

ÇAM FISTIĞI KOZALAĞI KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI

Turgay POLAT

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2012
ANKARA**

Turgay POLAT tarafından hazırlanan ÇAM FISTIĞI KOZALAĞI KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Kadir YILDIZ

Makine Mühendisliği, Aksaray Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Neşet AKAR

Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Tarih: 21/03/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Turgay POLAT

ÇAM FISTIĞI KOZALAĞI KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI
(Doktora Tezi)

Turgay POLAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2012

ÖZET

Ülkemizde büyük potansiyele sahip tarım ürünlerinden çam fıstığının işlenmesinde çok büyük problemler görülmektedir. Bu problemlerin en önemlisi çam fıstığının kozalaklardan ayrılmasında yaşanan zaman veya haşlanmasıyla ürün kalitesindeki kayıplardır. Bu tez çalışmasında endüstriyel amaçlı çam fıstığının ısı pompası ve güneş enerji destekli bir kurutucuda kurutulması ve çam fıstığının kozalaklardan ayrılmasını sağlayacak sistem tasarımı ve imalatı yapılarak deneysel olarak enerji analizinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çam fıstığının son nem miktarına kadar kurutma işlemi gerçekleştirilerek renk, koku, tat ve aroması istenilen şartlarda olacaktır. Doğal kurutmadan hiçbir farkı olmadan, endüstriyel ölçekte yaz-kış şartlarında işlenmeye devam edilecek ve ekonomiye büyük katkı sağlayacaktır.

Klasik kurutma sistemlerinde kurutulan ürün üzerinden geçirilen havanın nemi artmakta ve bu sıcak ve nemli hava sistemden dışarı atılmaktadır. Bu işlem kurutma uygulamalarında enerji kayıplarına yol açmaktadır. Bu tez çalışmasında, güneş enerjisi ve ısı pompası sistemi kullanılacak ve gerektiğinde de sistem havasının soğuk yüzeyde nemi alınacaktır. Aynı zamanda güneş enerji ve ısı pompası destekli kurutucuda performans etki eden parametreler deneysel olarak belirlenecektir. Böylece sistem optimum şartlarda çalışacak buda enerji

giderlerini azaltacak ve büyük enerji tasarrufu sağlanacaktır. Kurutulacak ürünün özellikleri dikkate alınarak bilgisayar yardımıyla sıcaklık, nem ve hava hızı kontrolü de yapılarak ürün standartlara uygun şekilde teknik kurutma yöntemiyle kaliteli olarak kurutularak çam kozalaklarının açılması sağlanmıştır. Bu maksatla 24 saat çalışma esasına dayalı kurutucu ve çam fıstığını işleyecek bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır.

Çam fıstığı teknik metotlarla kurutulamadığından bazı kalite bozulmaları söz konusu olmakta bu da ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu araştırma kapsamında yapılacak olan bilgisayar kontrollü güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kurutucuda teknik kurutma yöntemi ile; enerji tasarrufu ve yatırım maliyetlerinin düşürülmesi ve kurutulan ürünün de yüksek kalitede olması sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 708

Anahtar Kelimeler : Çam Fıstığı, Kurutma, Isı Pompası, Güneş Enerjisi

Sayfa Adeti : 111

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

**THE DESIGN AND MANUFACTURE OF DRYING SYSTEM OF PINE NUT
CONE**

(Ph.D. Thesis)

Turgay POLAT

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE**

April 2012

ABSTRACT

It has been seen very large problems in processing pine nut which is an agricultural products having very large potential in our country. The most important of these problems are losing time of pine nuts separated from the cones or losing in product quality with boiling. In this thesiss, drying using heat pump and solar energy of industrial purposes pine nut in a dryer and investigation of experimentally energy analysis with manufacture and design a system carry out pine nut separating from the cones are purposed. Colour, smell, taste and aroma of pine nut will be desired conditions with perform drying until last moisture content. Without any difference from natural drying, the drying will continue to process on an industrial scale in summer and winter conditions and will contribute to the economy.

