolamak için uygun olan bazı yağ asitleri ve bunların fiziksel özellikleri Tablo 6.7’de verilmiştir[86].

Tablo 6.7. Bazı yağ asitleri ve bunların fiziksel özellikleri

Yağ Asidi	Ergime Sıcaklığı [°C]	Ergitme Isısı [kJ/kg]	Yoğunluk [kg/lt]	Özgül Isı [kJ/kgK]	Isı İletimi [W/mK]
Sarpilik asit	16,5	149	0,862-80°C	-	0,148-20°C
Saprik asit	31,5	153	0,886-40°C	-	0,149-40°C
Laurik asit	42-44	178	0,870-50°C	1,6	0,147-50°C
Palmitik asit	63	187	0,847-80°C	-	0,165-70°C
Stearik asit	70	203	0,941-40°C	2,35-125	0,172-70°C

7. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM

7.1.Deney Düzenegi

Bu deneysel çalışmada Elazığ yöresinde yetiştirilen çekirdekli üzümün kurutulması için zorlanmış taşınımli dönel elemanlı bir kurutucu tasarlanmıştır.

Tasarlanan deney düzenegi aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

- Kabin tipi kurutucu
- Havalı güneş kolektörü
- FDM' li güneş kolektörü
- Fan ve ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü

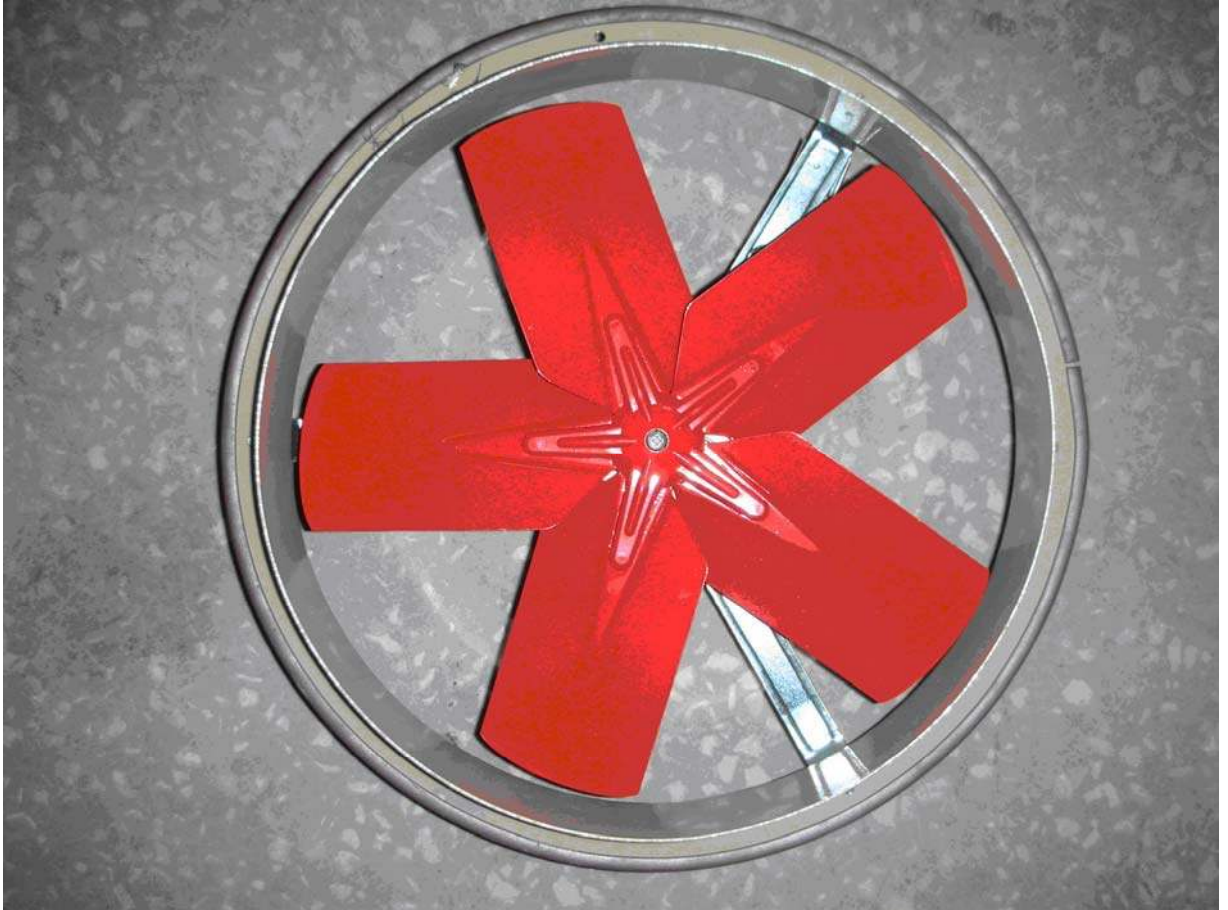
Kurutma odası 750 mm çapında 1000 mm yüksekliğinde 0.8 mm kalınlığındaki sac malzemeden imal edilmiştir. Kurutma odasında hava akımına dönme etkisi vermek amacıyla kurutma odasının girişine dönel eleman yerleştirilmiştir (Şekil 7.1). Ayrıca kurutma odası içerisine havayı yönlendirmek amacıyla 21x5x3 mm boyutlarında 32 adet kıvrılmış sac levha yerleştirilmiştir (Şekil 7.2). Kurutma odasının tüm yüzeyleri 30 mm kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır. Kurutma odasının üst kısmında hava çıkışını sağlamak için 200 mm çapında bir baca yerleştirilmiştir. Ön yüzeyde ise kurutulacak ürünün kolaylıkla yerleştirilmesi ve kuruma sırasında gözlemlenebilmesi için 760x260 mm boyutlarında camlı kapak yerleştirilmiştir. Şekil 7.3'de kurutma odasının fotoğrafı görülmektedir.

Havayı ısıtmak için kullanılan güneş kolektörü 940x1850x200 mm³ boyutlarında imal edilmiş olup yan ve alt yüzeyler 50 mm kalınlığında cam yünü malzemeyle yalıtılmıştır. Güneş kolektörlerinde yutucu yüzey alanını artırmak, ısıtılacak havanın akım yolunu uzatmak ve yutucu yüzey üzerine türbülans artırıcı elemanlar yerleştirmek, ısı transferini artırmak için kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Bu nedenle yapılan çalışmada ısı transferini artırmak için yutucu yüzey kademeli olarak artırılmış ve türbülans etkisini sağlamak için Şekil 7.4' de yandan görünümü verilen genişletilmiş yüzeyli kolektörde her kademeye 6 tane olmak üzere 15 mm çaplarında delikler açılmıştır. Aynı zamanda kolektör sehpasının ayaklarına yerleştirilen vidalar yardımıyla kolektör eğim açısı ayarlanabilmektedir (Şekil 7.5). Kurutulacak olan üzüm deneylerinin belli bir zaman aralığında yapılması zorunluluğu nedeniyle tasarlanan düzenekte güneş battıktan sonrada kurutma işlemini gerçekleştirmek için gizli ısı depolama prensibine dayalı faz değişim malzemesi içeren ayrı bir kolektör imal edilmiştir. 930x1930x200 mm³ boyutlarında olan bu kolektör iki kısımdan meydana gelmektedir. Faz değişim malzemesinin yerleştirildiği alt kısımda 40 mm kalınlığında cam yünü ile yalıtım yapılmış ve depo malzemesi

olarak 0.8 mm kalınlığında sac malzeme kullanılmıştır. Üst kısım faz değişim malzemesinin kolaylıkla yerleştirilmesini sağlamak amacıyla kapak şeklinde açılmaktadır.

şekil 7.6 'da görüldüğü gibi düz sehpaye yerleştirilen faz değişim malzemesi bulunan kolektörün sehpa kenarlarına monte edilen aynalar yardımıyla güneş ışınlarının kolektör yüzeyine düşmesi sağlanmıştır. Aynaların eğimi sehpaye yerleştirilen vidalı düzenek ile ayarlanabilmektedir.

Sistemde 1400 d/dak ve 0.04 kWh gücüne sahip sabit devirli bir fan kullanılmıştır. Kullanılan fan saatte maksimum 565 m³/h hava üfleemektedir. Gönderilen hava miktarını değiştirmek için ayarlanabilir AC frekans dönüştürücü ve fan çıkışındaki bağlantı borularında mevcut olan klapelerden yararlanılmıştır. Fanın kolektörlere ve kolektörlerin kurutma odasıyla bağlantısı 0.8 mm kalınlığındaki sacdan imal edilen silindirik borular yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



şekil 7.1. Kurutma odası girişinde kullanılan dönел eleman

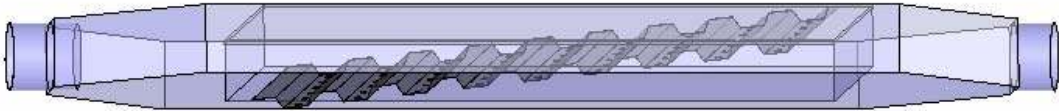


Şekil 7.2. Kurutma odası içerisine yerleştirilen hava yönlendirme elemanları

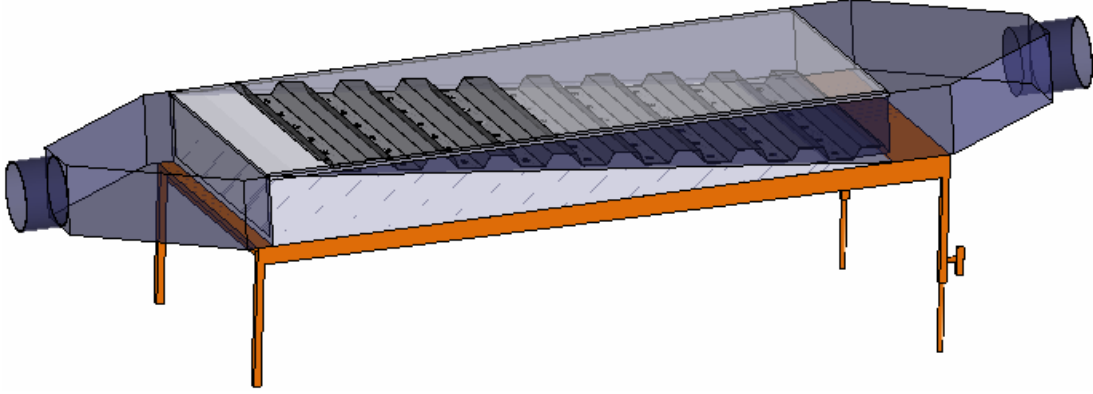
Kurutma deneyleri ilk önce FDM’li kolektör kullanılmadan, genişletilmiş yüzeyli havalı kolektör yardımıyla gerçekleştirilmiştir(Şekil 7.8). İkinci olarak da FDM’li kolektör ve genişletilmiş yüzeyli kolektörün birlikte kullanılmasıyla kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir(Şekil 7.7). Şekil 7.6’ da görüldüğü gibi FDM’li kolektör güneş ışıınının olduğu gündüz vakitlerinde alt kısımda depo içerisine yerleştirilen faz değişim malzemesi yardımıyla ısı depolamaktadır. Güneş battıktan sonra ise fan yardımıyla üst kısımda camla bakır levha arasında hava hareketi sağlanarak depolanan ısıdan faydalanılmaktadır.



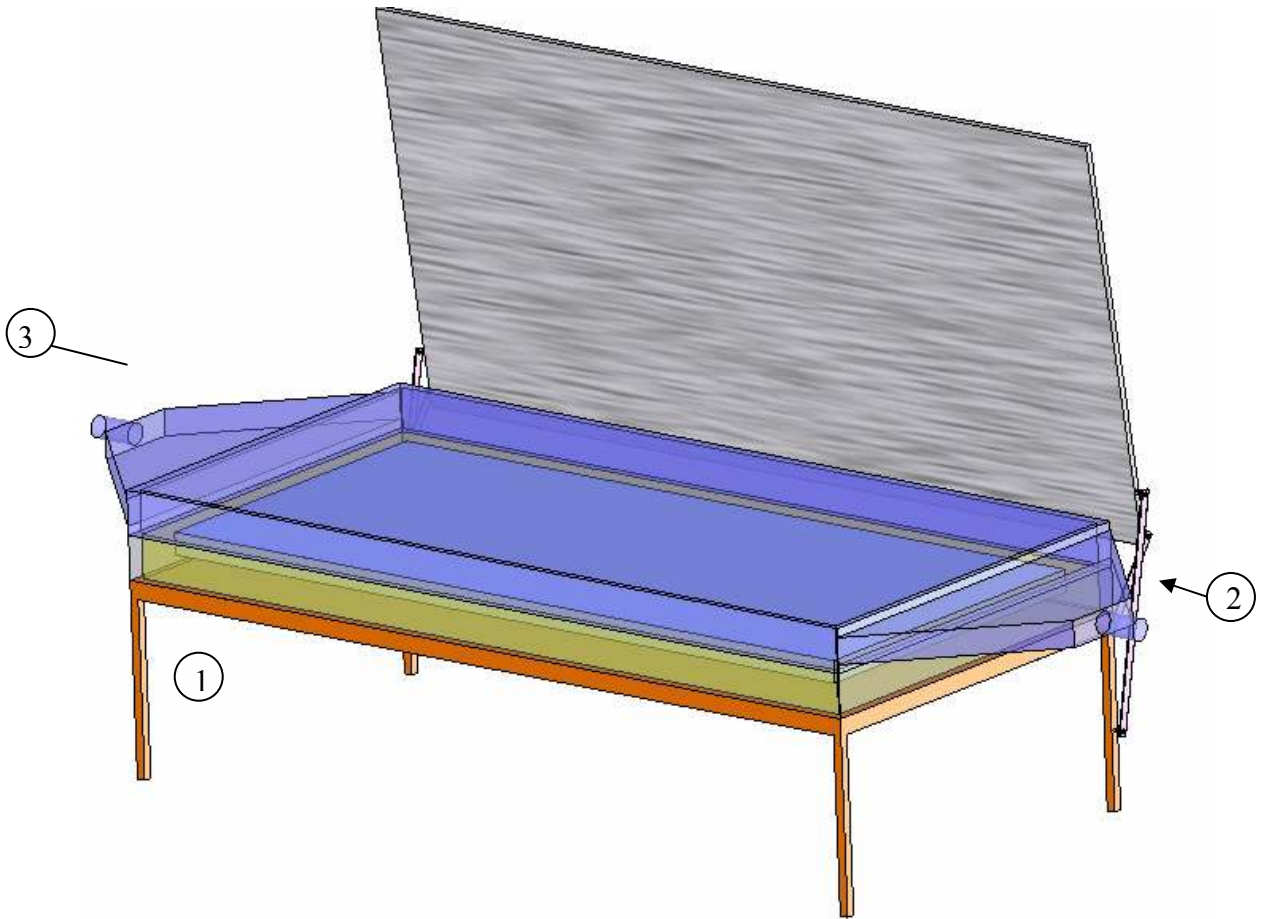
Şekil 7.3. Kurutma odasının fotoğrafı



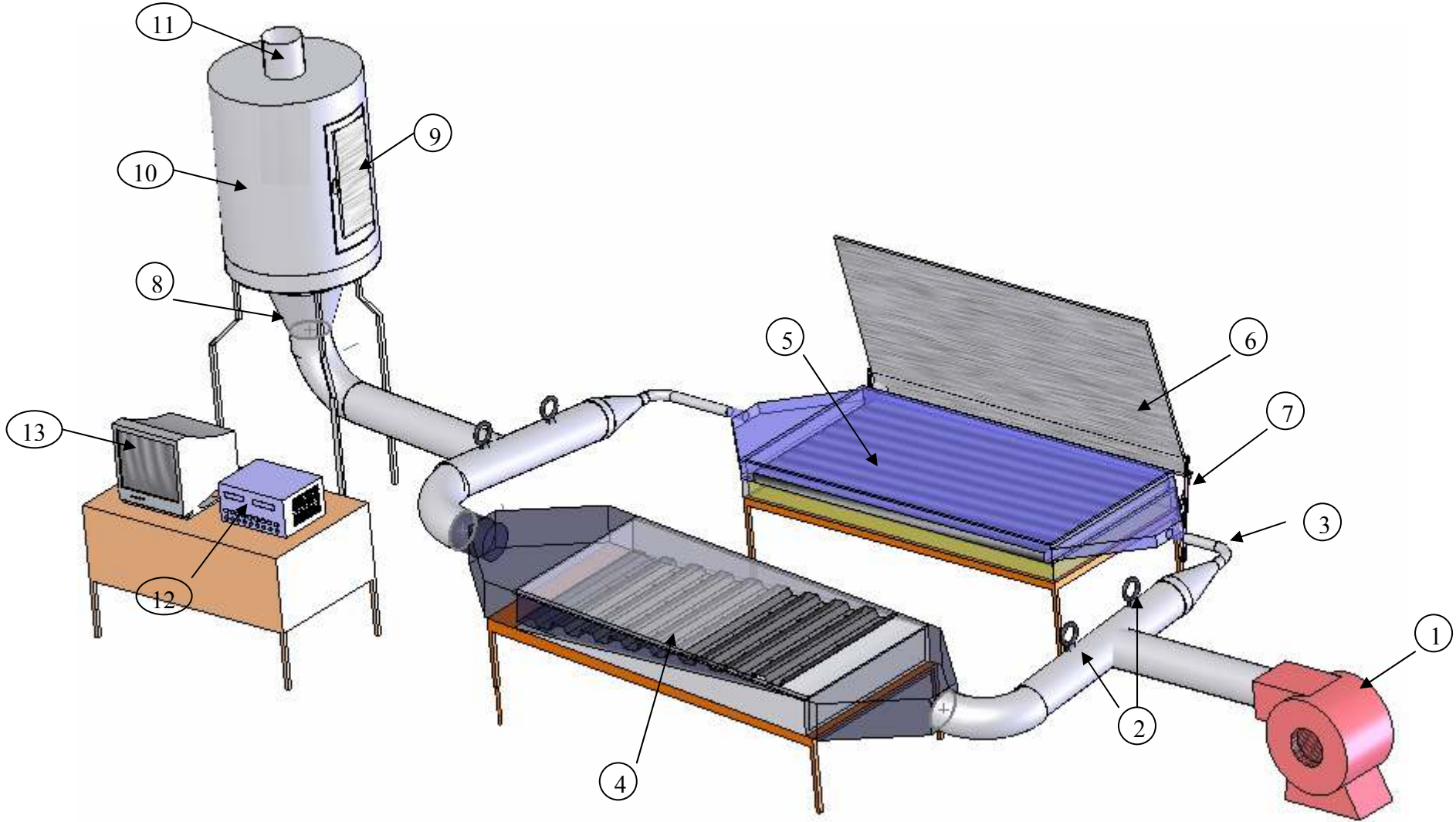
Şekil 7.4. Genişletilmiş yüzeyli kolektörün yandan görünümü



Şekil 7.5. Eğimi ayarlanabilir kolektör sehpasıyla birlikte genişletilmiş yüzeyli havalı güneş kolektörünün şematik görünümü

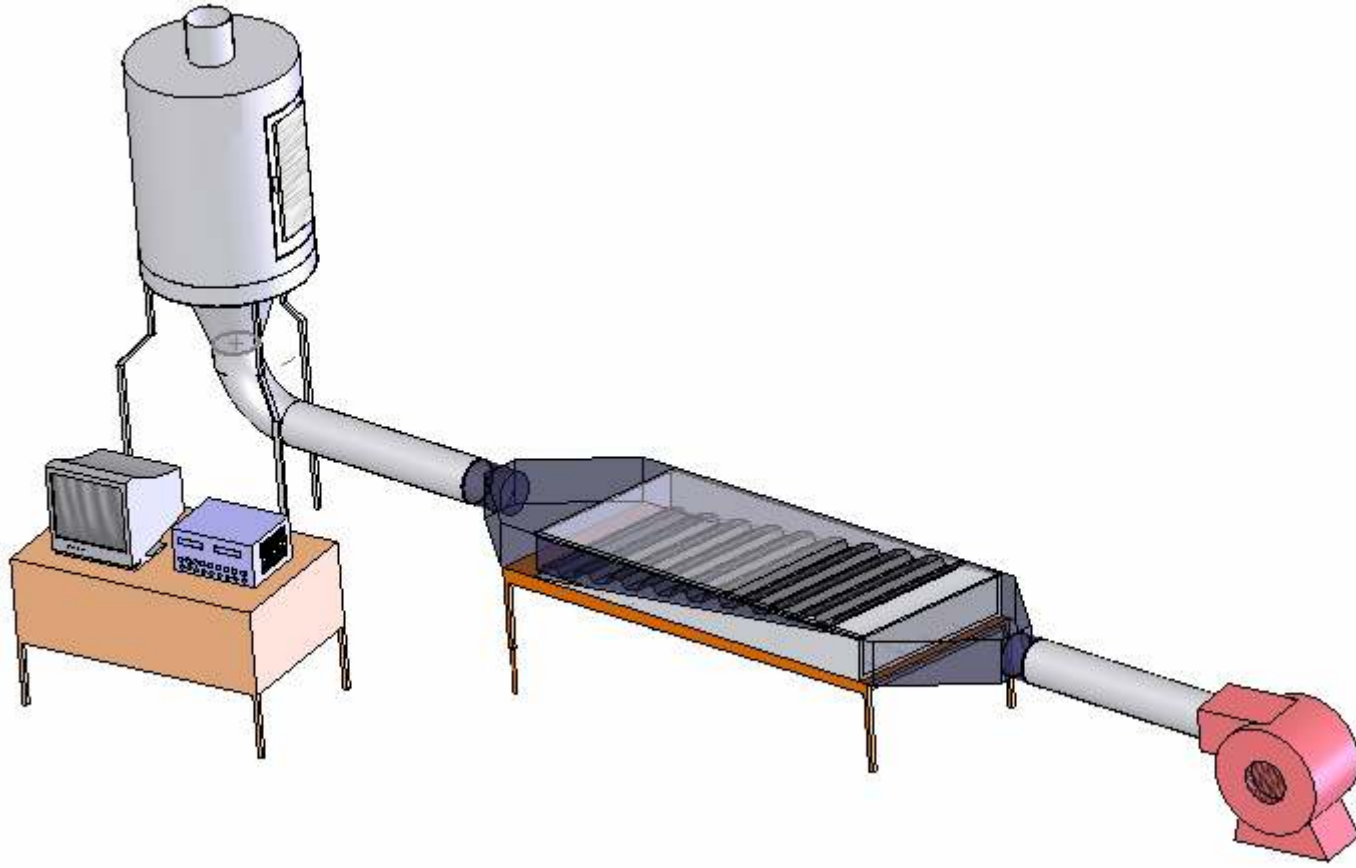


Şekil 7.6. Faz değişim malzemesi içeren güneş kolektörü
1-FDM malzemesinin konulduğu depo, 2- hava girişi, 3- hava çıkışı



Şekil 7.7. İmal edilen deney setini şematik görünümü

1 - Fan, 2 -Klapeler, 3 – Bağlantı borusu, 4 – Genişletilmiş yüzeyli havalı kollektör , 5 – FDM’li kollektör, 6 – Ayarlanabilir ayna, 7 – Ayarlanabilir kolektör sehпасı, 8 - Difüzör, 9- Gözetleme camı, 10 – Kurutma odası, 11 – Hava çıkış bacası, 12 - Datalogger, 13 – Bilgisayar



Şekil 7.8. Havalı güneş kolektörlü kabin tipi kurutucunun şematik görünümü



Şekil 7.9. İmal edilen deney setinin fotoğrafı

7.2. Deneylerde Yapılan Ölçümler ve Kullanılan Ölçme Cihazları

Deneylerde veri toplayıcı olarak Şekil 7.10' da görülen Almemo 5990-0 model çok noktadan ölçüm alabilen cihaz kullanılmıştır. Sıcaklıklar -200 ila $+400$ °C arasında, 0.1 K kararlılıkta ve ± 0.1 hata ile sıcaklık ölçümü yapabilen T-tipi bakır-constant (Cu-Co) ısıl çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Bu ısıl çiftler kolektör girişlerine ve çıkışlarına, kurutma odası giriş ve çıkışına, kurutma odası merkez noktasına, ortam havasına ve kurutulacak ürünlerin üzerine yerleştirilerek sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Isıl çiftler bağlantı elemanı yardımıyla dataloggera bağlanmıştır.