The moisture of the air passing over the air-dried product increases in conventional drying systems and this hot and humid air is discharged from the system. This process cause energy loses in the drying applications. In this thesis, solar energy and heat pump

system will be used and as needed, the moisture of air of the system will be captured on the cold surface. At the same time, effect on performance parameters will be determined experimentally in the drying system using solar energy and heat pump.

Consequently, the system will run in optimum working conditions to reduce energy costs and therefore huge energy savings will be achieved. Considering the properties of the drying product, temperature, moisture and air velocity also controlled by help of computer in accordance with product standards, using technical drying method and the opening of pine cones will be provided by drying as quality. For this purpose, a system to process the pine nut and dryer will be designed based on 24 hours work.

Because of pine nuts dried not used technical methods, some quality deteriorations are concerned and this is adversely affected on product quality. In this research which will be done, energy saving and reduction of investment costs and high quality of dried products have been targeted by drying technic method in the dryer under computer control, using heat pump and solar energy .

Science Code : 708
Key Words : Pine Nut, Drying, Heat Pump, Solar Energy
Page number : 111
Thesis Leader : Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN'e, kıymetli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım sayın hocam Prof. Dr. Kadir YILDIZ'a, sayın hocam Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a ve sayın hocam Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca atölye çalışmalarımızda özveriyle destek olan tüm çalışma arkadaşlarıma ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarıma teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Bu doktora tez çalışması, 00708.STZ.2010-2 kodlu San-Tez projesi olarak Sanayi ve Ticaret Bakanlığı tarafından desteklenmiş olup, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak akademik çalışmalarım boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, özverileri ve sabırlarından dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. GÜNEŞ ENERJİSİ	11
3.1. Güneş Enerjisi Sistemleri.....	11
3.1.1. Yoğunlaştırıcı Sistemler	12
3.1.2. Güneş Pilleri	13
3.1.3. Kollektörlü Sıcak Su Sistemleri	14
3.2. Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	15
3.2.1 Doğal Sirkülasyonlu (Pasif Tip) Güneş Enerjili Ürün Kurutucular..	16
3.1.3 Aktif Güneş Enerjili Kurutucular	19
4. ISI POMPASI TASARIMI	21
4.1 Isı Pompasının Termodinamik Esasları	22
4.2 Kullandıkları Kaynaklara Göre Isı Pompalarının Sınıflandırılması	22
4.2.1. Hava Kaynaklı Isı Pompaları (HKIP).....	23
4.2.2. Su Kaynaklı Isı Pompaları	23
4.2.3. Toprak Kaynaklı Isı Pompaları.....	24

Sayfa

4.2.4. Güneş Destekli Isı Pompaları	24
4.3. Isı Pompası Sistemi	25
4.3.1 Isı Pompalarının Temel Tipleri.....	27
5. KURUTMA VE KURUTMA SİSTEMLERİ.....	29
5.1.Kurutma	29
5.1.1 Kurutma İle İlgili Temel Kavramlar.....	30
5.1.2 Kurutmanın İç ve Dış Şartları	31
5.2.Kurutma Sistemleri	33
5.2.1. Direkt Kurutucular.....	33
5.2.2. Özel Kurutucular.....	35
5.2.3. Endirekt Kurutucular.....	36
5.2.4. Güneş Enerjili Kurutucular.....	38
5.3.Kurutma Teorisi	40
5.3.1. Kurutma Evreleri.....	40
5.3.2. Denge Nemi (DN).....	45
5.3.3. Tarım Ürünlerinin İnce Tabaka Formunda Kuruması.....	46
5.3.4. Tarım Ürünlerinin Kalın Tabaka Formunda Kuruması	48
5.4.Kurutma Hızı.....	49
5.5.Kurutma Modellerinin Sınıflandırılması	49
5.5.1. Basit Kurutma Modelleri	50
5.5.2. Karmaşık Kurutma Modelleri	51
5.6.Kurutmada Meydana Gelen Başlıca Değişmeler	53
5.6.1. Fiziksel Değişmeler	53
5.6.2. Kimyasal ve Diğer Değişmeler	56
6. ÇAM FISTIĞI KOZALAĞI ve KURUTULMASI	58

	Sayfa
6.1.Çam Fıstığı Kozalağı	58
6.2.Çam Fıstığı Kozalağının Kurutulması İşlemi	63
7. SİSTEM ANALİZİ	66
8. KURUTMA SİSTEMİ DENEY DÜZENEGİ	79
9. DENEY VE SONUÇLARI	97
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	110

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli.....	67
Çizelge 7.2. Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı.....	68
Çizelge 8.1. Kurutma santralinde kullanılan ekipmanların özellikleri.....	87
Çizelge 9.1. Deneylere ait sonuçlar.....	101

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 7.1. Isı pompası sisteminin log P-h diyagramı	70
Şekil 8.1. Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli çam fıstığı kurutma sistemi	81
Şekil 8.2. Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kurutma sisteminin taslak psikrometrik analizi	82
Şekil 9.1. Deneye ait değer ve sistem parametreleri.....	98
Şekil 9.2. Deneyler esnasında sistemde set edilen ve ölçülen değerlere ait bir görüntü.....	99
Şekil 9.3. Deneyler esnasında sistemde set edilen ve ölçülen değerlere ait bir görüntü.....	100

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Çam ağacı ve kozalaklar.....	60
Resim 6.2. Çam fıstığı kozalağı	61
Resim 6.3. Çam fıstığı kozalağı ve içi	62
Resim 6.4. Kurutulmuş ve kurutulmamış kozalıklara ait resim	
Resim 6.5. Kozalakların açılmasıyla elde edilen kabuklu çam fıstığı.....	
Resim 8.1. Kurutma sistemi raf düzeneği.....	81
Resim 8.2. Kurutma sisteminde kullanılan raflara ürün yerleşimi.....	82
Resim 8.3. Kurutma sisteminde kullanılan ağırlık ölçer.....	83
Resim 8.4. Kurutma odası dış duvarı ve kapısı.....	84
Resim 8.5. Sistem kurutma santrali.....	85
Resim 8.6. Güneş enerjili sıcak su üretim sistemleri.....	87
Resim 8.7. Dış evaporatör ve otomasyonu.....	89
Resim 8.8. Sisteme ait otomasyon panosu	90
Resim 8.9. Kurutma odasında kullanılan fanlar.....	92
Resim 8.10. Kompresör ve detayı.....	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Toplam yüzey alanı (m^2)
c_d	Duvar malzemelerinin özgül ısısı (kJ/kg K)
c_h	Havanın özgül ısısı (kJ/kg K)
c_ç	Çam fıstığı kozalaklarının özgül ısısı (kJ/kg K)
F_h	Fırın çalışma süresi (saat)
Gr	Grashof sayısı
h	Soğutucu akışkanın entalpisi (kJ/kg)
h'_s	Suyun ısı miktarı (kJ/kg)
h''_{ss}	Suyun doymuş buhar halindeyken ısı miktarı (kJ/kg)
K	Fırın duvarlarının ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
ṁ	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)
m_d	Duvar malzemelerinin toplam kütlesi (kg)
m_ç	Kurutulacak çam fıstığı kozalaklarının kütlesi (kg)
m_h	Sistemde ısıtılacak hava kütlesi (kg)
Q_{TOP}	Kurutma işlemi için gerekli toplam enerji miktarı (kJ)

Simgeler	Açıklama
$\dot{Q}_K$	Kondenser kapasitesi (kW)
$\dot{Q}_C$	Kompresör gücü (kW)
$\dot{Q}_E$	Evaporatör kapasitesi (kW)
Q_{KV}	Kondenserin kurutma havasına verdiği ısı (kJ)
Q_1	Duvarların ısıtılması için gerekli enerji miktarı (kJ)
Q_2	Fırın havasının ısıtılması için gerekli enerji miktarı (kJ)
Q_3	Çam fıstığı kozalaklarının ısıtılması için gerekli enerji (kJ)
Q_4	Çam fıstığı kozalaklarındaki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji (kJ)
q_{4a}	Çam fıstığı kozalaklarının içerisindeki suyun buharlaştırılması için kg başına verilmesi gerekli enerji (kJ/kg)
Q_5	Fırından çevre havasına olan ısı kayıpları (kJ)
Pr	Prandtl sayısı
S_a	Çam fıstığı kozalaklarının içerisindeki toplam su miktarı (kg)
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
T	Sıcaklık (K)
m_1	Kurutmadan önce numune kütlesi, g
m_2	Kurutmadan sonra numune kütlesi, g