Şekil 7.10. Datalogger bağlantı noktaları

Deneylerde kolektörlerin basınç düşümü, kurutma odası girişindeki hava hızı, ürün kütle değişimi ve nem değişimini tespit etmek için kullanılan sensörlerin teknik özellikleri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

Tablo 7.1. 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

Tablo 7.2. 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

Tablo 7.3. Kütle değişimini ölçmek için kullanılan sensörünün teknik özellikleri

Ölüm 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

Tablo 7.4. Nem sensörünün teknik özellikleri

Çalışma aralığı	(-20) - (+80) �C/5-%98 r.H.
Nem �l�me devresi	
Ölüm aralığı	0-100% r.H.
Doğruluk aralığı	Nominal sıcaklıkta $\pm \%2$ r.H.
Nominal sıcaklık	25 �C ± 3 �C
Sensör �alışma basıncı	Maksimum 16 bar
Sıcaklık �l�me 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

Deneyler sırasında güneş ışınlamını tespit etmek için Kipp-Zonen marka 0-1000 W/m² ışınlam şiddeti aralıklı, 4-6 µm/Wm⁻² hassasiyetli solarimetre cihazı kullanılmıştır. Dış ortamın nemini ölçmek için EXTECH marka sıcaklık ve nem değişimini veren termohigrometre kullanılmıştır. Doğal şartlarda kuruyan ürün kütle değişimini belirleyebilmek için ise BEL marka 0.01 gram hassasiyetli maksimum 2000 grama kadar ölçüm yapabilen dijital terazi kullanılmıştır. Ürün başlangıç ve son nem içerikleri 0-300 °C arasında ve 100 dakikaya kadar otomatik zaman ayarı yapabilen 2000 W gücünde termostatlı fırın ve METTLER marka infrared nem tayin cihazı yardımıyla belirlenmiştir.

7.3. Ölçülen Değerlerin Hata Analizi

Genel olarak deneysel hataları üç grupta toplamak mümkündür. Bunlardan birinci gruptakiler dikkatsizlik ve tecrübesizlikten olabilen hatalardır. Ölçme cihazlarının yanlış seçiminden ve ölçme sistemlerinin yanlış dizaynından ortaya çıkan hatalar bu grup içinde düşünülür. Bu hatalar genellikle ölçülen diğer bulgulardan farklı karakterde olduğundan, tecrübeli bir deneyci tarafından bunlar kolaylıkla tespit edilerek, değerlendirme dışı bırakılabilir.

İkinci grup hatalar sabit ve sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlarda genel olarak tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinmeyen hatalardır.

Üçüncü grup hatalar ise rastgele hatalardır. Bunlar ise deneyi yapan elemanların değişmesinden, deneyi yapanların dikkatlerinin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, cihazların ısınmasından ortaya çıkan elektronik ölçme aletlerindeki salınımlardan veya ölçme aletlerindeki histerizis olaylarından kaynaklanabilir [87].

Ölçü aletinin imalatının doğru yapıldığı kabul edilirse, hata analizi; sabit ve rasgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır [88]. Bu bölümde yapılan deneyler için hata analizi yapılmıştır. Ölçümler Almemo 5990-0 model çok noktadan ölçüm alabilen cihaz yardımıyla yapıldığından hata analizi yapılırken katalog değerlerinden de yararlanılmıştır.

Sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hatalar;

- (a₁) Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan ortalama hata= ±0.1 °C,
- (b₁) Bağlantı elemanları ve noktalardan kaynaklanan ortalama hata= ±0.1 °C,
- (c₁) Kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinde yapılacak ortalama ortalama hata= ±0.1 °C,
- (d₁) Kollektör yüzey sıcaklığının ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ±0.1 °C,
- (e₁) Kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ±0.1 °C,
- (f₁) FDM'li kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ±0.1 °C,
- (g₁) FDM'li kollektör yüzey sıcaklığının ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ±0.1 °C,
- (h₁) FDM'li kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ±0.1 °C,

- (j₁) Kurutma havasının kurutucuya giriş sıcaklığının ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ± 0.1 °C,
(k₁) Numunenin merkez sıcaklığının ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ± 0.1 °C,
(l₁) Kurutma havasının kurutucudan çıkış sıcaklığının ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ± 0.1 °C,
(m₁) Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ölçülmesinde yapılacak ortalama hata= ± 0.1 °C

Zaman ölçümünden kaynaklanan hatalar;

- (a₂) Zaman ölçerden kaynaklanan hata= ± 0.0003 dakika
(b₂) Periyodik olarak tartım alınmasında yapılabilecek ortalama hata= ± 0.10 dakika
(c₂) Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin okunmasında yapılabilecek hata= ± 0.10 dakika

Ağırlık kayıplarının ölçümünden kaynaklanan hatalar;

- (a₃) Gerilme ve sıkıştırma sensöründen kaynaklanan hata= ± 0.2 gr
(b₃) Gerilme ve sıkıştırma sensörünün sürekli yüklenmesi durumunda meydana gelebilecek olan sürüklenme hatası= her 30 dakika için ± 0.07 gr
(c₃) Hassas teraziden kaynaklanan hata= ± 0.01 gr
(d₃) Hassas terazide okumaktan kaynaklanan hata= ± 0.01 gr
(e₃) Ağırlık kayıplarının Datalogger cihazında okunması sırasında ortaya çıkabilecek hata= ± 0.01 gr

Hız ölçümünden kaynaklanan hatalar;

- (a₄) Akış sensörünün hassasiyetinden kaynaklanan hata= ± 0.03 m/s
(b₄) Debi kaçaklarından kaynaklanan hata= ± 0.1 m/s
(c₄) Hız değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında ortaya çıkabilecek hata= ± 0.01 m/s

Kurutulacak numunelerin bünyesindeki nem miktarının belirlenmesinde ortaya çıkacak olan hatalar;

- (a₅) Nem ölçerin hassasiyetinden kaynaklanan hata= ± 0.2 RH
(b₅) Nem değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında kaynaklanacak hata= ± 0.01 RH

Havanın bağıl neminin ölçümünden kaynaklanan hatalar;

- (a₆) Termohigrometrenin hassasiyetinden kaynaklanan hata= ± 0.1 RH
(b₆) Havanın bağıl neminin okunmasından kaynaklanan hata= ± 0.01 RH

Basınç ölçümünde ortaya çıkacak hatalar;

(a₇) Kolektörlerin giriş ve çıkışında ki basınç farkını belirlemede basınç sensörünün hassasiyetinden kaynaklanan hata= ±0.05 mbar

(b₇) Basınç değerinin Datalogger cihazında okunması sırasında kaynaklanan hata= ±0.01 mbar

Deneyssel verileri kullanarak yapılan hesaplamalarda kullanılan tablo değerlerinin ya da fiziksel değerlerin okunmasında yapılabilecek hatalar;

(a₈) Fiziksel özelliklerin okunmasından kaynaklanan hata= % ±0.1-0.2
şeklinde yazılabilir.

Herhangi bir parametredeki toplam hatanın belirlenmesi için sabit hataların, imalat hatalarının ve rasgele hataların dikkate alınmasıyla toplam hata değeri,

$$W_{th} = \left[(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots \dots \dots (x_\infty)^2 \right]^{1/2} \quad (7.1)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

Bu denkleme göre yukarıda belirlenen hata miktarları kullanılarak Tablo 7.5’ de görülen kurutma deneyleri sırasında meydana gelen toplam hata miktarları hesaplanmıştır.

Tablo 7.5. Kurutma deneyleri sırasında meydana gelen toplam hata miktarları

Hata Oluşturan Parametreler	Kullanılan denklem	Toplam hata
Kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata (W_{Tkg})	$W_{Tkg} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (c_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Kollektör yüzey sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata (W_{Tky})	$W_{Tky} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (d_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ($W_{Tkç}$)	$W_{Tkç} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (e_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
FDM'li kollektör girişinde sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata (W_{Tfkg})	$W_{Tfkg} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (f_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
FDM'li kollektör yüzey sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata (W_{Tfky})	$W_{Tfky} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (g_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
FDM'li kollektör çıkışında sıcaklığın ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ($W_{Tfkç}$)	$W_{Tfkç} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (h_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Kurutma havasının kurutucuya giriş sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata (W_{Tkhg})	$W_{Tkhg} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (j_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Numunenin merkez sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata (W_{Tnm})	$W_{Tnm} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (k_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Kurutma havasının kurutucudan çıkış sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ($W_{Tkhç}$)	$W_{Tkhç} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (l_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek toplam hata ($W_{Tç}$)	$W_{Tç} = [(a_1)^2 + (b_1)^2 + (m_1)^2]^{1/2}$	$\pm 0.173^\circ\text{C}$
Periyodik olarak tartım alınmasında ortaya çıkabilecek toplam hata (W_{tt})	$W_{tt} = [(a_2)^2 + (b_2)^2]^{1/2}$	± 0.1 dakika
Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek toplam hata (W_{ts})	$W_{ts} = [(a_2)^2 + (c_2)^2]^{1/2}$	± 0.1 dakika
Kurutucu içerisindeki her bir tartım periyodunda meydana gelebilecek toplam ağırlık ölçüm hatası (W_{wp})	$W_{wp} = [(a_3^2 + b_3^2 + e_3^2)]^{1/2}$	± 0.212 gr
Kurutma işleminde ağırlık ölçümlerinin okunmasında kaynaklanabilecek toplam ağırlık ölçüm hatası (W_o)	$W_{wo} = [(a_3^2 + b_3^2 + c_3^2)]^{1/2}$	± 0.014 gr
Hız ölçümünden kaynaklanabilecek toplam hata (W_v)	$W_v = [(a_4^2 + b_4^2 + c_4^2)]^{1/2}$	± 0.104 m/s
Numunelerin bünyesindeki nem ölçümünün tespitinde ortaya çıkabilecek toplam hata (W_M)	$W_M = [(a_5^2 + b_5^2)]^{1/2}$	± 0.200 RH
Havanın bağıl neminin ölçümünden kaynaklanan hatalar (W_ϕ)	$W_\phi = [(a_6^2 + b_6^2)]^{1/2}$	± 0.1 RH
Basınç ölçümünden kaynaklanabilecek toplam hatanın tespiti (W_p)	$W_p = [(a_7^2 + b_7^2)]^{1/2}$	± 0.0025 mbar
Fiziksel özelliklerin okunmasında ortaya çıkabilecek hata	W_d	$\pm 0.1-0.2\%$

8.DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1. Havalı Güneş Kollektörlerinden Elde Edilen Deney Sonuçları

Bu kısımda kurutma deneylerinde kullanılmak üzere geliştirilen havalı güneş kolektörünün verimi araştırılmıştır. Bu amaçla genişletilmiş yüzeyli kolektör ile klasik düz yüzeyli havalı güneş kolektörü kullanılarak deneyler yapılmış ve kolektör verimleri mukayese edilmiştir. Aynı anda çalıştırılan düz yüzeyli havalı kolektör ve genişletilmiş yüzeyli havalı kolektörlerde 0.5 m/s, 1m/s ve 1.5 m/s olmak üzere üç farklı hava debisinde kolektör giriş, çıkış ve çevre sıcaklıkları veri toplayıcı (datalogger) yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Deney yapılan günler için Kipp-Zonen marka solarimetre yardımıyla ölçülen güneş ışınlam şiddeti değerleri grafiklere aktarılmıştır. Maksimum güneş ışınlam şiddeti 03.07.2006 tarihinde saat 13.00' de 962 W/m^2 olarak ölçülmüştür.

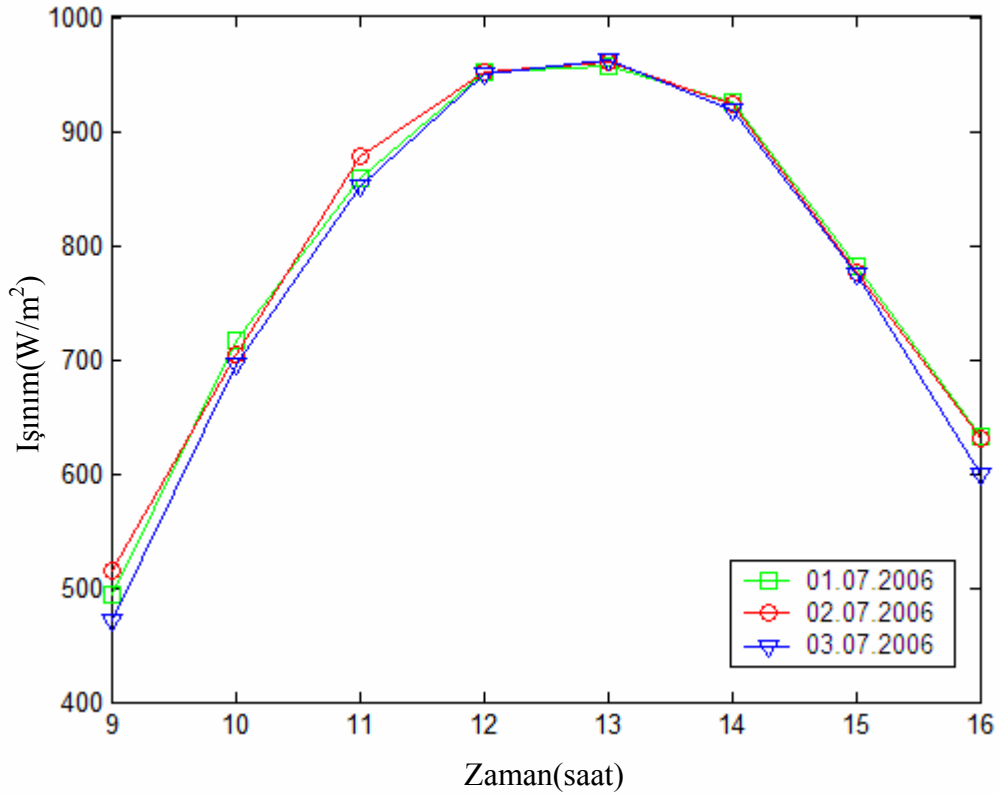
Üç farklı hava hızında gerçekleştirilen kolektör deneyleri 01.07.2006-03.07.2006 tarihleri arasında yapılmıştır. Her bir kolektör için saat 09:00' dan 16:00' a kadar ölçümler alınmıştır. Deneyler süresince ışınlam şiddeti 471 W/m^2 ile 962 W/m^2 değerleri arasında değişim göstermektedir. Şekil 8.1' den görüldüğü gibi ışınlam değerleri saat 09:00'da ortalama 500 W/m^2 civarında olup saat 13:00' e kadar ışınlam değerleri artış göstermektedir. En yüksek değerine saat 13:00 civarında ulaşmaktadır.

Şekil 8.2-8.4' de görüldüğü gibi her bir hava hızı için zamana bağlı olarak kolektör giriş ve çıkış sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Şekil 8.2' de 0.5 m/s hava hızı için kolektöre giriş sıcaklıkları maksimum 44°C ' ye ulaşırken çıkış sıcaklıkları 65°C ' ye ulaşmaktadır.

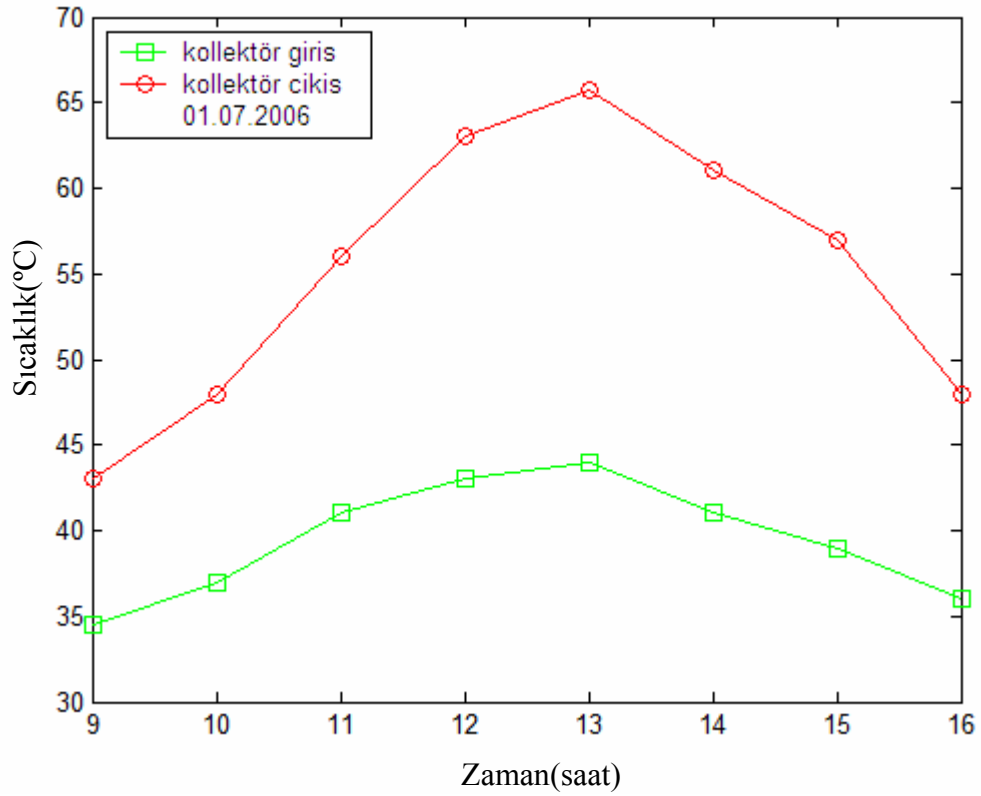
Şekil 8.3' de 1 m/s ve Şekil 8.4' de 1.5 m/s hızlar için çizilen kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları grafiklerinde ise 1 m/s hız için maksimum 42°C giriş sıcaklığı kolektör çıkışında 60°C ' ye ulaşmaktadır. 1.5 m/s hız için yapılan deneylerde ise 43°C maksimum giriş sıcaklıklarına sahip olan kolektör 55°C maksimum çıkış sıcaklığına ulaşmaktadır. Grafiklerden görüldüğü gibi sıcaklıklar 09:00'dan 13:00' e kadar artış göstermekte ve maksimum değerine ulaşmaktadır. Öğlen saat 13:00'dan sonra sıcaklıklar tekrar düşüş göstermektedir.

Şekil 8.5-8.7' de her bir hava hızı için zamana bağlı olarak FDM'li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Şekil 8.5' de 0.5 m/s hava hızı için kolektöre giriş sıcaklıkları $23-33^\circ\text{C}$ arasında değişirken çıkış sıcaklığı maksimum 57.5°C ' ye ulaşmaktadır.

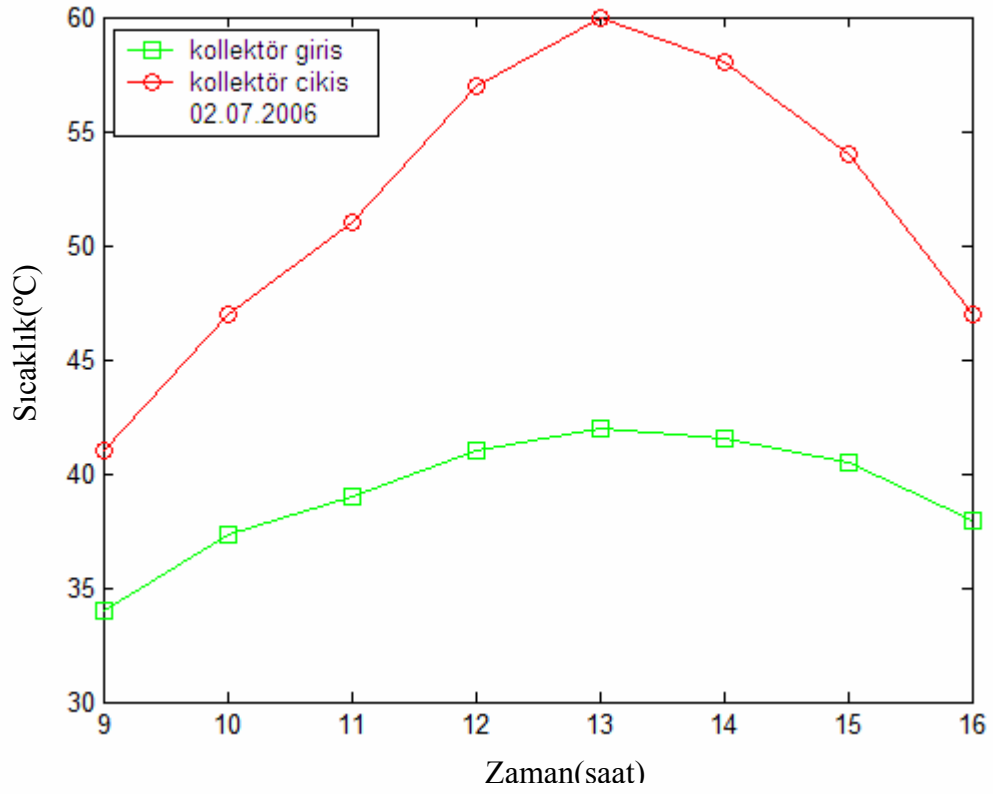
Şekil 8.6' de 1 m/s ve Şekil 8.7' de 1.5 m/s hızlar için çizilen kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları grafiklerinde ise 1 m/s hız için $23-32^\circ\text{C}$ giriş sıcaklıklarındaki kolektörün çıkış sıcaklıkları maksimum 54°C değerine ulaşmaktadır. 1.5 m/s hız için yapılan deneylerde ise $23-33^\circ\text{C}$ sıcaklıklarına sahip olan kolektör giriş sıcaklığı 50°C çıkış sıcaklığına ulaşmaktadır. Sıcaklıklar saat 18:00'den 22:00' ye kadar düşüş göstermektedir.



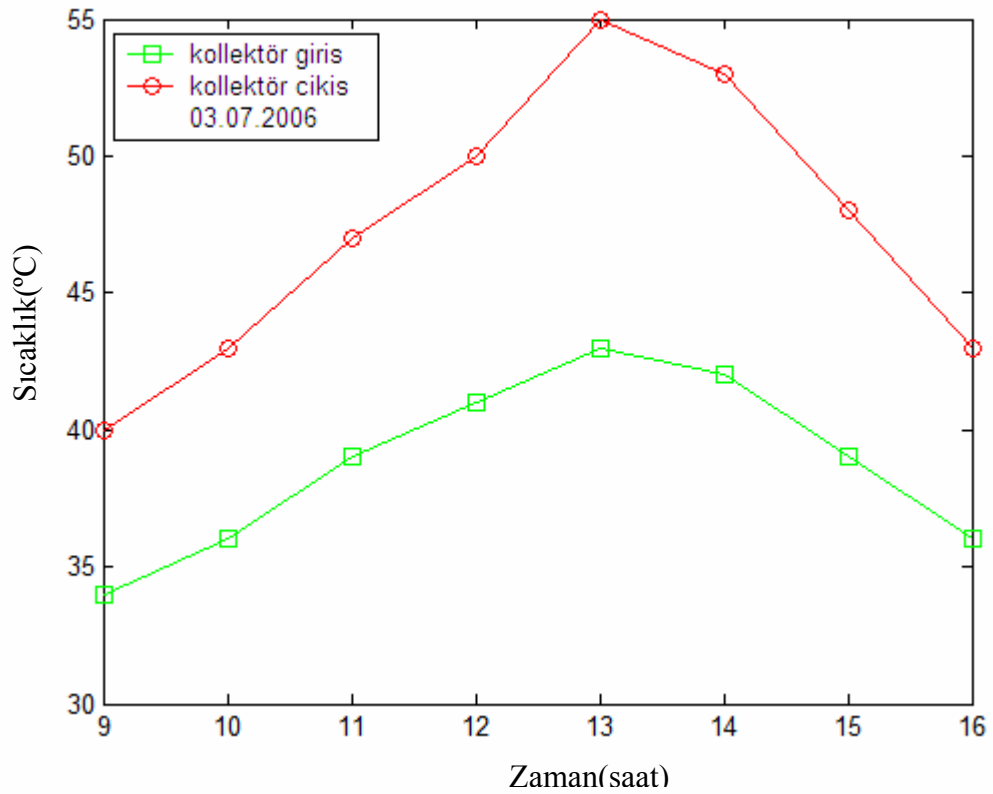
Şekil 8.1. Zamanla ışıınım şiddetinin değışimi



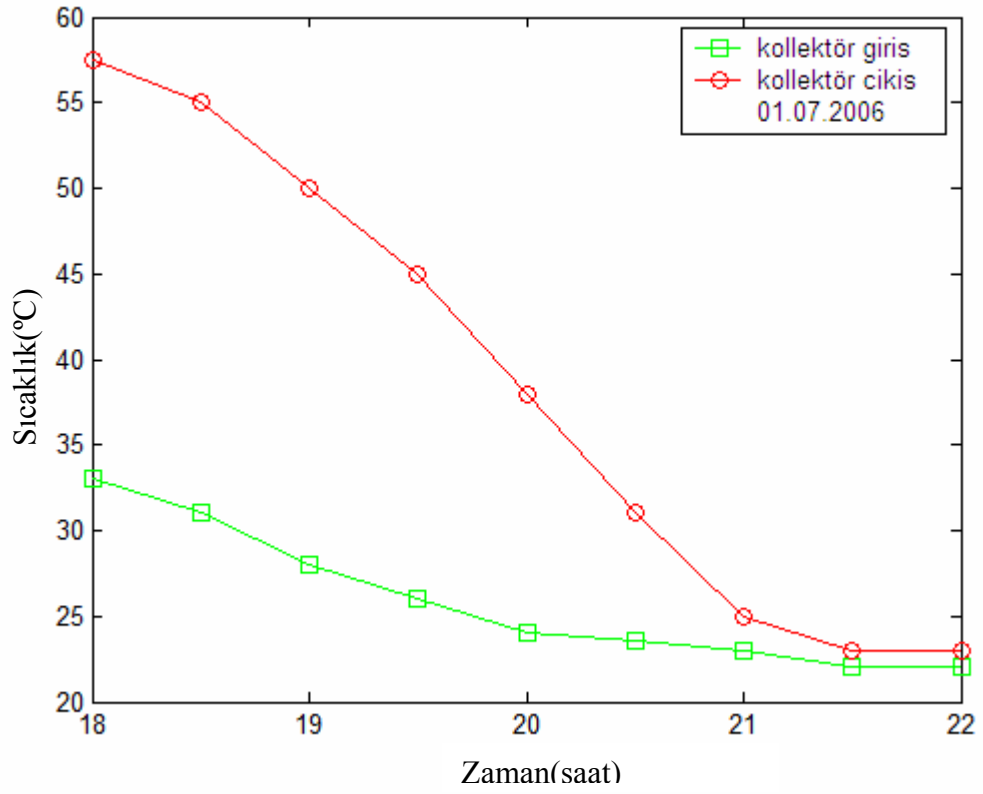
Şekil 8.2. 0.5 m/s için genişletilmiş yüzeyli kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları



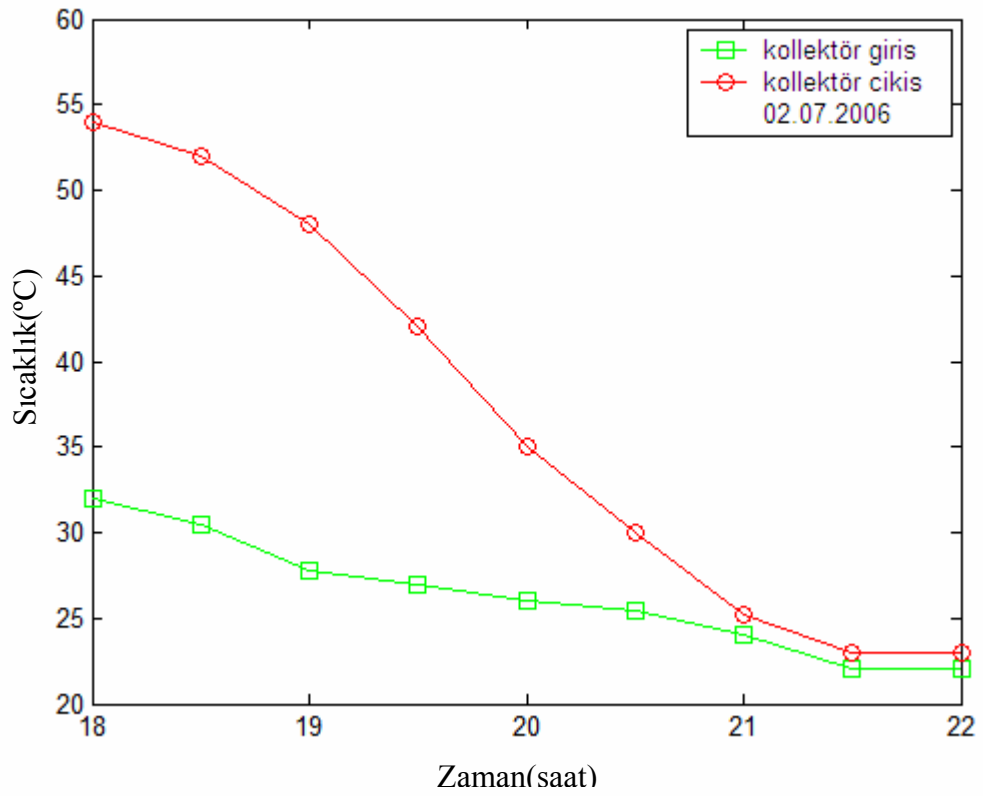
Şekil 8.3. 1 m/s için genişletilmiş yüzeyli kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları



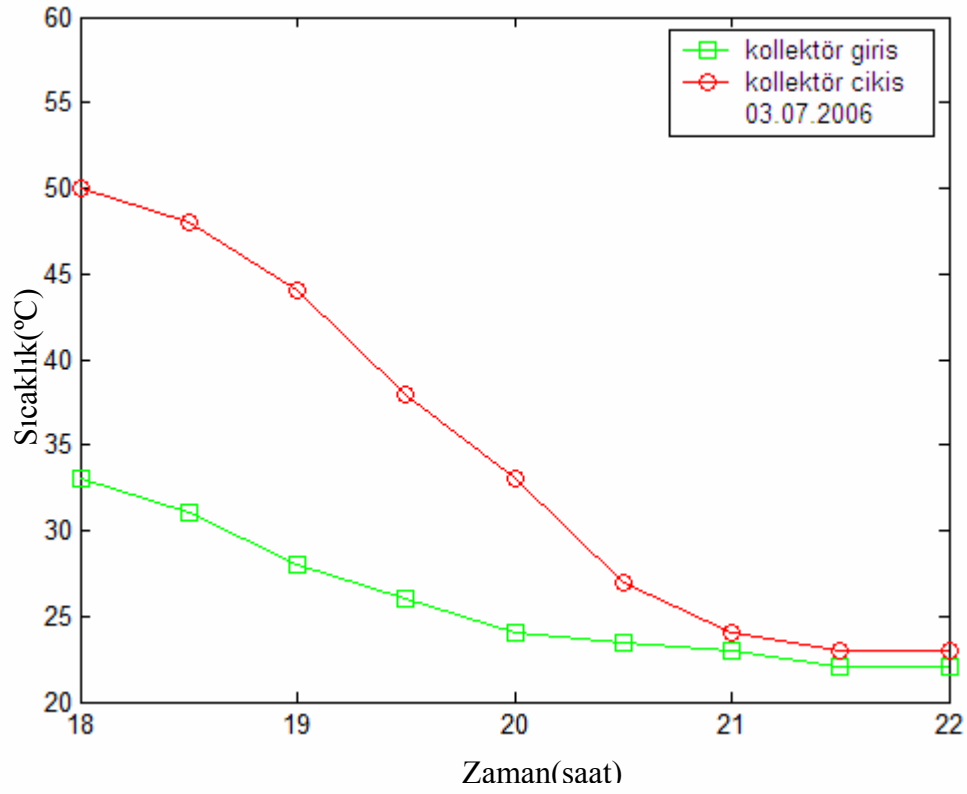
Şekil 8.4. 1.5 m/s için genişletilmiş yüzeyli kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları



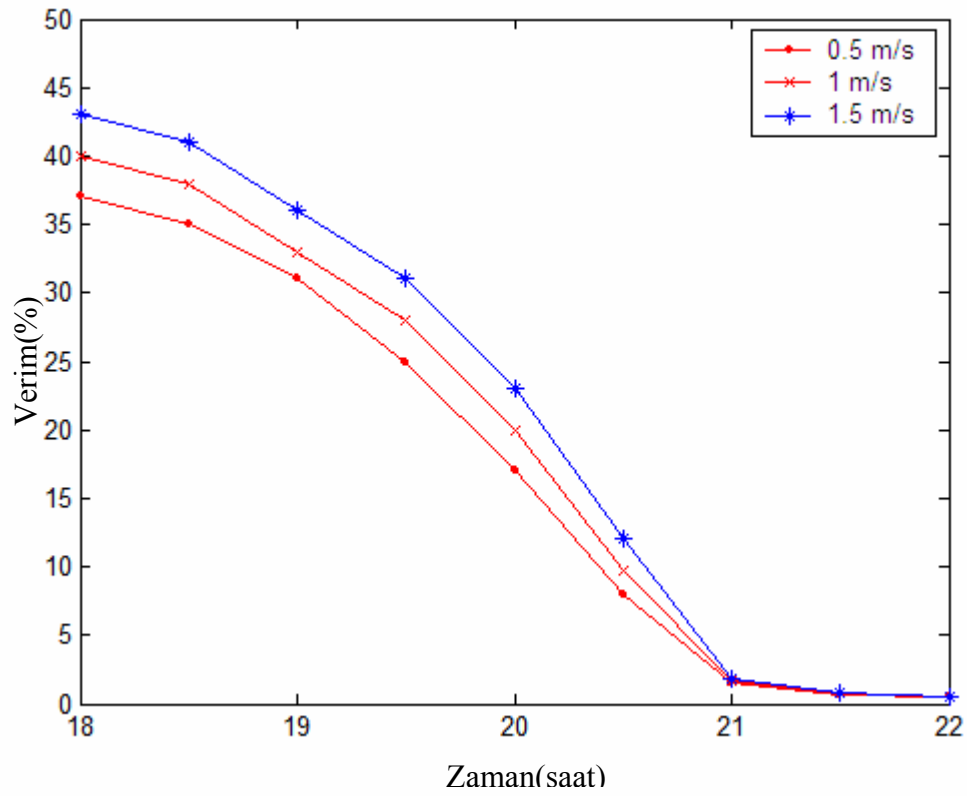
Şekil 8.5. 0.5 m/s için FDM’li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları



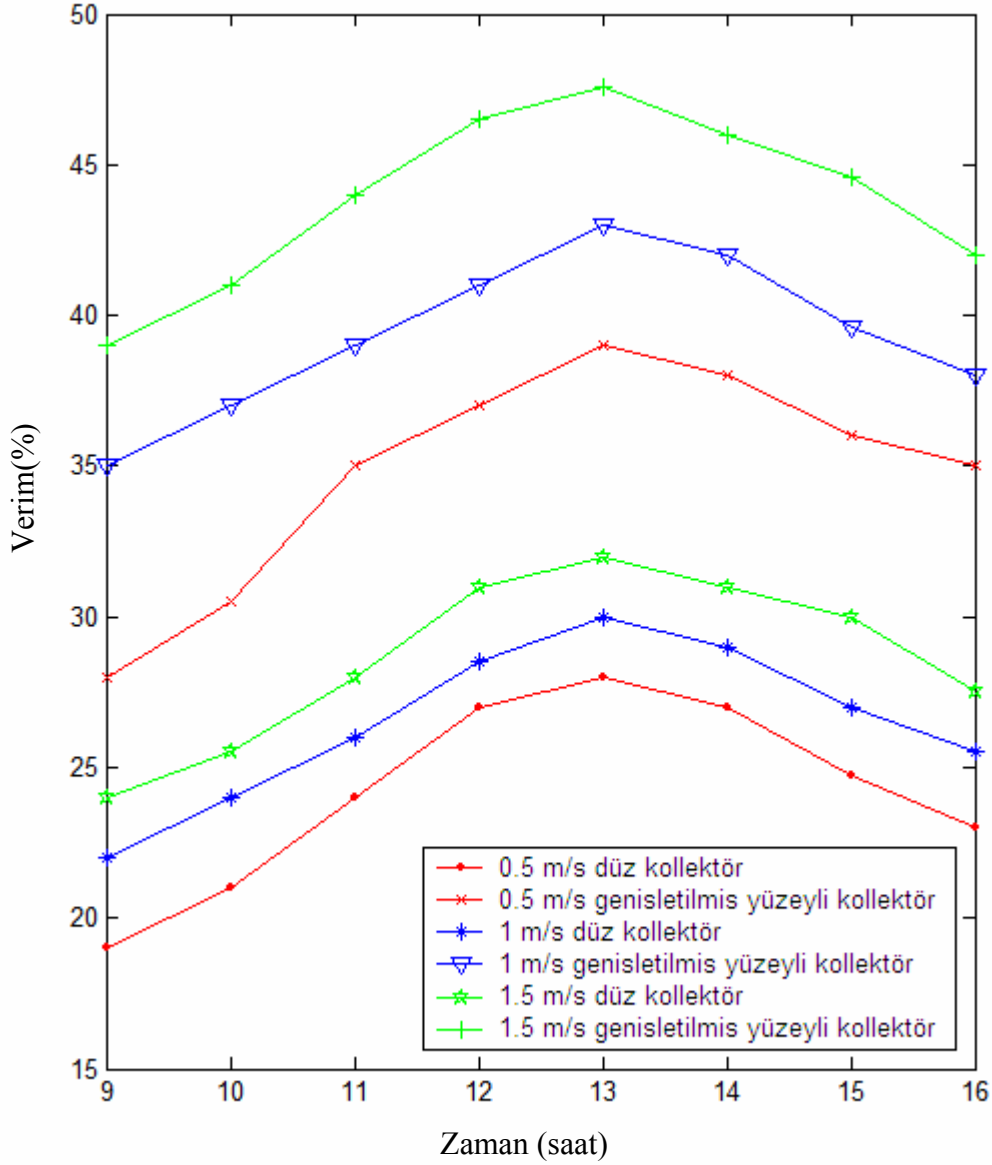
Şekil 8.6. 1 m/s için FDM’li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları



Şekil 8.7. 1.5 m/s için FDM’li kolektör giriş ve çıkış sıcaklıkları



Şekil 8.8. FDM’li kolektörün hava hızlarına göre verimleri



Şekil 8.9. Düz ve genişletilmiş yüzeyli kolektörlerin hava hızlarına göre verimleri

Şekil 8.8’ de üç farklı hava hızı için FDM’ li kolektörün zamana göre verim değerlerinin değişimleri görülmektedir. 0.5 m/s hava hızında % 37, 1 m/s hava hızında % 40 ve 1.5 m/s hava hızında ise % 43 maksimum değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Şekil 8.9’ da üç farklı hava hızı için kolektörlerin zamana göre verim değerlerinin değişimleri görülmektedir. 0.5 m/s hava hızında düz kolektör için verim %19-28 değerleri arasında değişmekte iken aynı hızda genişletilmiş yüzeyli kolektör için %28-39 değerleri arasındadır. 1 m/s hız için düz kolektör verimi %22-30 arasında değişmekte gösterirken genişletilmiş yüzeyli kolektörde bu değerler %35-43 arasında değişmektedir. Verim değerleri 1.5 m/s hız içinde düz kolektörde %24-32, genişletilmiş yüzeyli kolektörde ise %39-48 değerleri arasında değişim göstermektedir. Verim öğlen saatlerinde üç hız değeri içinde maksimum seviyeye ulaşmaktadır.

Genişletilmiş yüzeyli kolektörlerde ısı transfer yüzey alanının artırılması ve yutucu yüzey üzerinde açılan delikler yardımıyla türbülans oluşturulması verimi artırıcı nedenler olarak görülmektedir. Bu sayede verim % 48 değerine kadar artış göstermiştir.

8.2. Kurutma Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Çekirdekli üzüm kurutma deneylerine 22.07.2006 tarihinde başlanılmış ve üç farklı hava hızında deneyler yapılmıştır. Kurutulmuş üzümde uygun rengi elde edebilmek ve üzümler üzerinde bulunan mum tabakasını uzaklaştırarak kurumayı hızlandırmak için üzümler bandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu nedenle üzümler kurutma işlemine başlamadan önce yaygın olarak uygulanan ve ‘potasa’ adı verilen potasyum karbonat, zeytinyağı ve su ile uygun oranlarda hazırlanan bandırma çözeltisine 30 saniye süreyle daldırılmıştır. Bandırma çözeltisi içerisinde 1 lt su bulunan kaba 50 gram K_2CO_3 katılarak iyice çözülünceye kadar karıştırılmıştır. Ticari potasa diye isimlendirilen K_2CO_3 ’ nın kimyasal yapısı; % 98 K_2CO_3 , % 2 K_2SO_4 , KCL, K_3PO_4 ve Na_2CO_3 ’ den oluşmaktadır. Daha sonra ayrı bir kapta bir miktar çözeltiye 5 gram zeytinyağı eklenmiştir. Bu şekilde iyice karıştırılan zeytinyağı çözelti karışımı ana kapa eklenerek tekrar karıştırılmıştır. Üzüm örnekleri tartılarak çözelti içerisine daldırılmış ve tepsilere konulmuştur. Üzümler bandırılmadan önceki ağırlığına gelene kadar tartılmış ve ilk ağırlığına geldiği an kurumanın başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Bu işlemde amaç üzümün dış yüzeyindeki mumsu tabakayı eriterek kısa zamanda kurutma yapmak ve açık renkte kuru ürün elde etmektir. Çünkü bandırılmadan kurutulan üzümler hem geç kurumakta hem de koyu renkte olmaktadır. Kurutulacak üzümler patates torbasından yapılmış tepsilere ince sergi halinde serilmiştir. Hazırlanan üzümler hem kurutucuda hem de doğal şartlarda aynı anda kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Deneylere üzümlerin nem içeriğinin sabit kaldığı $0.09 \text{ kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{katımadde}}$ değerine kadar devam edilmiştir.

Altan hava girişli tepsili kabin tipi kurutucuda deneylerin yapıldığı 2006 yaz dönemi ışınlam değerlerine bağlı olarak kullanılan havalı kolektörlerde fan yardımıyla kolektörlere ve kurutma odasına gönderilen hava hızı sabit tutulmuş ve daha sonra belirli kademelerde çalıştırılan fan yardımıyla hava hızı değiştirilmiştir.

Güneş enerjisinden daha fazla faydalanmak için kullanılan diğer bir kollektörün tabanına ise faz değişim malzemesi kalsiyum klorür hegzahidrat döşenmiştir. Gündüz faz değişim malzemesi kolektör yardımıyla güneş enerjisini depolamış ve güneş battıktan sonra ise fan yardımıyla gönderilen havanın faz değişim malzemesinin bulunduğu yüzeyden geçirilerek depolanan enerjiden faydalanılmıştır. Güneş battıktan sonra faz değişim malzemesinin yerleştirildiği kolektör kullanılarak kurutma işlemine devam edilmiştir. Geri kazanım esnasında FDM’nin sıcaklığı erime sıcaklığının altına yavaşça düşmektedir. Sıcaklık ani bir şekilde çok düşük sıcaklıklara düşerse madde sıvı olmasına rağmen erime sıcaklığının altında bulunmaktadır. Bu tür bir durumla karşılaşmamak için 50

kg olan FDM malzemesinin içine toplam ağırlığının yaklaşık % 2 si kadar (1000 gr) Potasyum Nitrat (KNO_3) eklenmiştir.