Simgeler**Açıklama**

m_0	Kuru madde kabının darası kütlesi, g
t_d	Dış hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
v	Fırın hacmi içerisindeki toplam hava miktarı (m^3)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
Z	Isıtma süresi (saat)

Kısaltmalar**Açıklama**

Ashrae	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
Aw	Su aktivitesi değeri
AHE	Azalan hızla kuruma evresi
COP	Performans katsayısı
COP_{hp,h}	Isı pompası sisteminin ısıtma performans katsayısı
COP_{wh}	Tüm sistemin ısıtma performans katsayısı
DN	Denge nemi
EUR_{dc}	Enerjinin kullanılma oranı
GLA	Gamma linolenik asid-pinolenik asid
HVAC	Heating ventilating and air conditioning
HKIP	Hava kaynaklı ısı pompası
MER	Nem alma oranı
MIE	Materyalin ısınma evresi

Kısaltmalar	Açıklama
Pb	Su buharı kısmi basıncı
PV	Fotovoltaik
SHE	Sabit hızla kuruma evresi
SMER	Özgöl nem alma oranı
SO _{KA}	Kuru baza göre nem miktarı
SO _{YA}	Yaş baza göre nem miktarı
YA	Yaş ağırlık
KA	Kuru ağırlık

1. GİRİŞ

Ülkemizde büyük potansiyele sahip tarım ürünlerinden çam fıstığının işlenmesinde çok büyük problemler görülmektedir. Bu problemlerin en önemlisi çam fıstığının kozalaklardan ayrılmasında yaşanan zaman veya haşlanmasıyla ürün kalitesindeki kayıplardır. Yapılacak teknik kurutma ile çam fıstığının son nem miktarına kadar kurutma işlemi gerçekleştirilerek renk, koku, tat ve aroması istenilen şartlarda olması sağlanmalıdır.

Çam fıstığı, fıstık çamının (pinus pinea) kozalaklarından çıkartılan sert kabukların kırılması sonucu elde edilen ve besin değeri oldukça yüksek bir besin maddesidir. Yenilebilir ve yüksek ticari değeri olan bir tohumdur. Yetiştirme yeri bakımından sorun çıkartmayan türlerdendir. Neredeyse her tür toprakta yetişmekte; fakir kumlu, kireçli veya killi topraklarda kurak iklimlerde yetişir. Güneşli yerleri sever, soğuk ve sert iklimlerde gelişemez, ışık isteği fazladır. Ekvatorun 30° kuzey ve 30° güney enlemleri arasında kalan bölgeye “güneş kemeri” adı verilir. Türkiye coğrafi konumu ile (36°-42° kuzey enlemleri arasında) bu kemere çok yakın olduğundan, güneş enerjisi alma yönünden şanslı bir ülkedir.

Bu tez çalışmasında, endüstriyel amaçlı çam fıstığının ısı pompası ve güneş enerjisi destekli bir kurutucuda kurutulması ve çam fıstığının kozalaklardan ayrılmasını sağlayacak sistem tasarımı ve analizinin yapılması amaçlanmıştır.

Türkiye’de büyük bir potansiyele sahip tarım ürünlerinden çam fıstığının işlenmesindeki problemlerin en önemlileri; çam fıstığının kozalaklardan ayrılması amacıyla haşlanmasıyla, ürün kalitesi ve zaman kayıplardır. Klasik kurutma sistemlerinde kurutma havasının kurutma odası çıkışında nemi artmakta, bu sıcak ve nemli hava sistemden dışarı atılmaktadır. Bu işlem kurutma uygulamalarında enerji kayıplarına yol açmaktadır. Yapılan tasarım ile kurutma sisteminde gerektiğinde kurutma havasının nemi soğuk yüzeyde

alınabilecektir. Sistemde, kurutulacak ürünün özellikleri de dikkate alınarak bilgisayar yardımıyla sıcaklık, nem, ürün ağırlığı ve hava hızı kontrolü de yapılarak ürün standartlara uygun şekilde teknik kurutma yöntemiyle kaliteli olarak kurutularak çam kozalaklarının açılması sağlanabilmiştir.