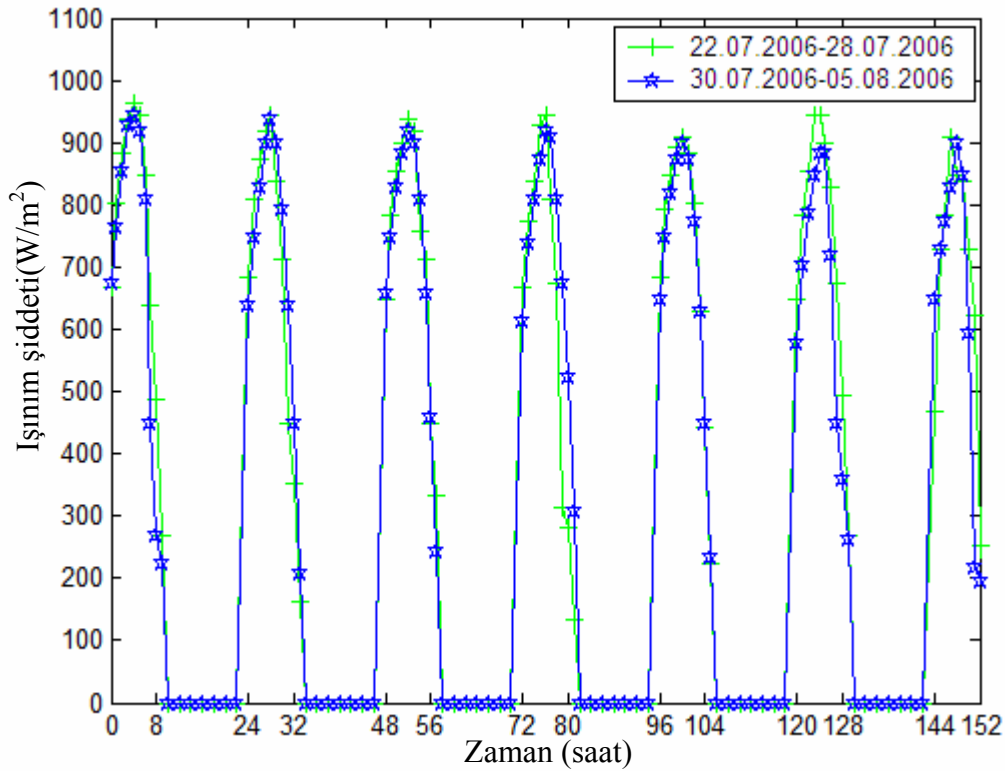
Kurutma havasının kurutma odasına girişi tam ortadan sağlanarak tek tepside ince yığın tarzında serili bulunan üzüm numuneleri üzerine akışı sağlanmıştır. Ayrıca farklı kurutma havası hızlarında yapılan deneyler kurutma süreleri bakımından da karşılaştırılmıştır. Havalı güneş kolektörünün kullanıldığı kurutma odasında kurutulan üzümler ile beton sergide kurutulan üzümlerin kuruma süresi karşılaştırılmıştır. Kurutma deneylerinde kullanılan havalı kolektörlerde toplayıcı yüzey alanını artırmak amacıyla delikli kademeli absorber yüzeyler kullanılmıştır.

Bu bölümde kurutma deneyleri sırasında nem içeriğinin, kuruma hızının, nem oranının, ağırlık kaybının zamana göre değişimi ve kuruma hızının-nem içeriğiyle değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma deneylerinde bu incelemeler için üç farklı hava hızı kullanılmıştır. Kurutma deneylerinin yapıldığı günlerdeki ışıınım değerleri Şekil 8.10-8.13’de grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 8.10’da 0.5 m/s hava hızı için kurutma odası girişine dönel eleman yerleştirilmeden yapılan kurutma deneyleri 22.07.2006-28.07.2006 tarihleri arasındaki ve dönel eleman yerleştirilerek yapılan kurutma deneyleri için 30.07.2006-05.08.2006 tarihleri arasındaki ışıınım değerleri verilmiştir. Şekil 8.11’de 1 m/s için ve Şekil 8.12’de 1.5 m/s için ve Şekil 8.13’ de FDM’li kolektör ile kurutma deneylerinin yapıldığı günlerdeki ışıınım değerleri görülmektedir. Bu grafiklerde sırasıyla 06.08.2006-10.08.2006 tarihleri arasında ve 17.08.2006-20.08.2006 tarihleri arasında dönel eleman yerleştirilmeden kurutma deneyleri yapılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi sabah 09:00’ da 640 W/m^2 civarındaki ışıınım şiddeti değeri öğlen saatlerinde 970 W/m^2 maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu ışıınım değerlerine göre değişiklik gösteren kurutma havası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları Şekil 8.14–8.17’ de verilmiştir. Şekil 8.14’de görüldüğü gibi 0.5 m/s hava hızı için kurutma odası giriş sıcaklığı maksimum 70°C değerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklıklar kurutma odası çıkışında maksimum 60°C sıcaklıklarına düşmektedir. Dönel eleman yerleştirilmeden yapılan deneyler de ise 70°C ulaşan giriş sıcaklıkları çıkışta 63°C değerine düşmektedir. 1 m/s hava hızı için Şekil 8.15 incelendiğinde ise 65°C sıcaklıklarında kurutma odasına giren havanın 59°C sıcaklıklarına, dönel eleman olmadığı durumda ise 61°C sıcaklık değerlerine düştüğü görülmektedir. Şekil 8.16’da 1.5 m/s hız için kurutma odası giriş sıcaklıkları incelendiğinde 61°C giriş sıcaklığına sahip olan havanın 56°C çıkış sıcaklığına düştüğü görülmektedir. Dönel eleman yerleştirilmeden yapılan deneyler ise bu değer 58°C olduğu görülmektedir. FDM’ li kolektör kullanılan deneyler sırasında ise 54°C giriş sıcaklıkları çıkışta 51°C değerlerine düşmektedir (Şekil 8.17). FDM’li kolektör kullanılarak yapılan deneylerde 1.5 m/s hava hızı kullanılmış, ayrıca kurutma odası girişine dönel eleman yerleştirilmiş ve kurutma odası içerisine hava yönlendirme elemanları konulmuştur.

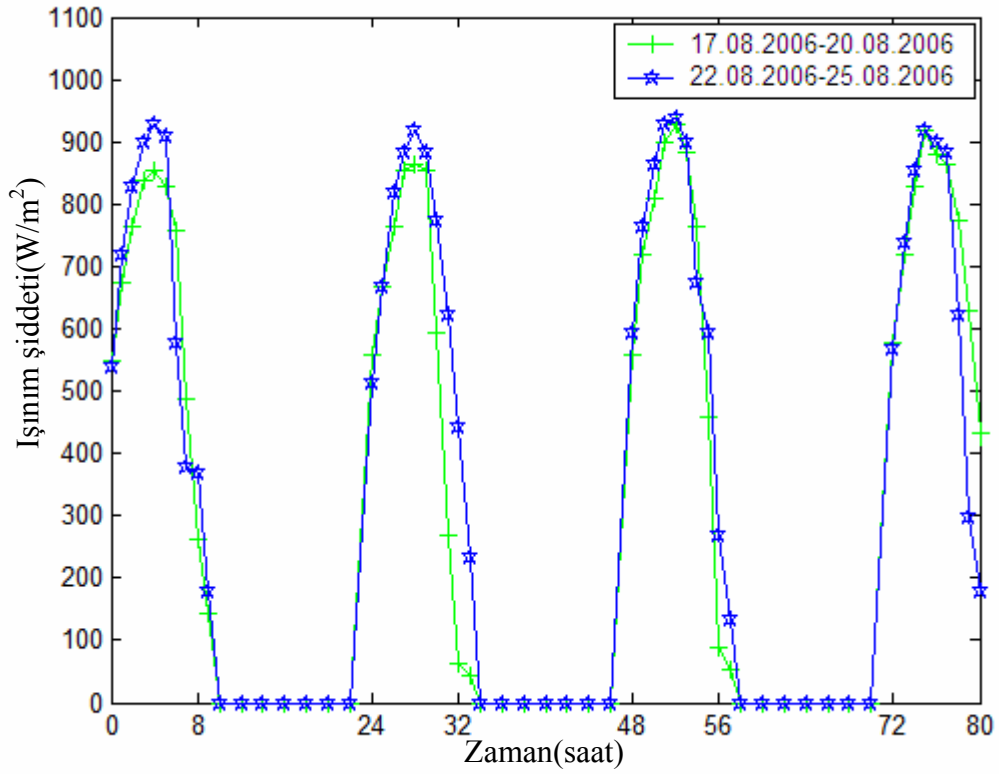
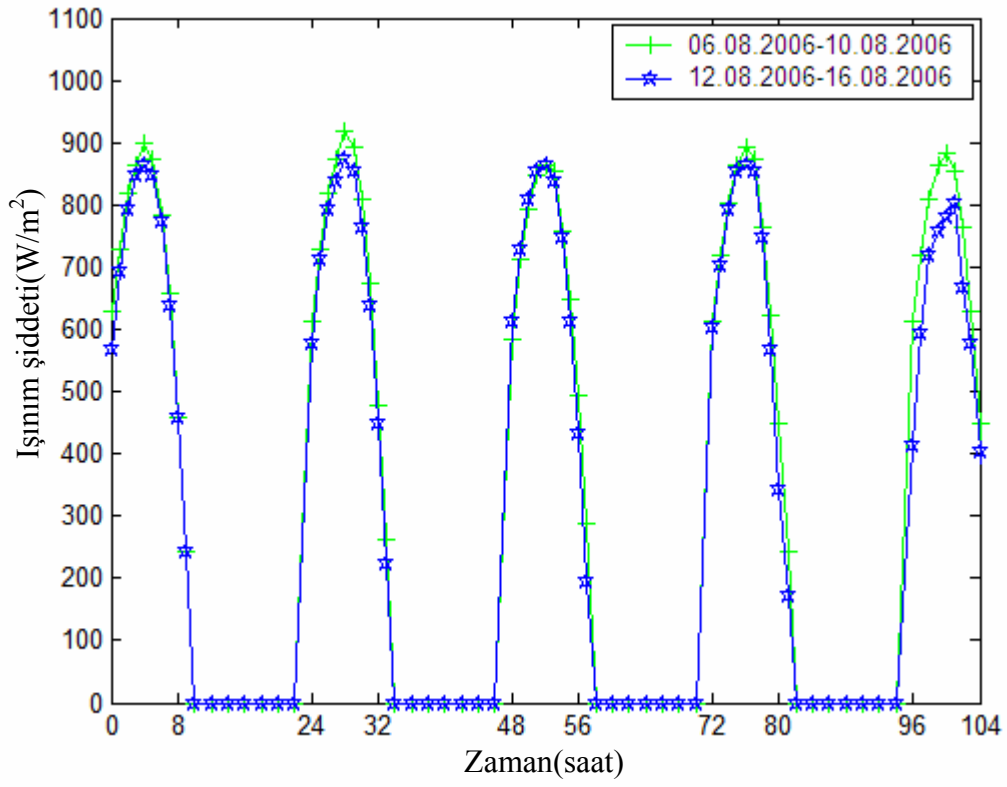
Ayrıca kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak bu grafiklerde ölçülen ürün merkez sıcaklıkları verilmiştir. Bu grafiklerin incelenmesiyle 0.5 m/s hava hızı için ürün merkez sıcaklığı öğlen saatlerinde maksimum 56°C , 1 m/s hava hızı için 53°C ve 1.5 m/s hava hızı için 51°C

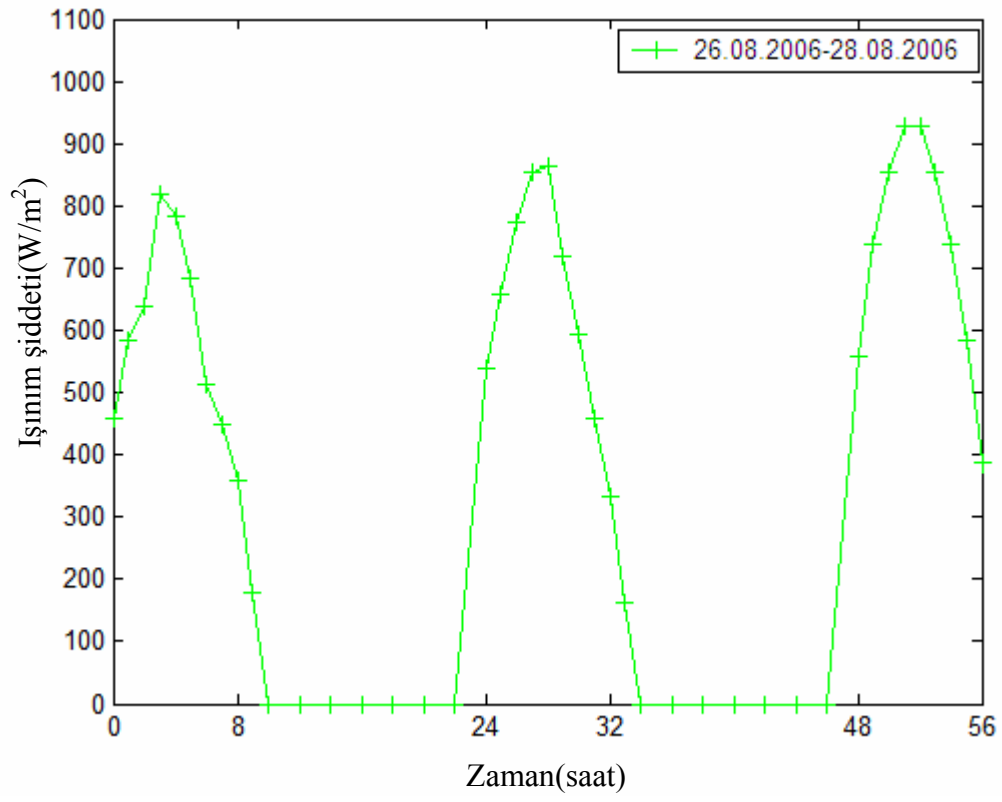
sıcaklıklarına ulaşmıştır. Bu değerler dönel elemanların kullanılmadığı durumda ise sırasıyla 54, 51 ve 49 maksimum değerine ulaşmaktadır.

Şekil 8.18’de 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s, açıkta güneşte kurutma ve FDM kolektörü kullanarak kurutma sırasında üzüm örneklerinin kurutulması sırasında nem içeriğinin zamanla değişimi grafiği görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi başlangıçta nem değeri ortalama $3 \text{ kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{katımadde}}$ ‘dir(% 75 yaş ağırlığa göre). Kurutma işlemine örneklerde herhangi bir ağırlık değişmesinin görülmeyişi nem içeriğinin sabit kaldığı $0.09 \text{ kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{katımadde}}$ nem oranına yani denge nemi değerine ulaştıktan sonra son verilmiştir. Bu değer denge nem içeriği olarak üç farklı hava hızı değeri için hesaplamalarda kullanılmıştır. Doğal şartlarda 200 saat olan kuruma süresi 0.5 m/s hava hızına sahip kurutma denemelerinde 152 saat, dönel elemansız 171 saat, 1 m/s hava hızı için 104 saat, dönel elemansız 123 saat, 1.5 m/s hava hızı için 80 saat, dönel elemansız 99 saat ve FDM’ li kolektör kullanılması durumunda kuruma zamanı 56 saate düşmüştür. Hava hızının artmasıyla kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklıkları farkı azalmakta fakat bununla birlikte hava hızının artışına bağlı olarak nem içeriğinde belirgin bir şekilde hızlı bir azalma görülmektedir. Ayrıca kurutucu girişine dönel eleman yerleştirilmesi ve kurutma odası içerisine hava yönlendirme elemanlarının yerleştirilmesiyle kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklıkları farkı artmakta ve buna bağlı olarak da kuruma süresi azalmaktadır. Elde edilen eğrilerin kurutma eğrilerinin genel karakteristiği olan eksponansiyel şekilde olduğu belirlenmiştir.

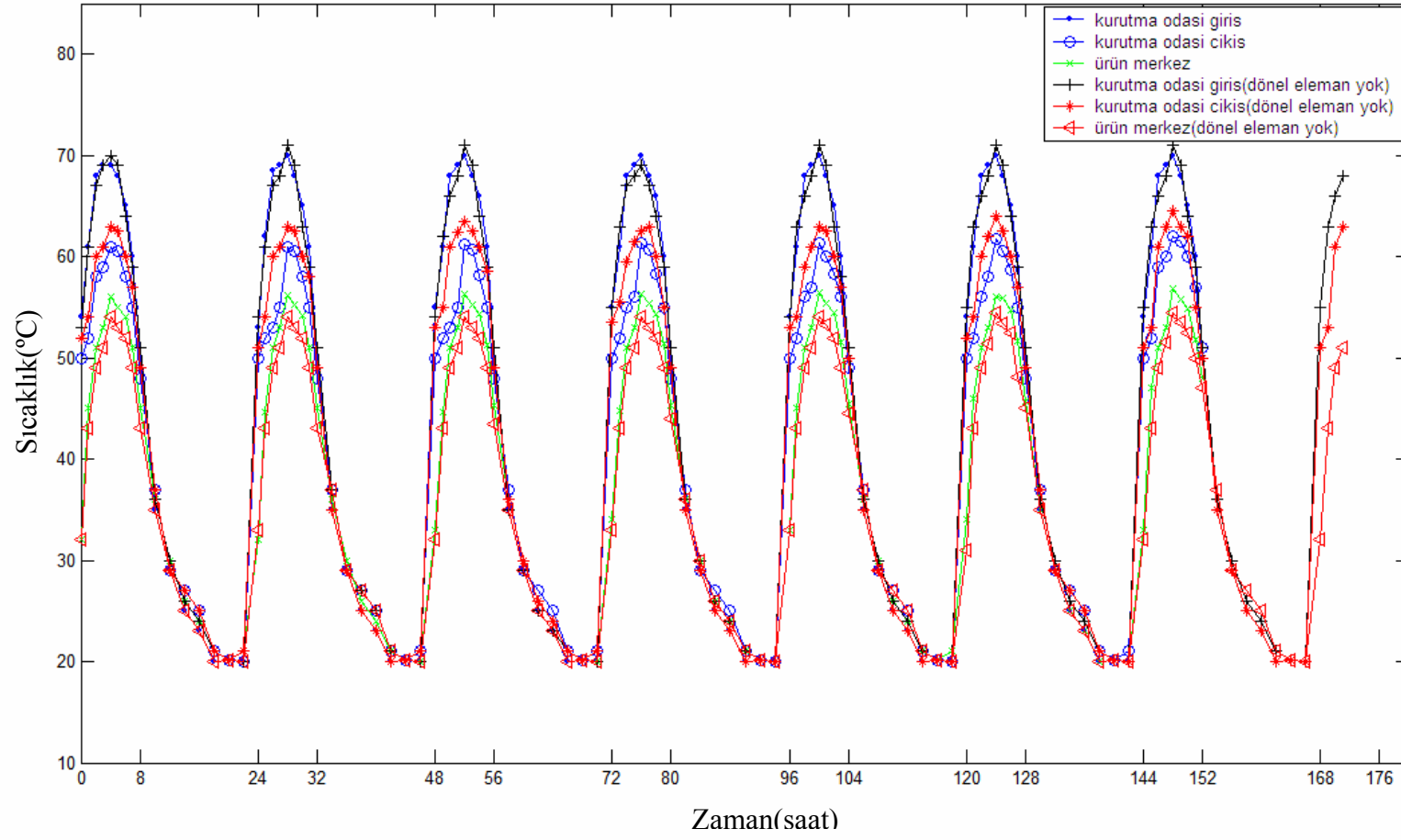


Şekil 8.10. 0.5 m/s hava hızında kurutma deneylerinin yapıldığı saatler için ışıınım şiddeti değerleri

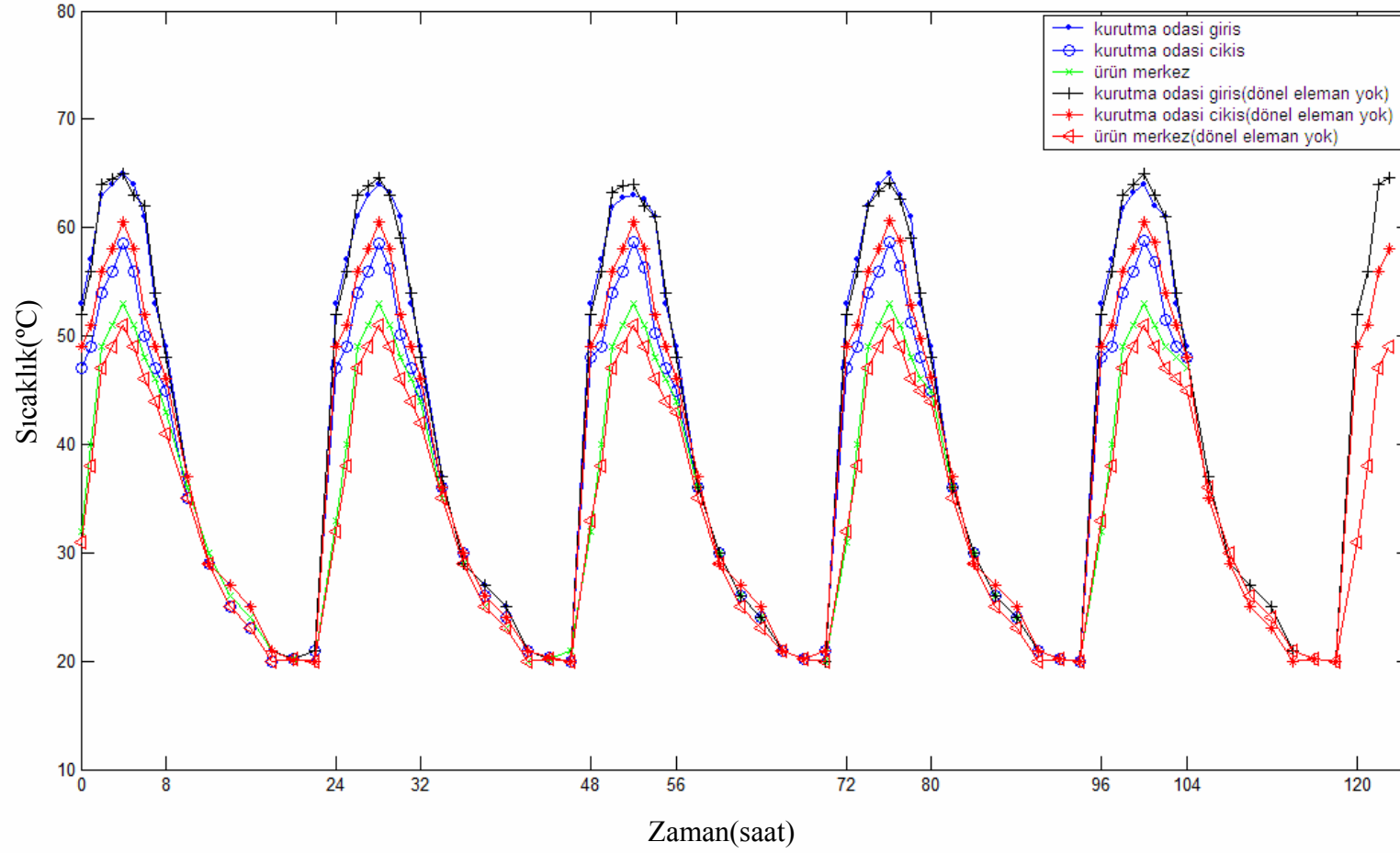




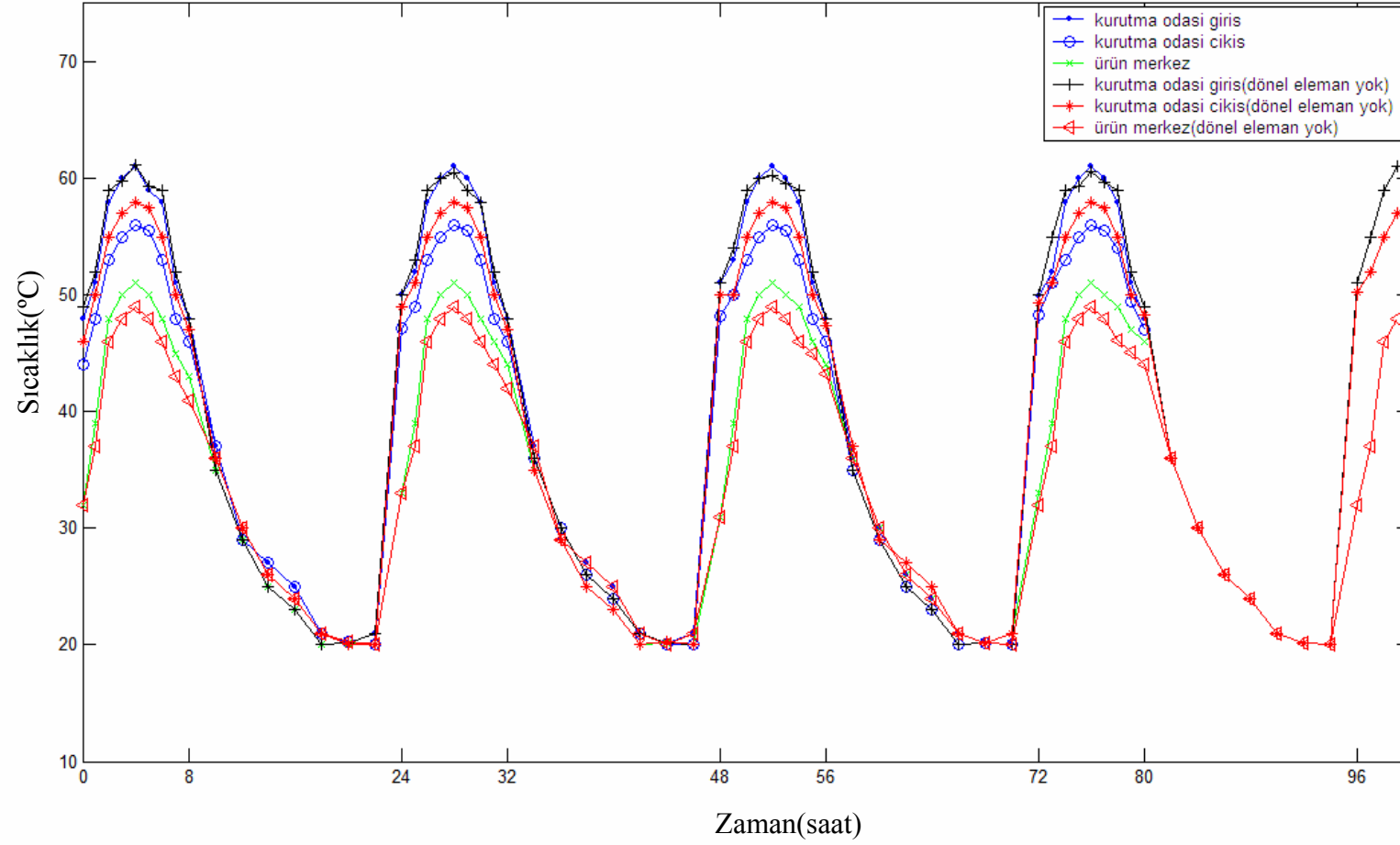
Şekil 8.13. FDM' li kollektörle kurutma deneylerinin yapıldığı saatler için ışıınım şiddeti değeri



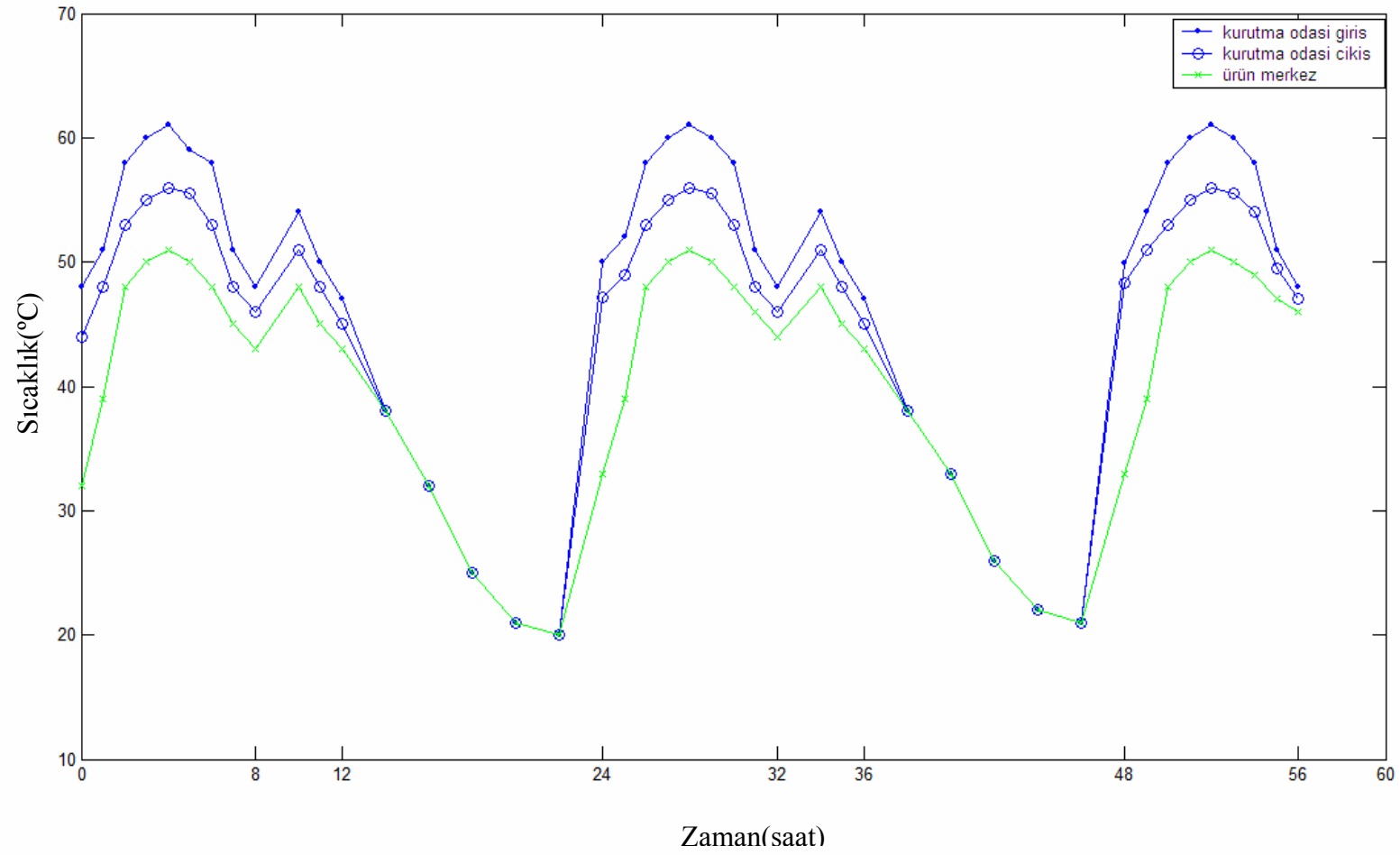
Şekil 8.14. 0.5 m/s hava hızı için kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları



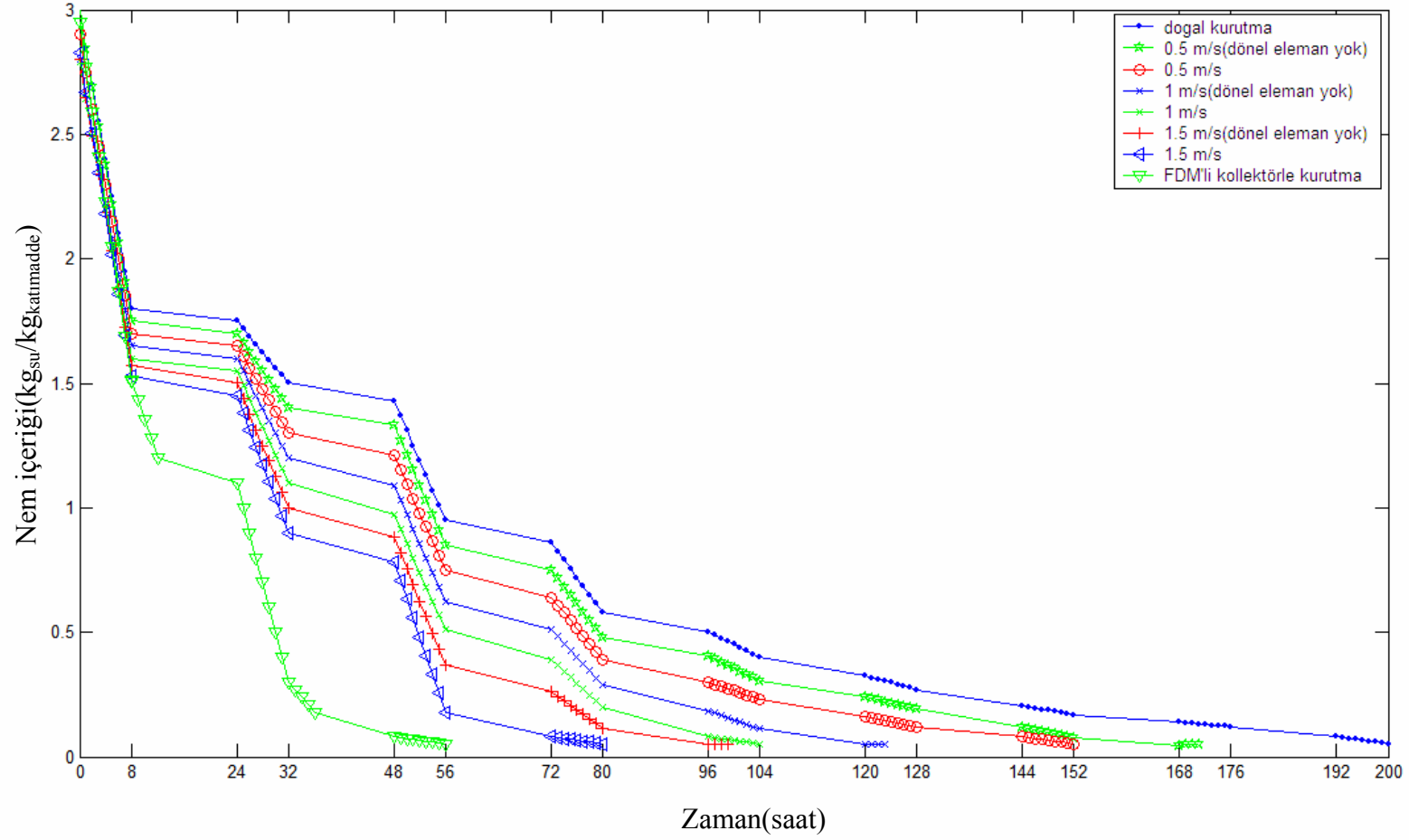
Şekil 8.15. 1 m/s hava hızı için kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları



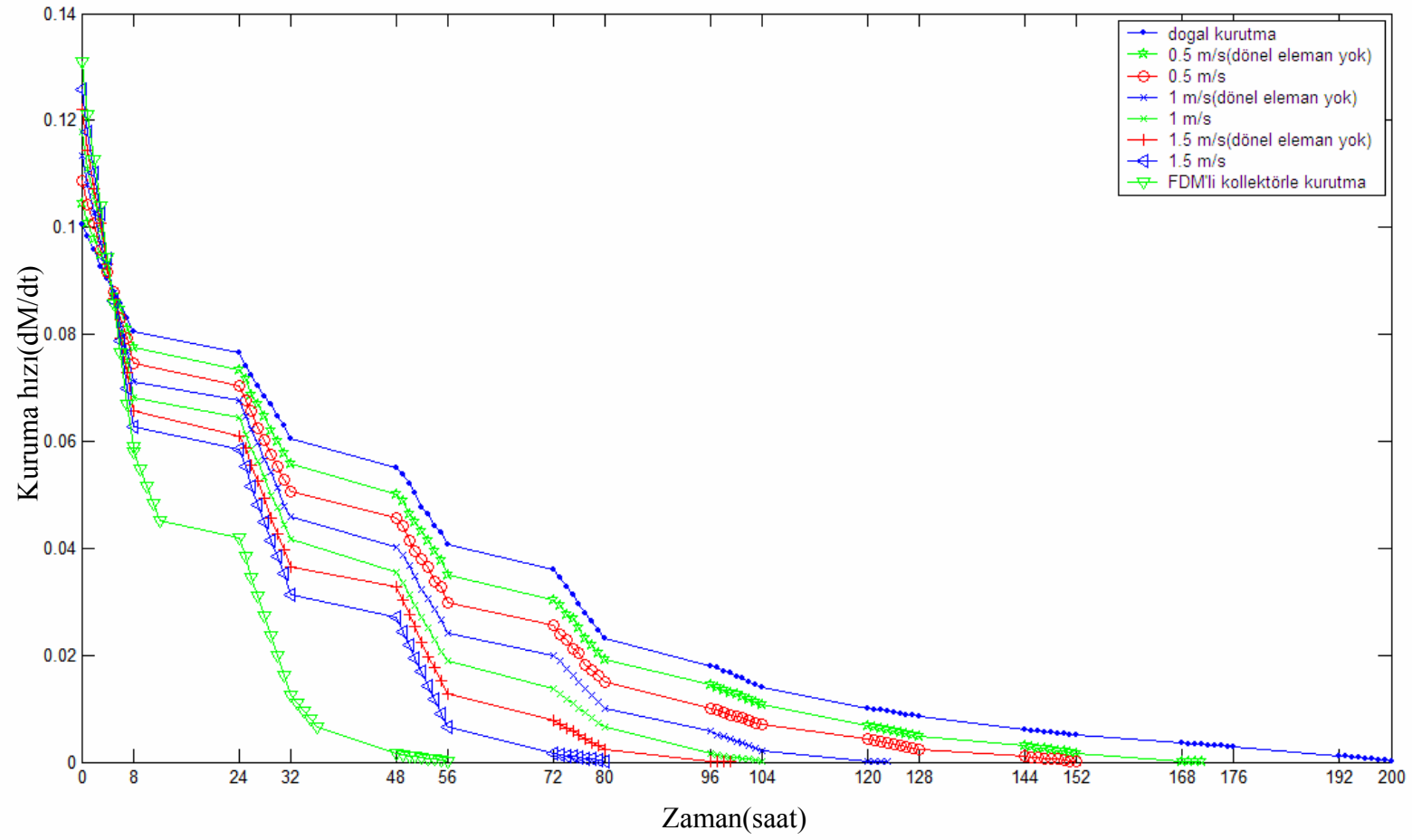
Şekil 8.16. 1.5 m/s hava hızı için kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları



Şekil 8.17. FDM’li kolektörle kurutma sırasında kurutma odası giriş, çıkış ve ürün merkez sıcaklıkları



Şekil 8.18. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin nem içeriğinin zamanla değişimi



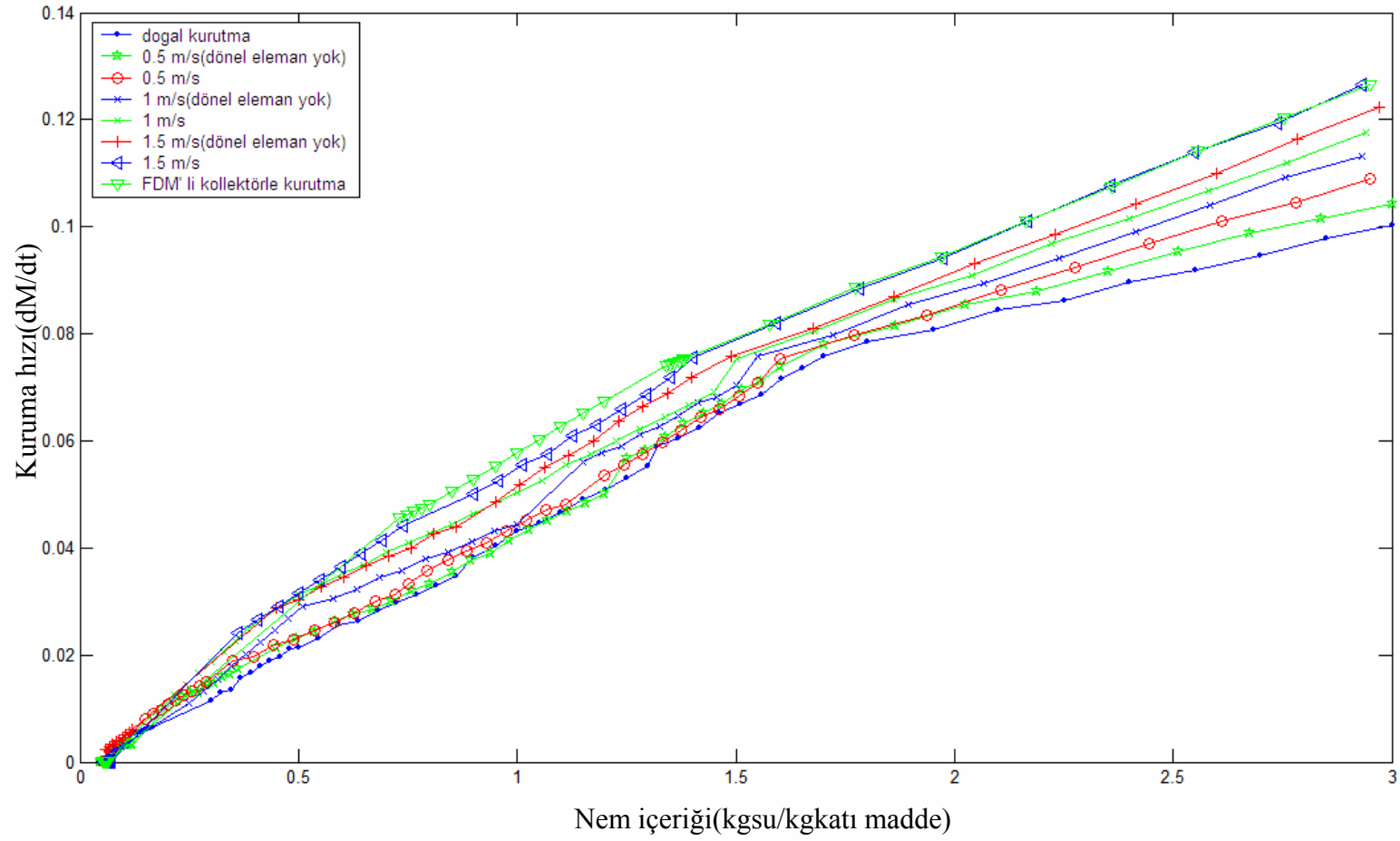
Şekil 8.19. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin kuruma hızının zamana göre değişimi

Şekil 8.19’da nem içeriğindeki değişimin zamana göre türevi alınarak belirlenen kuruma hızının zamana göre değişimi verilmiştir. Kurutma havası hızının artması, kurutucu girişine dönel eleman yerleştirilmesi ve kurutma odası içerisine hava yönlendirme elemanlarının yerleştirilmesiyle kuruma hızının arttığı ve kuruma süresinin kısaldığı görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi bütün kuruma zamanı azalan hızda kuruma evresinde gerçekleşmiştir. En hızlı kuruma hızı 1.5 m/s kuruma havası hızında FDM’ li kolektör kullanılması durumunda gerçekleşmiş ve bunu sırasıyla 1 m/s ve 0.5 m/s hava hızlarındaki kuruma hızları takip etmiştir. En yavaş kuruma hızı doğal kurutmada görülmüştür.

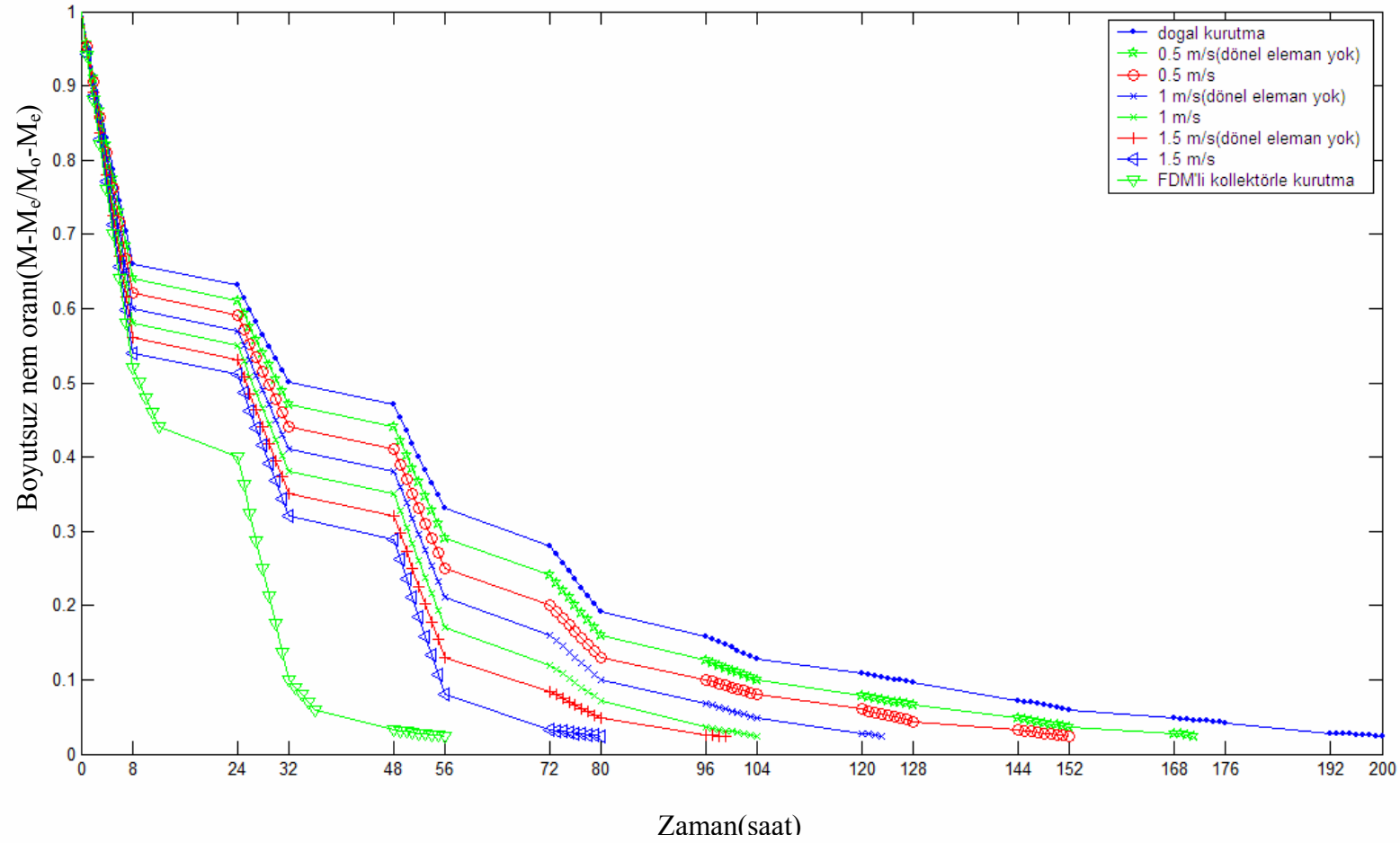
Şekil 8.20’de nem içeriğinin kuruma hızıyla değişimi görülmektedir. Kurutma havası hızının artması, kurutucu girişine dönel eleman yerleştirilmesi ve kurutma odası içerisine hava yönlendirme elemanlarının yerleştirilmesiyle eğrinin eğimi artmış ve en yüksek eğim FDM kolektör kullanılan kurutma sırasında elde edilmiştir.