Bu sistem ile gündüzleri güneş enerjisi, güneşin olmadığı ve geceleri ise ısı pompası yardımıyla endüstriyel ölçekte yaz-kış şartlarında sistem çalışabilecek, ürün işlenmeye devam edecek ve ekonomiye büyük katkı sağlayacaktır. Çam fıstığı teknik metotlarla kurutulamadığından bazı kalite bozulmaları söz konusu olmakta bu da ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan bilgisayar kontrollü güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kurutucuda teknik kurutma yöntemiyle enerji tasarrufu ve yatırım maliyetleri düşürülmüş ve kurutulan ürünün de yüksek kalitede olması sağlanmıştır. Bu teknik kurutma ile çam fıstığı, endüstriyel ölçekte yaz-kış şartlarında işlenmeye devam edilecek ve ekonomiye büyük katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasının amacı, çam kozalaklarının kurutulma sürecini hızlandıran, ekonomik anlamda tasarruf sağlayan ve kurutma sürecinde çam fıstığında oluşan kurutma kusurlarını ortadan kaldıran; bir kurutma sisteminin tasarımı ve imalatıdır. Tasarlanan ve analizi yapılan, bilgisayar kontrollü ısı pompalı ve güneş enerjili endüstriyel kurutma sistemiyle kurutma süresi ve kurutma süreci hızlandırılmış ve güneş enerjisinden faydalanılması ile kurutma işleminde enerji tasarrufu sağlanmıştır. Böylece Türkiye’de üretilen çam fıstığının, daha az enerji sarfiyatı ile her mevsim kurutma işleminin yapılması sağlanarak; daha erken ve daha kaliteli üretim yapabilme imkanı elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde ürünlerin daha teknik metotlarla kurutularak iç ve dış piyasaya daha kaliteli olarak sürülmesi son derece önemli hale gelmiştir. Üründeki kalite değerlerini de ürünün son nem miktarı (kurutma sonrası), ürünün kurutma sonrası su aktivitesi değeri, üründeki aflatoksin miktarı, ürünün aroması, ürünün rengi ve ürünün dayanıklılığı olarak sıralanabilir.

Gıdaların kurutulması, insanlığın tabiattan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Gerçekten bu metot tabiatla çoğu zaman kendi kendine gerçekleşmekte ve örneğin, çeşitli tahıllar ve baklagiller tarlada kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir. Doğada kuruma, güneş enerjisiyle gerçekleşmekte olduğundan, kurumanın her yerde ve her zaman bu yolla olması imkânsızdır. Her ürünün güneşte kurutulması doğru değildir. Bu yüzden birçok ürünün diğer metotlarla kurutulma yolları geliştirilmiştir [1].

Kurutmanın uygulandığı en yaygın alanlar; gıda sanayi, deri sanayi, tarım sektörü, kimya sanayi, silah sanayi ve orman ürünleri sanayi olarak özetlenebilir. Bu alanlara kurutma işlemi uygulanarak ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma, kullanım ve işlenme kolaylığı vb. avantajlar kazandırılması da eklenebilir.

Gıda maddelerinde kurutma işlemi daha çok meyve ve sebzelere uygulanmaktadır. Kuru meyvelerin anavatanı ve binlerce yıllık üretim alanı olan Türkiye’de kuru meyveler tarih boyunca ve günümüzde özellikle dış ticaret gelirlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Türkiye’de kuru meyve yetiştiriciliğinin çok eski ve üretimin fazla olmasında bu meyvelerin kolay hasat, muhafaza ve nakil edilebilir oluşlarının, ekolojik imkanların uygunluğunun ve doğal olarak yetişmiş olmalarının büyük payı vardır.