Şekil 8.21’ kurutulan üzümün zamanla boyutsuz nem oranlarındaki değişimi görülmektedir. Boyutsuz nem oranlarının hesaplanmasında, nem içeriğinin zamana bağlı olarak değişimini gösteren eğrilerden kurumanın son bulduğu andaki nem içerikleri denge nem içeriği olarak kullanılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi hava hızı arttıkça daha kısa sürede daha düşük nem oranına ulaşılmaktadır.

Kurutucu girişine dönel eleman yerleştirilmesi ve kurutma odası içerisine hava yönlendirme elemanlarının yerleştirilmesiyle kurutulan üzümün daha kısa sürede daha düşük nem oranına ulaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 8.20. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi



Şekil 8.21. Üç farklı hava hızı için kurutma sırasında üzüm örneklerinin boyutsuz nem oranının zamanla değişimi

9. KURUMA EĞRİLERİNİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

Bu bölümde, kurutma deney sonuçlarından elde edilen nem oranı-zaman değişimi eğrileri, kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrileri ve difüzyon katsayısı değerlerinin modellenmesi lineer olmayan regresyon analiz yöntemiyle yapılmıştır.

Regresyon analizleri STATISTICA programı kullanılarak yapılmıştır. Temel kriter olarak korelasyon katsayısı (R) ürünlerin kurutma eğrilerini tanımlayan en iyi denklemi belirlemek için dikkate alınmış ve tahmini standart hatası (RMSE), modelleme yeterliliğini ifade eden (EF) ve khi-kare (χ^2) değerleri kullanılarak en uygun model belirlenmiştir. Teorik ve deneysel değerler arasındaki sapmayı gösteren tahmini standart hatası(RMSE) değerinin sıfıra yakın olması ve modelleme yeterliliğini ifade eden (EF) değerinin ise bire yakın olması modelin kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu değerler sırasıyla;

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{teorik,i} - MR_{deneysel,i})^2 \right]^{1/2} \quad (9.1)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{deneysel,i} - MR_{teorik,i})^2}{N - n} \quad (9.2)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{deneysel,i} - MR_{deneysel,ort})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{teorik,i} - MR_{deneysel,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{deneysel,i} - MR_{deneysel,ort})^2} \quad (9.3)$$

denklemleriyle hesaplanmıştır.

Burada MR_{teorik} modelde hesaplanan teorik nem oranı değeri, $MR_{deneysel}$ deney sonuçlarından elde edilen nem oranı değeri, $MR_{deneysel,ort}$ deney sonuçlarından elde edilen nem oranı değerlerinin ortalama değerlerini, N deneysel veri sayısını, n modelde kullanılan katsayı sayısı olarak tanımlanmaktadır.

En uygun modeldeki katsayılarla kurutma havası debisi ve kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklık farkının etkileri çoklu regresyon yöntemi yardımıyla aşağıdaki fonksiyonlar kullanılarak incelenmiştir.

Lineer; $f_{(x)} = a + bX$

Üssel; $f_{(x)} = aX^b$

Arhenius; $f_{(x)} = a \cdot \exp\left(\frac{b}{X}\right)$

Logaritmik; $f_{(x)} = a + b \cdot \ln(X)$

Exponansiyel; $f_{(x)} = a \cdot \exp(b \cdot X)$

Üzüm kurutma deneyleri için en iyi modelde bulunan katsayılar kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklık farkı ve kurutma havası debisine bağlı olarak aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$f_{(x)} = a_1 \cdot \Delta T^{a_2} \cdot \dot{m}^{a_3} \quad (9.4)$$

$$f_{(x)} = a_1 \cdot \Delta T^{a_2} + \exp(\dot{m}) \quad (9.5)$$

$$f_{(x)} = a_1 \cdot \Delta T^{a_2} + a_3 \cdot \dot{m}^{a_4} \quad (9.6)$$

$$f_{(x)} = a_1 \cdot \dot{m}^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{a_3}{\Delta T}\right) \quad (9.7)$$

Nem oranı eğrileri $\left(MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}\right)$ Tablo 9.1' de belirtilen literatürde mevcut bulunan

altı farklı nem oranı denklemi ile karşılaştırılmış ve en uygun sonucu veren model deney sonuçlarını ifade etmek için kullanılmıştır.

Tablo 9.1. 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	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-kt^n)$	(Diamente vd., 1991)
Geliştirilmiş Page	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp[-(kt)^n]$	(White vd., 1978)
Henderson ve Pabis	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-kt)$	(Rahman vd., 1998)
İki terimli	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(Verma vd,1985)
Midilli	$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-k \cdot (t^n)) + b \cdot t$	(Midilli ve Küçük, 2002)

9.1. Zamanla Nem Oranı Değişiminin Modellenmesi

Literatürde bulunan altı model, deney sonuçlarına göre elde edilen nem oranı değerleri için incelenirken korelasyon katsayısının (R) en yüksek olduğu ve RMSE ve χ^2 değerlerinin en düşük olduğu model tespit edilmeye çalışılmıştır. Tablo 9.2’de 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutulan üzüm örnekleri için, Tablo 9.3’de 1.5 m/s hava hızında ve 1.5 m/s hava hızında FDM’li kolektörle kurutulan üzüm örnekleri için, Tablo 9.4’de 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutucuya dönel eleman yerleştirilmeden kurutulan üzüm örnekleri için, Tablo 9.5’de 1.5 m/s hava hızında ve doğal kurutma şartlarında kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri verilmektedir.

Tablo 9.2’de 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutulan üzüm örnekleri için nem oranı zaman değişimini açıklayan modellerde analiz sonucu elde edilen veriler incelendiğinde en yüksek korelasyon katsayısı Midilli modelinde, en düşük korelasyon katsayısı ise iki terimli modelde görülmektedir. Midilli modelinde elde edilen korelasyon katsayısına en yakın değer Page modelinde görülmektedir. Ancak χ^2 değerleri incelendiğinde en düşük değeri Midilli modeli vermiştir. Diğer deney şartları için Tablo 9.3-9.5’de elde edilen veriler incelendiğinde de en yüksek korelasyon katsayısı değerleri ve en düşük χ^2 değerleri Midilli modelinde tespit edildiği için nem oranının zamanla değişimin bu modelle açıklanmıştır.

Nem oranının zamanla değişimini en iyi şekilde açıklayan Midilli modelinde bulunan değerler Tablo 9.6’da verilmektedir. Tablodaki istatistiksel değerler incelendiğinde üzüm kurutulmasında nem oranının zaman ile değişimini en az hata ile veren Midilli modelinde RMSE değerleri 0.00000325 ile 0.000946 aralığında, χ^2 değerleri 0.00000000345-0.000000578 aralığında değişmektedir. Modelin modelleme yeterliliğini belirten (EF) değeri ise 0.99967-0.99991 arasında değerler almaktadır.

Üzüm örnekleri için Midilli modeli kullanılarak elde edilen teorik ve deneysel sonuçlardan bulunan nem oranı değerleri Şekil 9.1’ de verilmektedir. Bu değerlerin ideal doğrunun yakınında dağılım göstermesi deneysel ve teorik değerlerin uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Tablo 9.2. 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri

Model	m=0.5 m/s		Model	m=1 m/s	
	R	χ^2		R	χ^2
Newton k=0.045602	0.96563	6.32x10 ⁻³	Newton k=0.045726	0.95721	7.5x10 ⁻⁴
Page modeli k=0.079680 n=0.685243	0.97342	4.95 x10 ⁻³	Page modeli k=0.079592 n=0.682426	0.96925	5.64 x10 ⁻³
Geliştirilmiş Page k=0.000213 n=0.000007	0.96328	5.32 x10 ⁻²	Geliştirilmiş Page k=0.000116 n=0.000063	0.96651	6.97 x10 ⁻³
Henderson ve Pabis a=0.931226 k=0.045206	0.96547	5.82x10 ⁻³	Henderson ve Pabis a=0.935875 k=0.056407	0.96942	6.27x10 ⁻⁴
İki terimli a=0.186725 k ₀ =7.021254 b=0.798326 k ₁ =0.029865	0.67425	5 x10 ⁻³	İki terimli a=0.170642 k ₀ =5.308574 b=0.598307 k ₁ =0.045972	0.66874	6.7 x10 ⁻³
Midilli a=0.915526 b=-0.088790 n=0.492682 k=0.127654	0.99927	7.8 x10 ⁻⁷	Midilli a=0.706427 b=-0.057063 n=0.249806 k=0.368264	0.99972	9.1 x10 ⁻⁸

Tablo 9.3. 1. 5 m/s kurutma havası hızında ve 1.5 m/s kurutma havası hızında FDM’li kollektörle kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri

Model	m=1.5 m/s		Model	m=1.5 m/s(FDM)	
	R	χ^2		R	χ^2
Newton k=0.0076	0.95656	5.68x10 ⁻⁴	Newton k=0.0085	0.96635	6.03x10 ⁻³
Page modeli k=0.012768 n=0.134698	0.96547	3.26 x10 ⁻³	Page modeli k=0.013907 n=0.145386	0.97329	4.25 x10 ⁻³
Geliştirilmiş Page k=0.00426 n=0.000523	0.95769	8.42 x10 ⁻²	Geliştirilmiş Page k=0.00385 n=0.000849	0.95387	7.46 x10 ⁻³
Henderson ve Pabis a=0.897465 k=0.004536	0.95822	7.35x10 ⁻³	Henderson ve Pabis a=0.790836 k=0.005739	0.97693	8.09x10 ⁻⁴
İki terimli a=0.469264 k ₀ =9.985047 b=0.973649 k ₁ =0.128936	0.69486	6.80 x10 ⁻³	İki terimli a=0.398947 k ₀ =9.786452 b=0.983455 k ₁ =0.130946	0.67497	6.75 x10 ⁻³
Midilli a=0.994673 b=0.076894 n=0.558734 k=-0.179245	0.99986	4.67 x10 ⁻⁸	Midilli a=0.908567 b=0.060945 n=0.679376 k=-0.187635	0.99892	3.87 x10 ⁻⁷

Tablo 9.4. 0. 5 m/s ve 1m/s kurutma havası hızlarında kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri

Model	m=0.5 m/s(dönel eleman yok)		Model	m=1 m/s(dönel eleman yok)	
	R	χ^2		R	χ^2
Newton k=0.052735	0.97254	3.73×10^{-3}	Newton k=0.056793	0.96485	4.56×10^{-2}
Page modeli k=0.082736 n=0.724598	0.98547	9.35×10^{-4}	Page modeli k=0.084683 n=0.793056	0.97695	7.68×10^{-3}
Geliştirilmiş Page k=0.000326 n=0.000085	0.97356	6.39×10^{-2}	Geliştirilmiş Page k=0.000245 n=0.000072	0.97563	8.42×10^{-3}
Henderson ve Pabis a=0.948729 k=0.054122	0.97839	5.37×10^{-2}	Henderson ve Pabis a=0.9393744 k=0.055620	0.97485	4.38×10^{-3}
İki terimli a=0.192376 k ₀ =8.038567 b=0.956431 k ₁ =0.046368	0.68574	3.47×10^{-3}	İki terimli a=0.183564 k ₀ =7.026738 b=0.784957 k ₁ =0.059385	0.68267	2.1×10^{-4}
Midilli a=0.935982 b=-0.091085 n=0.567820 k=0.149687	0.99991	5.78×10^{-7}	Midilli a=0.837594 b=-0.083749 n=0.648502 k=0.239574	0.99989	3.45×10^{-9}

Tablo 9.5. 1. 5 m/s kurutma havası hızında ve doğal şartlarda kurutulan üzüm örnekleri için nem oranının zamana göre modellenmesinde kullanılan modellerin katsayı değerleri, korelasyon katsayıları ve χ^2 değerleri

Model	m=1.5 m/s(dönel eleman yok)		Model	Doğal kurutma	
	R	χ^2		R	χ^2
Newton k=0.0087	0.94527	5.79×10^{-3}	Newton k=0.0088	0.95497	7.37×10^{-3}
Page modeli k=0.013486 n=0.142572	0.95835	3.59×10^{-3}	Page modeli k=0.021325 n=0.113869	0.96936	3.96×10^{-4}
Geliştirilmiş Page k=0.00541 n=0.000627	0.942864	5.08×10^{-2}	Geliştirilmiş Page k=0.00628 n=0.0099679	0.96843	3.86×10^{-3}
Henderson ve Pabis a=0.926497 k=0.0055791	0.948360	2.75×10^{-3}	Henderson ve Pabis a=0.859735 k=0.005606	0.95739	6.37×10^{-3}
İki terimli a=0.493764 k ₀ =9.837643 b=0.985386 k ₁ =0.149725	0.79365	5.05×10^{-3}	İki terimli a=0.593683 k ₀ =9.549837 b=0.959375 k ₁ =0.128563	0.80165	4.86×10^{-3}
Midilli a=0.97593 b=0.0759375 n=0.596483 k=-0.182669	0.99826	3.86×10^{-8}	Midilli a=0.95386 b=0.059734 n=0.794652 k=0.150934	0.99935	4.97×10^{-10}

Tablo 9.6. Üzüm için farklı kurutma koşullarında Midilli modelinde yer alan katsayılar ve istatistiksel değerler

Kurutma havası debisi $\dot{m}$ (m/s)	Kurutucuya Giriş ve çıkış sıcaklık farkı ΔT (°C)	a	k	b	n	RMSE	χ^2	EF	R
$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ MİDİLLİ EŞİTLİĞİ									
0.5	9	0.915526	0.127654	-0.088790	0.492682	3.25x10 ⁻⁶	7.8 x10 ⁻⁷	0.99982	0.99927
1	7	0.706427	0.368264	-0.057063	0.249806	4.72x10 ⁻⁴	9.1 x10 ⁻⁸	0.99974	0.99972
1.5	5	0.994673	-0.179245	0.076894	0.558734	3.78x10 ⁻⁴	4.67 x10 ⁻⁸	0.99969	0.99986
1.5(FDM)	4	0.908567	-0.187635	0.060945	0.679376	5.92x10 ⁻⁵	3.87 x10 ⁻⁷	0.99967	0.99892
0.5(dönel eleman yok)	7	0.935982	0.149687	0.091085	0.567820	7.63x10 ⁻⁴	5.78x10 ⁻⁷	0.99986	0.99991
1(dönel eleman yok)	5	0.837594	0.239574	-0.083749	0.648502	4.57x10 ⁻⁵	3.45 x10 ⁻⁹	0.99973	0.99989
1.5(dönel eleman yok)	3	0.97593	-0.182669	0.0759375	0.596483	9.46x10 ⁻⁴	3.86 x10 ⁻⁸	0.99991	0.99826

Çoklu regresyon tekniğinin ile en iyi modelde bulunan katsayılar üzerinde kurutma havası hızı ve kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklıklarının farkının etkisi her deney için incelendi. Korelasyon katsayısını yüksek olduğu değer kriter olarak kullanıldı. Üzüm örnekleri için nem oranının zaman ile değişimini en iyi şekilde açıklayan midilli modelinde bulunan a, k, b ve n katsayıların modellenmesi ve korelasyon katsayıları,

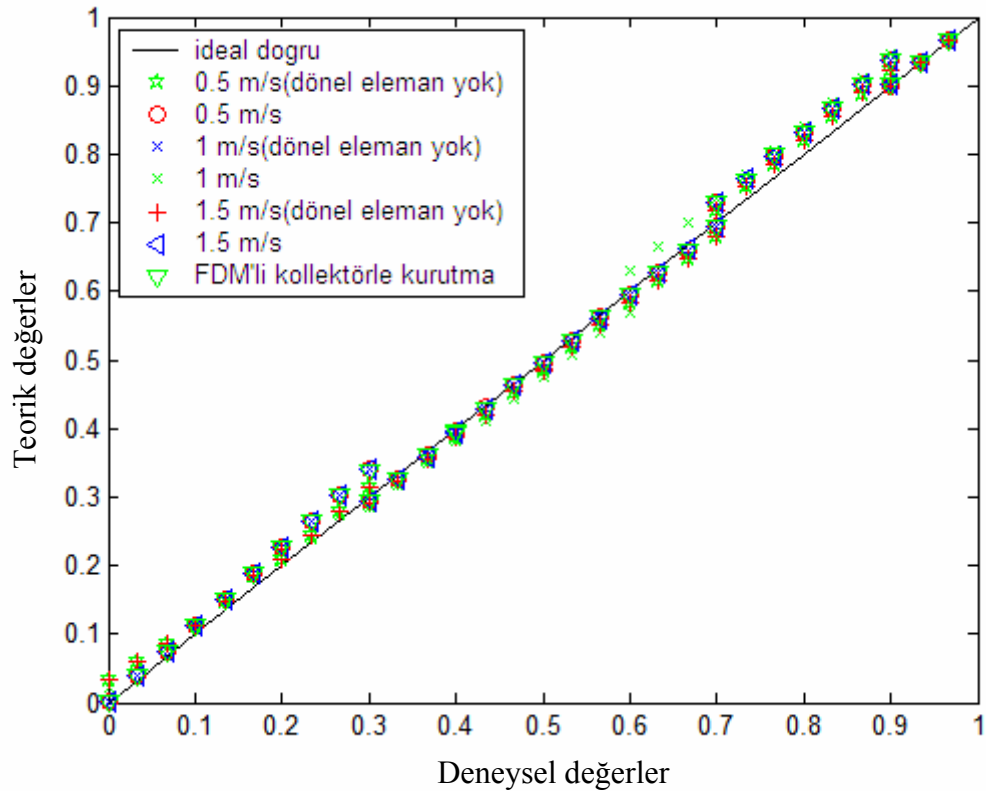
$$a = 1.7429 \cdot \Delta T^{-0.3900} \cdot \dot{m}^{-0.1234} \quad R = 0.98726$$

$$k = -1.6961 \cdot \Delta T^{-0.9407} + \exp(\dot{m}) \quad R = 0.96530$$

$$b = 1.0987 \cdot \Delta T^{-2.4578} - 0.0170 \cdot \dot{m}^{1.5171} \quad R = 0.89897$$

$$n = 0.2195 \cdot \dot{m}^{-0.3655} \cdot \exp\left(\frac{4.1165}{\Delta T}\right) \quad R = 0.95789$$

şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 9.1. Kurutma deneylerinde deneysel ve teorik nem oranı değerleri

9.2. Kuruma Hızı Nem İçeriği Değişimi Eğrilerinin Modellenmesi

Üzüm numunelerinin kurutulmasında kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi $\frac{dM}{dt} = a \cdot M^b$ eşitliğiyle ifade edilmiştir.

Bu model ile yapılan modelleme sonucunda elde edilen veriler Tablo 9.7’de görülmektedir.

$\frac{dM}{dt} = a \cdot M^b$ modeli ile yapılan tahmini standart hatası 0.0000436 ile 0.00643 aralığında, χ^2 değerleri 0.000000253-0.0000538 aralığında değişmektedir. Modelin modelleme yeterliliğini belirten (EF) değeri ise 0.99974-0.99996 arasında değerler almaktadır.

Üzümlerin güneş altında doğal şartlarda kurutulmasında nem içeriği ile kuruma hızı arasındaki değişimin $\frac{dM}{dt} = a \cdot M^b$ eşitliği ile modellenmesiyle yapılan tahmini standart hatası 0.00725, χ^2 değeri 0.000323, (EF) değeri 0.99993 ve korelasyon katsayısı (R) ise 0.969992 değerlerini almaktadır.

Üzüm örnekleri için bu model kullanılarak elde edilen teorik ve deneysel sonuçlardan bulunan kuruma hızı değerleri Şekil 9.2’ de verilmektedir. Bu grafik deneysel ve teorik değerlerin uyum içinde olduğunu göstermektedir.

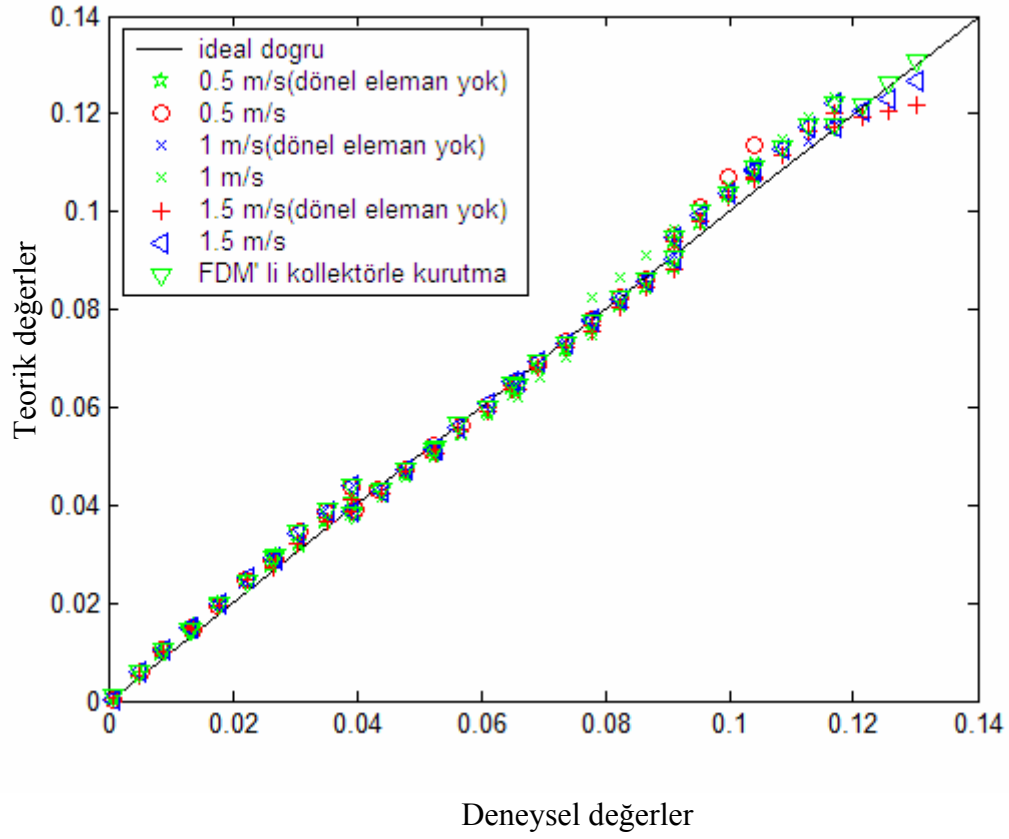
Tablo 9.7. Üzüm için nem içeriği - kuruma hızı değişimini veren model ve istatistiksel değerler

Kurutma havası debisi $\dot{m}$ (m/s)	Kurutucuya Giriş ve çıkış sıcaklık farkı ΔT	a	b	RMSE	χ^2	EF	R
$\frac{dM}{dt} = a \cdot M^b$							
0.5	9	0.03048	0.47923	4.39x10 ⁻⁴	3.55 x10 ⁻⁵	0.99976	0.972538
1	7	0.03947	0.49237	3.57x10 ⁻³	4.27 x10 ⁻⁷	0.99969	0.970732
1.5	5	0.04958	0.48765	6.34x10 ⁻³	8.43 x10 ⁻⁶	0.99985	0.982376
1.5(FDM)	4	0.04023	0.57349	7.34x10 ⁻⁵	7.36 x10 ⁻⁷	0.99983	0.996431
0.5(dönel eleman yok)	7	0.04209	0.58937	5.35x10 ⁻⁴	5.38x10 ⁻⁵	0.99996	0.992178
1(dönel eleman yok)	5	0.05923	0.49583	6.43x10 ⁻³	4.94 x10 ⁻⁶	0.99974	0.980557
1.5(dönel eleman yok)	3	0.05380	0.59383	4.36x10 ⁻⁵	2.53 x10 ⁻⁷	0.99992	0.993558

Üzüm örnekleri için kuruma hızının nem içeriği ile değişimi modelinde bulunan a ve b katsayılarının kurutma havası hızı ve kurutucu giriş ve çıkış sıcaklık farkına bağlı olarak değişimi ve korelasyon katsayısı,

$$a = 0.0367 \cdot \dot{m}^{0.0236} \cdot \exp\left(\frac{1.3203}{\Delta T}\right) \quad R = 0.96753$$

$$b = 1.3367 \cdot \Delta T^{-1.3833} + 0.3798 \cdot \dot{m}^{-0.2670} \quad R = 0.86524$$



Şekil 9.2. Kurutma deneylerinde deneysel ve teorik kuruma hızı değerleri

9.3. Difüzyon Katsayısının Modellenmesi

Üzüm kurutma deneylerinde kurutma havası debisi ve kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklık farkına bağlı olarak difüzyon katsayısının modellenmesi $D = a_1 \cdot \dot{m}^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{a_3}{\Delta T}\right)$ şeklinde Arrhenius fonksiyonu ile modellendi. Buna göre üzüm numunelerinin difüzyon katsayısı modeli ve korelasyon katsayısı aşağıdaki model ile ifade edildi.

$$D = 0.0010 \cdot \dot{m}^{1.28000} \cdot \exp\left(\frac{-9.02614}{\Delta T}\right) \quad R = 0.979734$$

Üzüm örneklerinin doğal ortamda güneş altında kurutulması için yapılan deneylerde difüzyon katsayısı $1.47 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.

Üzüm örnekleri için (5.12) ve (5.13) eşitlikleri yardımıyla bulunan difüzyon katsayısının deneysel ve teorik değerleri Tablo 9.8'de verilmektedir. Tablodaki değerlerden deneysel ve teorik değerlerin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 9.8. Üzüm örnekleri için farklı kurutma şartlarında difüzyon katsayısındaki değişim

Kurutucuya Giriş ve Çıkış Sıcaklık Farkı $\Delta T(^{\circ}C)$	Kurutma Havası Debisi ($\dot{m}$)	Difüzyon katsayısı D (m^2/s)	
		Deneysel	Teorik
9	0.5	8.76×10^{-10}	8.45×10^{-10}
7	1	1.19×10^{-9}	1.22×10^{-9}
5	1.5	1.27×10^{-9}	1.29×10^{-9}
4	1.5(FDM)	1.35×10^{-9}	1.43×10^{-9}
7	0.5(dönel eleman yok)	5.47×10^{-10}	5.26×10^{-10}
5	1(dönel eleman yok)	9.28×10^{-10}	9.21×10^{-10}
3	1.5(dönel eleman yok)	1.25×10^{-9}	1.26×10^{-9}

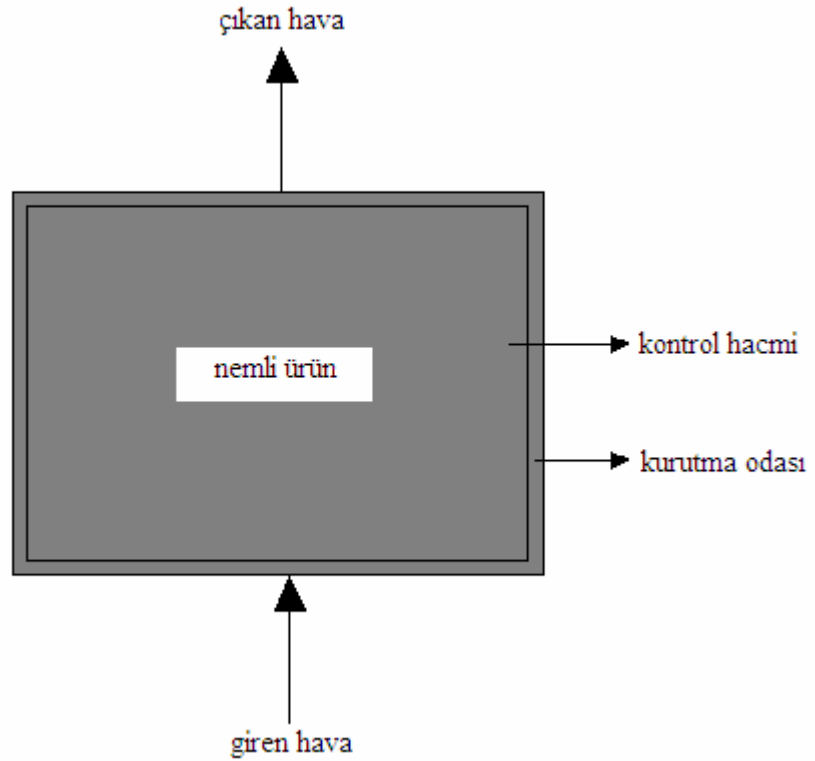
10. ENERJİ ve EKSERJİ ANALİZİ

Tez çalışmasının bu bölümünde güneş enerjisi destekli dönel akışlı kurutucu kullanılarak çekirdekli üzüm kurutma işleminde enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Isıl sistem analizlerinin geleneksel metodları Termodinamiğin Birinci Kanunu temeline dayanmaktadır. Bu metodlar sistem ve çevresi arasında ısı transferini tanımlamak için sistemdeki enerji dengesi kavramını kullanır.

Kurutma işlemi ısı ve kütle transferini içeren ısıtma ve nem alma işlemidir. İşlem Sürekli Akışlı Sürekli Açık sistem (SASA) olarak ele alınabilir. Analiz sırasında enerji ve kütlenin kararlı akış korunumu göz önüne alınmaktadır. Sürekli Akışlı Sürekli Açık sistem için yapılan kabuller,

- Seçilen kontrol hacmi içinde, yaygın hiçbir özellik değişmez. Böylece kontrol hacminin kütlesi, hacmi (sınır işi sıfırdır) ve toplam enerjisi sabit kalır.
- Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir özellik zamanla değişmez. Yani kontrol hacminin herhangi bir noktasında akışkan özellikleri sabittir.
- Kontrol hacminin çevresiyle ısı ve iş alışverişi zamanla değişmez. Yani sistemin çevresiyle birim zamanda yaptığı ısı ve iş alış verışı sabittir.

şeklindedir[95].



Şekil 10.1. Kütle korunumu için kullanılan kontrol hacmi

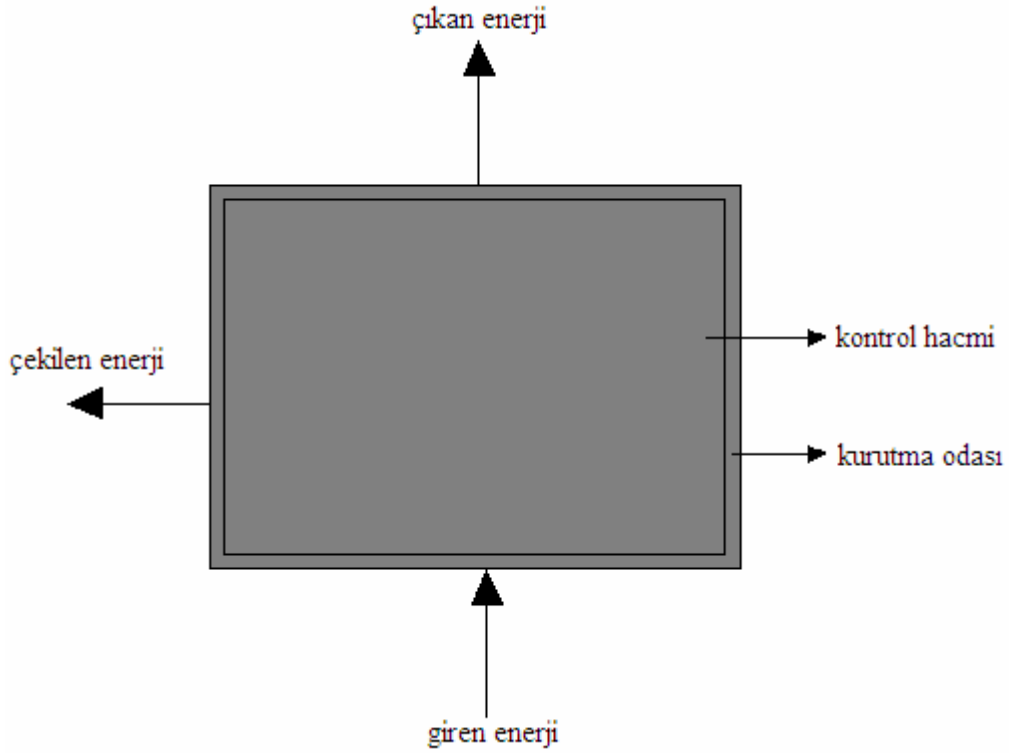
Analiz için kütlenin kararlı akış korunumu Şekil 10.1’ deki kontrol hacmi dikkate alınarak;
Hava için süreklilik denklemi;

$$(\dot{m}_{khg}) = (\dot{m}_{kh\zeta}) = (\dot{m}_{kh}) \quad (10.1)$$

Nem için süreklilik denklemi;

$$w_g \dot{m}_{khg} + \dot{m}_w = w_\zeta \dot{m}_{kh\zeta} \quad (10.2)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 10.2. Enerji korunumu için kullanılan kontrol hacmi

Şekil 10.2’ deki kontrol hacmi dikkate alınarak enerji korunum denklemleri ise aşağıdaki şekilde yazılabilir.

Kurutma odasına zamana bağlı olarak giren enerji miktarı,

$$Q_{kg} = \dot{m}_{khg} \cdot c_{p_{khg}} \cdot (T_{kg} - T_o) \text{ (W)} \quad (10.3)$$

Kurutma odasından zamana bağılı olarak çıkan enerji miktarı,

$$Q_{kç} = \dot{m}_{khç} \cdot c_{p_{khç}} \cdot (T_{kç} - T_o) \text{ (W)} \quad (10.4)$$

Kurutucu tarafından zamana bağılı olarak çekilen enerji miktarı,

$$Q_{kçek} = \dot{m}_{kh} \cdot c_{p_{kh}} \cdot (T_{kç} - T_{kg}) \text{ (W)} \quad (10.5)$$

$c_{p_{khg}} = c_{p_{khç}} = c_{p_{kh}}$ olduğu kabul edilerek kullanılan kurutucunun enerji kullanım oranı (EKO), enerji korunum denklemleri yardımıyla aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

$$EKO = \frac{Q_{kg} - Q_{kç}}{Q_{kg}} \quad (10.6)$$

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin bir şekilden başka bir şekle dönüştürülebileceğini ve bir sistemden diğer bir sisteme transfer edilebileceğini fakat bu dönüşümler ve transferler sırasında toplamının sabit kalacağını ifade etmektedir. Termodinamiğin ikinci yasası ise ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini, çevrenin iç enerjisinden faydalanılarak iş elde edilemeyeceğini belirterek enerji dönüşümlerini sınırlamakta ve ayrıca bütün doğal olayların tersinmez olduğuna dikkati çekerek enerjinin bir şekilden diğer bir şekle her dönüşümünde veya bir sistemden diğer bir sisteme her transferinde insanların faydalanabilecekleri kısmının azalacağını ve bu nedenle de sürekli olarak değer kaybedeceğini ifade etmektedir.

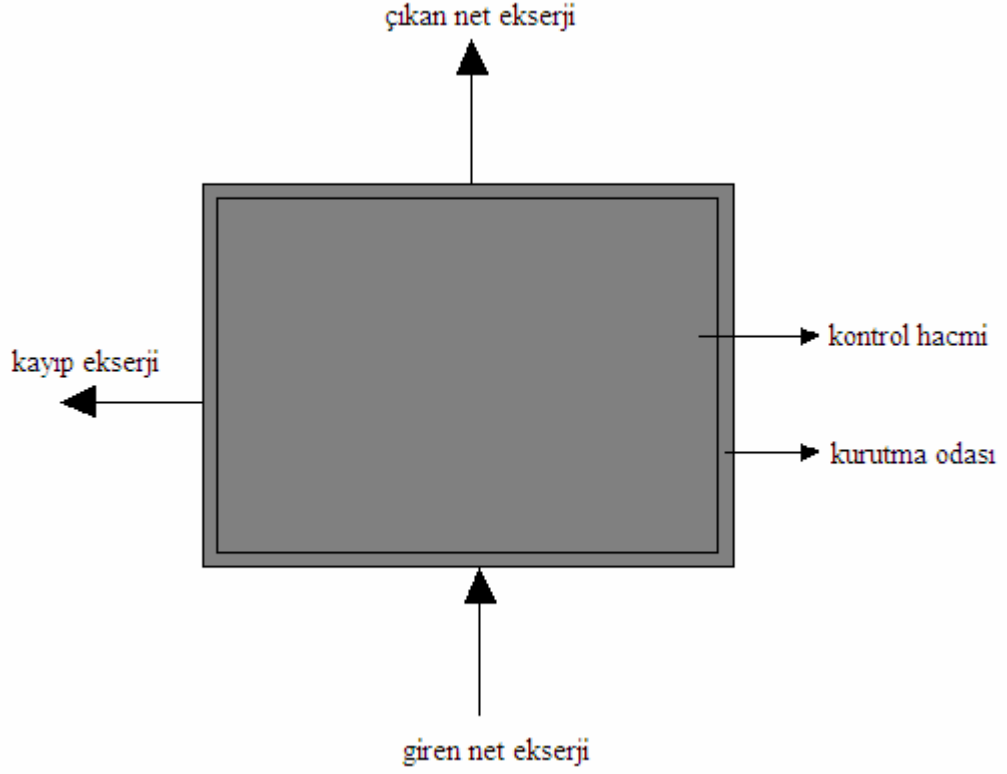
Enerjinin değeri diğer enerji türlerine, bu arada faydalı işe dönüştürülebilme özelliği ile ölçülür. Verilmiş bir ortamda bütün diğer enerji türlerine dönüştürülebilen enerjiye kullanılabilir enerji veya ekserji adı verilir. Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi olanak dışı olan enerji ise kullanılamaz enerji(bağılı enerji) veya anerji adı verilir. Diğer enerji türlerine sınırlı olarak dönüştürülebilen enerjinin kullanılabilir enerji(ekserji) ve kullanılamaz enerji(anerji) toplamından meydana geldiği kolaylıkla görülebilir. Dolayısıyla bütün enerji türleri için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

Buradan da görüldüğü gibi bütün süreçlerde enerjinin asıl değerli kısmını oluşturan ekserji tüketilmekte ve değeri olmayan anerjiye dönüşmektedir. Enerjinin kullanılabilir kısmından olabildiği kadar çok faydalanabilmek için süreçlerdeki tersinmezliklerin giderilmesine çalışmak ve bunları tersinir süreçlere olabildiği kadar yaklaştırmak gerekir. Bunun içinde tersinmezliklerin saptanmasına ve bunların kullanılabilir enerji kaybına ne ölçüde katkıda bulunduklarının belirlenmesine gereksinim vardır[96].

Şekil 10.3’ de ekserji analizi için kullanılan kontrol hacmi görülmektedir. Çok büyük ve hareketsiz bir ortam olarak ele alınacak olan çevrenin bütün madde ve enerji alışverişine rağmen T_o

sıcaklığı ile P_0 basıncının ve kimyasal yapısının değişmediği varsayılacaktır. Atmosfer içerisinde denge halinde bulunan bir sistemden iş elde etmek olanağı yoktur. Sistemin bu haline ölü hal veya çevre hali adı verilir[96].



Şekil 10.3. Ekserji analizi için kullanılan kontrol hacmi

Kurutucunun kontrol hacmindeki ekserji dengesi;

$$\sum Ex_g = \sum Ex_{\dot{\epsilon}} + \sum Ex_k \quad (10.7)$$

Şeklinde yazılmıştır.

Kontrol hacmine giren net ekserji,

$$Ex_{kg} = \dot{m}_{khg} [(h_{khg} - h_o) - T_o (s_{khg} - s_o)] \quad (10.8)$$

Kontrol hacminden çıkan net ekserji,

$$Ex_{k\dot{\epsilon}} = \dot{m}_{kh\dot{\epsilon}} [(h_{kh\dot{\epsilon}} - h_o) - T_o (s_{kh\dot{\epsilon}} - s_o)] \quad (10.9)$$

T sıcaklığından T_o sıcaklığına özgül entropi değişimi,

$$\Delta s = \bar{C}_p \ln \frac{T_o}{T} \quad (10.10)$$

şeklinde yazılır.

Entalpi değişimi ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta h = \bar{C}_p (T - T_o) \quad (10.11)$$

(10.10) ve (10.11) ifadeleri kullanılarak kurutucuya giren net ekserji ve kurutucudan çıkan net ekserji,

$$Ex_{kg} = \dot{m}_{khg} \bar{C}_p \left[(T_{khg} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{khg}}{T_o} \right] \quad (10.12)$$

$$Ex_{kç} = \dot{m}_{khç} \bar{C}_p \left[(T_{khç} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{khç}}{T_o} \right] \quad (10.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Kullanılan kurutucu için ekserjetik verim ise,

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_g - Ex_k}{Ex_g} = 1 - \frac{Ex_k}{Ex_g} \quad (10.14)$$

formülü ile hesaplanır.

Tablo 10.1-10.3’de yedi farklı durumda gerçekleştirilen kurutma deneylerinde enerji kullanım oranı (EKO) ve ekserjetik verim değerleri kurutma süresi boyunca saatlik zaman dilimleri halinde verilmiştir. Tablolardan EKO ortalama değeri kurutma deneylerinin yapıldığı m=0.5 m/s, m=0.5 m/s(dönel eleman yok), m=1 m/s, m=1 m/s(dönel eleman yok), m=1.5 m/s, m=1.5 m/s(dönel eleman yok) ve m=1.5 m/s(FDM’ li kurutma) durumları için sırasıyla %43, %40, %38, %34, %32, %28 ve %32 değerlerini ve ekserjetik verim değerleri %23, %38, %37, %39, %54, %77 ve %56 değerlerini aldığı görülmektedir.

Tablolardan görüldüğü gibi kurutma havası hızı arttıkça enerji kullanım oranı değerleri azalmakta ve ekserjetik verim değerleri artmaktadır. Aynı zamanda dönel eleman olmadığı durumda yapılan deneylerde dönel eleman olduğu durumdakine göre enerji kullanım oranı değerleri düşük ve ekserjetik verim değerleri yüksek çıkmıştır. Kurutma havası hızının artmasıyla kurutma odası giriş ve

çıkış sıcaklıkları arasındaki fark azalmakta ve buna bağlı olarak da EKO değerleri düşmektedir. Dönel eleman kullanılmadığı durumda ise yine kurutma odası giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark dönel eleman olduğu durumdakine göre daha düşük olduğundan EKO değeri daha düşük tespit edilmiştir.

Tablolardan enerji kullanım oranı değerleriyle ekserjetik verim değerlerinin birbiriyle ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Ekserjetik verim değerinin artmasıyla enerji kullanım oranı azalmakta, ekserjetik verimin azalmasıyla enerji kullanım oranı artmaktadır. Kurutma sistemlerinde EKO değerinin yüksek η_{ex} değerinin düşük olması istenmektedir. EKO değerinin düşük olması ürünün yeteri kadar ısı çekmediği ve iyi bir kurutmanın gerçekleşmediği anlamına gelmektedir.

Literatürde kurutma sistemlerinin EKO ve ekserjetik verim değerleri ile ilgili yapılmış çalışmalarda bulunan değerler ise şöyledir. Akpınar [48], siklon tipi bir kurutucunun EKO değerinin %24, ekserjetik verim değerinin ise %60 olduğu tespit etmiştir. Akbulut[97], havalı güneş kolektörlü bir kurutucuda EKO ortalama değerinin kurutma deneylerinin yapıldığı 0.0015, 0.0078, 0.014, 0.02, 0.026, 0.033 ve 0.036 kg/sn kurutma havası debileri için sırasıyla %60.23, %58.23, %53.49, %30.19, %18.61, %17.3 ve % 10.44 değerlerini aldığını ve ekserjetik verim değerlerinin ortalama değerlerinin 0.0015 kg/sn, 0.0078 kg/sn, 0.014 kg/sn, 0.02 kg/sn, 0.026 kg/sn, 0.033 kg/sn ve 0.036 kg/sn kurutma havası debileri için sırasıyla %58.2, %39.2, %35.5, %56.4, %81, %73.3 ve %66.4 olduğunu tespit etmişlerdir. Midilli ve Küçük [94], havalı güneş kolektörlü bir kurutucuda ikinci rafta %0 - %24.9, onbeşinci rafta %0 - %34.8 ve kurutucunun EKO değerinin %59.7 olduğunu tespit etmişlerdir.