Günümüzde gıda kurutma sistemleri ve kurutulmuş ürünlerle ilgili birçok çalışma yapılmış olup bu konularla ilgili olarak hem deneysel hem de matematiksel metotlarla kurutma parametreleri incelenmiştir. Gıda maddelerinin kuruma özellikleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle kurutmada kullanılan havanın sıcaklığı, bağıl nemi, hızı ve ürüne göre akım yönü, ısı ve kütle transferi olaylarının etkilerinin belirlenmesi gerekir. Bu konuyla ilgili olarak Atalay güneş enerjisi destekli nem almalı ısı pompalı kurutucunun tasarımını yaparak sistemin termodinamik analizini yapmıştır [2].

Aghbashio vd, yaptıkları çalışmada yarı endüstriyel bir bantlı kurutucunun performans analizini incelemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmada havuç dilimleri kurutulmuştur. Enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Havuçlar 5 mm kalınlığında 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıkta, 0,61, 1,22 ve 1,83 kg/s hava debisinde ve $2,98 \cdot 10^{-4}$, $3,48 \cdot 10^{-4}$ ve $4,16 \cdot 10^{-4}$ kg/s besleme oranlarında kurutulmuştur. Kurutma parametreleri, ürün kütle kaybı, enerji kullanımı, enerji kullanım oranı, ekserji kaybı ve ekserji verimliliği şeklinde incelenmiştir. Her banttta 250 gram yaş ürün kullanılmış %51,6-84,4 oranında kütle kaybı izlenmiştir. Enerji kullanımı ve enerji kullanım oranı sırasıyla 3,78-25,57 kJ/s ve 0,1554-0,3752 dir. Ekserji kaybı ve ekserji verimi ise 0,6677-14,1577 ve 0,5527-0,9329 dur. Ayrıca çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Ürün kütle kaybı, enerji kullanımı, enerji kullanım oranı ve ekserji kaybı kurutma hava sıcaklığı arttıkça artmakta fakat ekserji verimliliği düşmektedir. Ürün kaybı, enerji kullanımı, ekserji kaybı ve ekserji verimliliği kurutma hava hızıyla artmakta fakat enerji kullanım oranı düşmektedir [3].

Lee ve Kim, çalışmalarında ince dilimlenmiş kırmızı turpu ısı pompalı kurutucuda kurutmuşlardır. Ayrıca karşılaştırma için sıcak havalı ısıtıcı ile de kurutmuşlardır. Isı pompasında özgül nem alma oranı (SMER) 3,4 kg/kWh değerlerine ulaşılmıştır. Sıcak havalı kurutmaya göre 1-1,5 kat uzun sürmesine karşın ısı pompalı kurutucunun enerji kazancının yaklaşık üç kat daha iyi olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca kurutma havası sıcaklığı

arttığında bağıl nemin düştüğü ve MER ile SMER değerlerinin arttığı görülmüştür. Çalışma ayrıca ısı pompalı kurutmanın, sıcak havalı kurutmaya göre % 58,9 - 69,5 oranında enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir [4].

Marfil vd, Brezilya'da yaptıkları çalışmada farklı metotlarla kurutulmuş domateslerde askorbik asit miktarının değişimini incelemiştir. Ayrıca ön hazırlıkta kullanılan solüsyonların ve kurutma sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Domatesler iki parçaya bölünmüş, bütün olarak soyulmuş, hem soyulup hem solüsyona tabi tutularak kurutulmuşlardır. Soyulmuş domateslerde askorbik asit kaybı %16 olurken, solüsyonla işlem görmüş domateslerde %45'e kadar çıkmıştır. İkiye bölünmüş domateslerde askorbik asit miktarında düşüş olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kurutmanın da ürünlerdeki C vitamini değerini düşürdüğü görülmüştür [5].

Li vd. tarafından bir tahıl ambarı için güneş destekli ısı pompası kurutma sistemi tasarlanmıştır. Ünitenin güneş enerjisinden yararlanma oranı % 20'dan daha yüksek, COP değeri 5,19 ve SMER değeri 3,05 kg/kWh elde edilmiştir [6].