Tablo 10.1. Üzüm kurutma deneylerinde kurutucunun EKO ve ekserjetik verim değerleri

m=0.5 m/s			m=0.5 m/s(dönel eleman yok)		
Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)	Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)
0	37	25	0	36	39
2	43	23	2	43	38
4	49	20	4	46	37
6	44	23	6	43	38
8	42	24	8	42	38
24	39	25	24	35	39
26	43	24	26	40	37
28	48	21	28	46	35
30	44	22	30	42	37
32	43	23	32	41	38
48	38	24	48	36	39
50	40	23	50	38	37
52	47	21	52	45	36
54	45	23	54	43	37
56	44	24	56	42	38
72	39	25	72	38	39
74	45	23	74	43	37
76	47	22	76	44	36
78	45	23	78	43	37
80	43	24	80	41	39
96	44	23	96	40	39
98	42	24	98	40	39
100	45	22	100	42	38
102	44	23	102	40	39
104	43	24	104	39	39
120	40	25	120	37	40
122	42	24	122	40	39
124	44	23	124	41	39
126	40	24	126	39	40
128	39	25	128	37	40
144	38	25	144	36	41
146	37	26	146	34	41
148	38	23	148	35	39
150	37	24	150	34	40
152	37	24	152	35	39
168	36	25			
171	36	25			

Tablo 10.2. Üzüm kurutma deneylerinde kurutucunun EKO ve ekserjetik verim değerleri

m=1 m/s			m=1 m/s(dönel eleman yok)		
Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)	Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)
0	35	39	0	33	58
2	43	37	2	36	57
4	45	38	4	38	55
6	43	37	6	37	56
8	41	38	8	37	56
24	35	39	24	34	57
26	40	37	26	35	56
28	46	35	28	37	54
30	41	37	30	34	55
32	41	38	32	33	56
48	36	39	48	36	55
50	38	37	50	36	55
52	44	35	52	37	54
54	43	38	54	37	53
56	42	39	56	35	54
72	37	39	72	34	55
74	43	37	74	34	55
76	44	35	76	33	57
78	42	38	78	31	58
80	41	39	80	30	59
96	40	39	96	33	57
98	39	40	98	32	58
100	42	38	100	28	59
102	39	40	102	27	60
104	39	40	104	27	59
120	37	41			
122	37	40			
123	36	41			

Tablo 10.3. Üzüm kurutma deneylerinde kurutucunun EKO ve ekserjetik verim değerleri

m=1.5 m/s			m=1.5 m/s(dönel eleman yok)			m=1.5 m/s(FM'li kurutma)		
Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)	Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)	Zaman (h)	EKO(%)	η_{ex} (%)
0	34	59	0	27	78	0	34	59
2	36	57	2	33	75	2	35	57
4	37	55	4	36	73	4	38	55
6	37	55	6	33	75	6	37	55
8	36	56	8	35	73	8	35	56
24	34	57	24	34	74	10	36	55
26	35	55	26	34	75	12	37	53
28	37	54	28	36	74	24	34	58
30	32	55	30	35	75	26	35	55
32	33	54	32	33	76	28	37	54
48	36	53	48	32	78	30	32	55
50	36	53	50	34	77	32	33	54
52	37	52	52	35	76	34	35	53
54	36	55	54	34	77	36	36	52
56	35	56	56	33	78	48	37	51
72	34	57	72	33	78	50	37	51
74	32	58	74	29	79	52	37	50
76	33	57	76	26	80	54	33	53
78	31	58	78	23	82	56	32	53
80	29	59	80	21	82			
96	32	57						
99	31	58						

11. SONUÇ ve ÖNERİLER

Doğal koşullarda, açık havada yapılan geleneksel kurutma yöntemleri belirli oranlarda ürün kayıplarına ve kalite düşmesine neden olmaktadır ve hijyenik açıdan da bazı sakıncaları vardır. Kontrollü koşullar altında yapılacak kurutma uygulamaları bu sakıncaları büyük oranda ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca uygun bir kurutucunun tasarımı ile ürünün kurutucuda ne kadar sürede istenen nem oranına geleceğinin bilinmesinin kurutma açısından büyük önemi vardır.

Bu nedenle bu çalışmada tarımsal ürünleri kurutmak için geliştirilen havalı güneş kolektörlü dönel akışlı kurutucu sisteminin kurutma işlemleri için kullanılabilirliği araştırıldı. Havalı güneş kolektörlerinin kullanıldığı kurutucu ünitesinde Elazığ yöresinde yetişen çekirdekli üzümün kurutma deneyleri yapıldı.

Kurutma deneylerine başlamadan önce kurutma deneylerinde kullanılmak üzere geliştirilen genişletilmiş yüzeyli kolektör ile birlikte klasik düz yüzeyli havalı güneş kolektörü aynı anda çalıştırılarak havalı kolektör ve genişletilmiş yüzeyli havalı kolektörlerde 0.5 m/s, 1m/s ve 1.5 m/s olmak üzere üç farklı hava debisinde kolektör verimleri hesaplanmıştır. Ayrıca aynı hızlarda FDM' li kolektörün de verimliliği hesaplanmıştır. 0.5 m/s hava hızında düz kolektör için verim öğlen saatlerinde maksimum % 28, genişletilmiş yüzeyli kolektör için ise %39 değerine ulaşmıştır. Aynı hız için FDM' li kolektör de ise maksimum % 37 verim değerine ulaşmıştır. 1 m/s hız için düz kolektör verimi % 30, genişletilmiş yüzeyli kolektör verimi % 43 ve FDM'li kolektör için % 40 maksimum kolektör verimleri tespit edilmiştir. Verim değerleri 1.5 m/s hız içinde düz kolektörde % 32, genişletilmiş yüzeyli kolektörde % 48 ve FDM' li kolektör için % 43 maksimum değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Geliştirilen havalı güneş kolektörlü dönel akışlı kurutucuda kurumanın üniform bir şekilde gerçekleştiği ve dönel akış ortamında kurutulan ürünlerde daha kısa sürede ve daha düşük nem değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. 3 farklı hava hızında yapılan deneylerde kurutma havası hızının artmasıyla kuruma süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kurutucu içerisine yerleştirilen hava yönlendirme elemanları ve kurutma odası girişine dönel eleman yerleştirilerek kurutma deneyleri yapılmış ve açık havada doğal şartlarda yapılan kurutma deneyleri ile kuruma süresi bakımından karşılaştırılmıştır. Buna göre doğal şartlarda 200 saat olan kuruma süresi 0.5 m/s hava hızına sahip kurutma denemelerinde 152 saat, dönel eleman olmadan 171 saat, 1 m/s hava hızı için 104 saat, dönel eleman olmadan 123 saat, 1.5 m/s hava hızı için 80 saat, dönel eleman olmadan 99 saat ve FDM' li kolektör kullanılması durumunda kuruma zamanı 56 saate düşmüştür. Kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklık farkının artmasıyla kuruma süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Kurutma süresinde hava sıcaklığından ziyade, kurutma havası hızının daha etkili olduğu ve tüm deneylerde kurumanın azalan kuruma periyodunda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Nem oranı eğrileri literatürde mevcut bulunan altı farklı nem oranı denklemi ile karşılaştırılmış ve en uygun sonucu veren model deney sonuçlarını ifade etmek için kullanılmıştır. Literatürde mevcut modeller deney sonuçlarına göre elde edilen nem oranı değerleri için incelenirken korelasyon katsayısının (R) en yüksek olduğu ve RMSE ve χ^2 değerlerinin en düşük olduğu model

tespit edilmiştir. Çekirdekli üzüm kurutulmasında her bir kurutma hali için en uygun modeli Midilli modeli vermiştir.

Üzüm numunelerinin kurutulmasında kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi $\frac{dM}{dt} = a \cdot M^b$ eşitliğiyle ifade edilmiştir. Tahmini standart hatası ve khi-kare değerlerinin sıfıra yakın, korelasyon katsayısı ve modelin modelleme yeterliliğinin bire yakın olması modelin uygun bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Difüzyon katsayıları 0.5 m/s hava hızına sahip kurutma denemelerinde 8.76×10^{-10} m²/s, dönel eleman olmadan 5.47×10^{-10} m²/s, 1 m/s hava hızı için 1.19×10^{-9} m²/s, dönel eleman olmadan 9.28×10^{-10} m²/s, 1.5 m/s hava hızı için 1.27×10^{-9} m²/s, dönel eleman olmadan 1.25×10^{-9} m²/s ve FDM' li kolektör kullanılması durumunda 1.35×10^{-9} m²/s olarak tespit edilmiştir. Böylece kurutma havası hızının artmasıyla difüzyon katsayısının arttığı görülmüştür. Üzüm kurutma deneylerinde kurutma havası hızı ve kurutucuya giriş ve çıkış sıcaklık farkına bağlı olarak difüzyon katsayısının modellenmesi

$D = a_1 \cdot \dot{m}^{a_2} \cdot \exp\left(\frac{a_3}{\Delta T}\right)$ şeklinde Arrhenius fonksiyonu ile yapılmıştır. Modellemede korelasyon katsayısı $R = 0.979734$ gibi çok iyi bir değer almıştır.

Enerji kullanım oranı(EKO) ortalama değeri kurutma deneylerinin yapıldığı $m=0.5$ m/s, $m=0.5$ m/s(dönel eleman yok), $m=1$ m/s, $m=1$ m/s(dönel eleman yok), $m=1.5$ m/s, $m=1.5$ m/s(dönel eleman yok) ve $m=1.5$ m/s(FDM' li kurutma) durumları için sırasıyla %43, %40, %38, %34, %32, %28 ve % 32 olarak hesaplandı ve ekserjetik verim değerleri %23, %38, %38, %39, %54, %77 ve % 56 olarak belirlenmiştir. Kurutucu enerji ve ekserji analizleri yapılırken enerji kullanım oranının (EKO) yüksek olan dolayısıyla ekserjetik verim değerinin düşük olduğu zaman aralıklarında daha iyi kurutma gerçekleştiği görülmüştür.

Üzümler üzerinde bulunan mum tabakası uzaklaştırılarak kurumayı hızlandırmak için çalışmada çekirdekli üzümler kurutulmadan önce ticari potasa diye isimlendirilen K_2CO_3 un kullanıldığı bandırma çözeltisine daldırılmıştır. Buna alternatif olarak düşünülen farklı maddelerde bandırma çözeltisinde kullanılıp bu çözeltilerin kuruma hızına etkisinin araştırılması mümkündür.

Aynı zamanda çekirdekli üzüm kurutmak için imal edilen havalı güneş kolektörlü dönel akışlı kurutucu diğer meyve ve sebzelerin kurutulması içinde kullanılabilir. Ayrıca kurutucunun kapasitesi artırılarak daha fazla ürün kurutulması sağlanabilir. İmal edilen dönel akışlı kurutma sisteminde kullanılan dönel elemanın kanat sayısı ve çapı, hava yönlendirme elemanları sayısı artırılabilir veya bu konuda bir optimizasyona gidilebilir. Havalı güneş kolektörü ile birlikte kullanılan FDM'li kolektör de ise değişik geometrilerde ısı transfer artırıcı elemanlar yerleştirilerek depolanan enerjiden daha fazla yararlanma yollarına gidilebilir.

Besin olarak önemli bir ürün olan çekirdekli kuru üzümün daha ileri tekniklerde kurutulması, onun kalitesini yükseltecek ve alıcı ülkelerde uygulanmaya konulmuş bulunan standartlara

uygunluğunu temin edecektir. Çekirdekli kuru üzümün yararları ve ekonomiye katkısı dikkate alınarak çekirdekli kuru üzüm ile ilgili çalışmaların yoğunlaşması gerekmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı yerde tamamladı. 1994 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1998 yılında lisans diploması aldı. 1998-2000 yılları arasında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Termodinamik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansını yaptı. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Termodinamik Ana Bilim Dalı'nda doktora çalışmasına başladı. Halen Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Sadeghian, E., 1992, Bandırılmış çekirdeksiz üzümün farklı kuruma evrelerindeki difüzyon katsayısının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 53s.
2. Yaşartekin, Y., 1991, Kabinet tipi, güneşi dikey ekseninde belirli aralıklarla izleyen, güneş enerjili kurutucunun tasarımı ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında denenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, 153s.
3. Anonymous, 1996, Ege İhracatçı Birlikleri, Ege Kuru Meyve ve Mamülleri İhracatçıları Birliği 1995/1996 çalışma raporu , İzmir, 60s.
4. Ünal, M.S., 2000, Malatya ve Elazığ illeri bağcılığı ile Malatya ilinde yetiştirilen üzüm çeşitlerinin ampelografik özelliklerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 105s.
5. Garba, M.M., Atiku, A.T., Sambo, A.S., 1990, Comparative studies of some passive solar dryers, Energy and the Environment, No.2, 927-931.
6. Ayvaz, H., 1992, Güneş enerjisiyle tarımsal ürünlerin kurutulmasında kullanılacak endüstriyel kurutucu tasarımı, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, 220s.
7. Sarkar, M.A.R., Saleh, T., 2002, Performance study of a pv operated forced convection solar energy dryer, 8th International Symposium for Renewable Energy Education (Aug. 4-8, 2002), University of Florida, Orlando, Florida, USA, 352-367.
8. Othman, M.Y.H., Sopian, K., Yatim, B., Daud, W.R.W., 2006, Development of advanced solar assisted drying systems, Renewable Energy, 31, 703-709.
9. Karim, A., Hawlader, M. N. A., 2006, Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors, Energy, vol. 31, no.4, 452-470.
10. Fadhel, A., Kooli, S., Farhat, A., Bellghith, A., 2005, Study of the solar drying of grapes by three different processes, Desalination, 185, 535-541.
11. 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.
12. Toğrul, H., 2005, Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices, Journal of Food Engineering, 71, 311-323.
13. Toğrul, İ.T., Pehlivan, D., 2004, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process, Journal of Food Engineering, 65 , 413–425.
14. Raisul I.Md. Mujumbar, A.S., 2003, Role of product shrinkage in drying rate predictions using a liquid diffusion model, Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 3, 391-400.
15. Vagenas, G.K., Marinos-Kouris, D., 1991, Finite element simulation of drying of agricultural products with volumetric changes, Appl. Math. Modelling, 15, 475-482.

16. Gallali, Y.M., Abujnah, Y.S., Bannani, F.K., 2000, Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying, *Renewable Energy*, 19, 203-212.
17. Garg, H.P., Kumar, R., 2000, studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector, *Applied Thermal Engineering*, 20, 115-131.
18. 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.
19. Doymaz, İ., 2005, Drying kinetics of black grapes treated with different solutions, *Journal of Food Engineering*, 71, 403-407.
20. Torres-Reyes, E., Navarrate-Gonzalez, J.J., Ibarra-Salazar, B.A., 2003, Thermodynamic method for designing dryers operated by flat-plate solar collectors, *Renewable Energy*, 26, 649-660.
21. Matteo, M.D., Cinquanta, L., Galiero, L., Crescitelli, S., 2004, Effect of a novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes, *Journal of Food Engineering*, 46, 83-89.
22. Kaymak, F., Gedik, A., 2004, Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes, *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 37, 429-438.
23. Mathioulakis, E., Karathanos, V. T., Belessiotis, V. G., 1998, Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits, *Journal of Food Engineering*, 36, 183-200.
24. Bennamoun, L., Belhamri, A., 2006, Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes, *Journal of Food Engineering*, 76, 179-187.
25. Mabrouk, S.B., Khiari, B., Sassi, M., 2006, Modelling of heat and mass transfer in a tunnel dryer, *Applied Thermal Engineering*, 26, 2110-2118.
26. Pahlavanzadeh, H., A. Basiri M. Zarrabi, 2001, Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying, *Drying Technology*, 19, 217-226.
27. Mettawee, E.S., Assassa, G.M.R., 2006, Experimental study of a compact PCM solar collector, *Energy*, 31, 2958-2968.
28. Karathanos, V.T., Belessiotis, V.G., 1999, Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits, *J. agric. Engng Res.*, 74, 355-361.
29. Kadam, D.M., Samuel, D.V.K., 2006, Convective flat-plate solar heat collector for cauliflower drying, *biosystems engineering*, 93, 189-198.
30. Kaya, A., Aydın, O., Dincer, İ., 2006, Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2, 351-361.
31. Olgun, H., Rzaev, P., 2000, Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması, *Tr J Engin. Environ. Sci.*, 24, 1-14.
32. İsmail, O., 2005, Investigation the effect of potassium carbonate solutions on drying of sultana grapes, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 1, 108-114.
33. Sarı, A., Kaygusuz, K., 2002, Thermal performance of palmitic acid as a phase change energy storage material, *Energy Conversion and Management*, 43, 863-876.

34. Öztürk, H.,2005, Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating, *Energy Conversion and Management* ,46,1523–1542.
35. Baran, G., Sarı, A.,2003, Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system, *Energy Conversion and Management*, 44,3227–3246.
36. Jain, D., Jain, R.K.,2004, Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application, *Journal of Food Engineering*, 65, 497–509.
37. Köylü, M.E., 1997, Yuvarlak çekirdeksiz üzüm çeşidinin kurutulması sırasında kuruma hızı ve kuru üzüm kalitesine etki eden etmenler ile farklı sergilerde kurutulmuş olan üzümlerin mikrobiyolojik yüklerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 63s.
38. Grncarevic, M., Radler, F., 1971, A Review of the surface lipids of grapes and their importance drying process, *Amer. J.OF Enology and Viticulture*, 2, 80-86.
39. Karagülle, N., 1975, Çekirdeksiz kuru üzüm üretiminde kontrollü şartlar altında kurutma ile güneşte kurutma yöntemlerinin kuru üzüm kalitesine etkisi üzerinde araştırmalar, E.Ü. Mühendislik Bilimleri Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 62s.
40. Özel,T., 1979, Çekirdeksiz Üzüm kurutulmasında raf tipi sergilerin kullanılması üzerine araştırmalar, Bahçe Kültürleri Araştırma ve Eğitim Merkezi, Erdemli-İçel, 57s.
41. Doymaz, İ., 1998, Üzüm ve Kahramanmaraş biberinin kuruma karakteristiklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 110s.
42. Saito, A., Okawa, S., Shintani, T., Iwamoto, R., 2001, On the heat removal characteristics and the analytical model of a thermal energy storage capsule using gelled Glauber's salt as the PCM, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 4693-4701.
43. Ayensu, A., Bondzie, V.A., 1986, Solar drying with convective self-flow and energy storage, *Solar&Wind Technology*, 3, 273-279.
44. El-Kashef, H., Hassan, G.E., 1999, Thermo-optical properties of a solar energy storage material, *Optics&Laser Technology*, 31, 431-435.
45. Sarı, A., 2003, Thermal characteristics of a eutectic mixture of myristic and palmitic acids as phase change material for heating applications, *Applied Thermal Engineering*, 23, 1005-1017.
46. Rabin, Y., Bar-niv, I., Korin, E., Mıkıcı, B., 1995, Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material, *Solar Energy*, 6, 435-444.
47. Kaygusuz, K., 1992, Karadeniz Bölgesi'ndeki konutların güneş destekli ısı pompaları yardımı ile ısıtılabilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon,127s.
48. Akpınar, K.E., 2002, Tarımsal ürünler için siklon tipi bir kurutucunun geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 253 s.
49. Mazman, M., 2000, Güneş enerjisinin faz değiştiren organik kimyasallarda gizli ısı şeklinde depolanması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 88s.

50. Sarsılmaz, C., 1998, Güneş enerjisi destekli kayısı kurutma sistemi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 164s.
51. Akgün, M., 1994, Kalsiyum Klorür Hekzahidratın silindirik depolayıcıda ısı kapasitesinin deneysel olarak incelenmesi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 60s.
52. Akarsu, F., 2002, Faz değiştiren malzemeler kullanılarak güneş enerjisinin depolanması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 64s.
53. Düzer, İ., 2003, Güneş enerjisi ile kurutma, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Gebze, 84s.
54. 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.
55. Ferguson, W.E., Bailey, P.H., 1979, Solar air heater for near ambient crop drying: description, test methods and 1977 results. The British Society for Res Agric Engng, Scottish Inst Agric Engng Departmental Note, 275.
56. Close, D.J., Yusoff, M.B., 1978, The effects of air leaks on solar air heater behaviour, Solar Energy, 20, 459-463.
57. Ezeike, G.O.I., 1986, Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system, Energy in Agric, 5, 1-20.
58. Henry, Z.A., Bledsoe, B.L., Eller, D.D., 1977, Drying of large hay packages with solar heated air, ASAE paper, 77-3001
59. TS-3680, 1989, Güneş Enerjisi toplayıcıları düz, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
60. Bıçakçı, M., 1989, Doğu Karadeniz Bölgesinde Havalı Güneş Kollektörü ile Prototip Fındık Kurutma Tesisatı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 81s.
61. Akyurt, M., 1971, Güneşli Kurutma, TÜBİTAK, TOAG-97 Projesi. ODTÜ, Ankara.
62. 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.
63. Yağcıoğlu, A., 1999, Tarım ürünlerini kurutma tekniği, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 536, İzmir.
64. ASAE, 1983, Moisture measurement-peants. ASAE Standart of ASAE S.410.1.Agr. Eng. Yearbook of Standarts, 329-331.
65. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C. W., 1974, Drying cereal grains. The AVI publishing company, Westport, Connecticut.
66. Hall, C. W., P.E., 1980, Drying and storage of agricultural crops. The AVI publishing company, Westport, Connecticut.
67. Crank, J., 1975, The mathematics of diffusion. Clarendon press, Oxford.
68. Gürses, Ö.L., 1986, Gıda işletme mühendisliği-II, A.Ü. Ziraat Fakültesi yayınlar, No:963, Ankara.

69. Demirtaş, C., 1996, Fındık kurutma şartlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 133s.
70. Treybal, R.E., 1993, Mass transfer Operations, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
71. Devahastin, S., MMujumdar's practical guide to industrial drying, Exerges Corporation, Montreal.
72. Cemeroğlu, B., Acar, J., 1987, Meyve ve sebze işletme teknolojisi, Gıda Teknolojisi Dergisi.
73. Güngör, A., Özbalt, N., 1993, Güneş enerjisinin depolanması, Güneş Enerjisi Enstitüsü Dergisi, 1, 61-70.
74. Kandari, A.M., 1990, Thermal Stratification in hot storage tanks, Applied Energy, 35, 299-315.
75. Abhat, A., 1983, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, Solar Energy, 30, 4, 313-332.
76. Kılıç, A., Öztürk, A., 1983, Güneş enerjisi, Kipaş Dağıtımçılık.
77. Kılıç, A., Öztürk, A., 1984, Güneş ışıını ve düz toplayıcıları, Segem, Ankara.
78. Koca, A., 2001, Gizli ısı enerji depolu düzlemsel bir güneş kolektörünün ısı performansının deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 76s.
79. Lavan, Z., Thomson, J., 1977, Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks, Solar Energy, 19, 514-519.
80. Shapiro, M.M., 1988, PCM wallboard tempers passive-solar temperature swings, Sun World, 12, 46-47.
81. Uslu, M., Binark, A.K., 1999, Phase-change materials used in heat storage technique and their characteristics, Int. Advanced Technologies Symposium, İstanbul, 451-458.
82. Arslan, Ö., 1993, Enerjinin faz değişimiyle tuz hidratlarda depolanması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 129s.
83. Brandstetter, A., 1988, On the stability of calcium chloride hexahidrat in thermal storage systems, Solar Energy, 41, 183-191.
84. Carlsson, B., Watermark, G., 1980, Heat transfer properties of a heat -of-fusion store based on calcium chloride hexahidrat, Solar Energy, 24, 239-247.
85. Furbo, S., 1980, Heat storage with an incongruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle, Thermal Storage of Solar Energy, Proceedings of an International TNO Symposium, Amsterdam, 135-145.
86. Lane, G.A., 1975, Low temperature heat storage with phase change materials, Ambient Energy, 1, 155-168.
87. Genceli, O.F., 1995, Ölçme Tekniğı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 113-511.
88. Midilli, A., 2001, Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system, International Journal of Energy Research, 25, 715-725.
89. Mujumdar, A.S., 1987, Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker, New York.
90. 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.

91. White, G.M., Bridges, T.C., Gewer, O.J., & Ross, I.J., 1978, Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions, ASAE Paper no:3052, ASAE, St. Joseph, MI.
92. Rahman, M.S., Perera, C.O., Theband C., 1998, Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas, Food Research International, 20, 485-491.
93. Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B., Wratten, F.T., 1985, Effects of drying air parameters on rice drying models, Transactions of the ASAE, 28, 296-301.
94. Midilli, A., Küçük, H., 2003, Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio, Energy, 28, 539-556.
95. Çengel, Y. A., Boles, M. A., Mühendislik Yaklaşımı ile Termodinamik, Literatür Yayıncılık, 1996.
96. Büyüktür, A.R., 1992, Termodinamiğin temel yasaları, Uludağ Üniversitesi Basımevi.
97. Akbulut, A., 2006, Yeni tasarlanan havalı kolektörler yardımı ile Elazığ yöresi dutlarının kurutulması ve kuruma parametrelerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 170s.