Hawlder vd, Singapur'da yapılan çalışmada güneş enerjisi destekli ısı pompası kurutma sistemi tasarlanıp testleri yapılmıştır. Sistemde soğutucu akışkanı buharlaştırmak için dış ortam havası sıcaklığı kullanılmakta, ayrıca kurutma havasını ısıtmak için de havalı güneş kolektörü kullanılmıştır. Bunun dışında kurutucu girişine bir de harici ısıtıcı konmuştur. Isı pompası içinde kullanılan akışkan R-134a'dır. Sistem ile ilgili olarak sıcaklık, basınç, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgar hızı değerleri ölçümü yapılmıştır. Ölçüm cihazları için hata analizi metodu kullanılmış ve $\pm 3,5$ bulunmuştur. ASHRAE test standartlarına göre kolektör testleri yapılmış ve en yüksek verimin hava debisinin artmasıyla elde edildiği görülmüştür. Verim değerleri 0,036 kg/s ve 0,06 kg/s hava debileri için sırasıyla %69-73 ve %72-75 olarak elde edilmiştir. Havalı kolektör veriminin giren havanın neminin alınmasıyla arttığı görülmüştür. Soğutucu akışkanın buharlaştırıcı kolektöre daha düşük

sıcaklıkta girmesinden dolayı verimin havalı kolektör verimine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu verim %87 ve %76 değerlerindedir [7].

Hawlader ve Jahangeer, güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutucunun ve su ısıtıcısının performansını araştırmışlardır. Bununla ilgili bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Yükün 20 kg ve kompresör hızının 1200 rpm olması durumunda özgül nem çekme oranı (SMER) 0,65 olarak saptanmıştır. Sistem performansını etkileyen üç parametrenin güneş radyasyonu, kompresör hızı ve kurutma odasındaki toplam yük olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, kompresör hızı arttığında SMER ve COP değerinin azaldığı gözlemlenmiştir [8]. Ayrıca Hawlader, güneş enerjili, ısı pompalı kurutma fırını ve sıcak su ısıtıcısı yapmıştır [9].

Günerkan, endüstriyel kurutma sistemlerini incelemiştir. Araştırmada, kuruma zamanının hesaplanması, kurutucu hesapları ve kurutma sistemi seçimi ile ilgili unsurlar ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir [10].

Queiroz vd, yaptıkları çalışmada elektrik rezistanslı ve ısı pompalı farklı iki kurutucuda domates kurutmuşlar ve performanslarını incelemişlerdir. Ayrıca kurutmayı matematiksel model ile desteklemişlerdir. Kurutma havasını paralel ve karşıt akışlı olarak iki farklı şekilde kullanmışlardır. Sıcaklık, hava hızı ve domates tiplerinin etkilerini incelemişlerdir. Isı pompalı kurutucunun efektif COP değerini 2,56-2,68 arasında hesaplamışlardır. Elektrik rezistanslı kurutucuya göre ısı pompalı kurutucunun enerji bakımından %40 ekonomik olduğunu göstermişlerdir. Matematiksel model olarak da Page modelini kullanmışlardır. Bu modelde parametrelerin en çok kurutma sıcaklığıyla etkilendiğini belirtmişlerdir [11].

Akpınar, kırmızı biber dilimlerinin ince tabaka kurutma işleminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Araştırmada, konvektif tip kurutucuda 55 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklık değerlerinde ve 1,5 m/s hava hızında kurutma işlemi

gerçekleştirmiştir. Termodinamiğin I. kanunu kullanılarak enerji analizi ve termodinamiğin II. kanunu uygulanarak ekserji analizi yapılmıştır [12].

Toy vd, meyve ve sebze kurutmak üzere geliştirilen güneş enerjili bir kurutucu test etmişlerdir. Kuruma süreleri ve kurutulan ürünün kalitelerini karşılaştırmak üzere açıkta ve kurutma odasında kurutulan ürünlerin kurutma süresi, L-askorbik asit ve renk bakımından karşılaştırmışlardır. Kalite özellikleri açısından karşılaştırıldığında, güneş enerjili kurutucu ile kurutulan ürün kalitesi açıkta kurutulan ürün kalitesinden daha yüksek olmuştur [13].

Teeboonma vd, yapılan çalışmalarında deneysel daha önce yapılmış çalışmaların sonuçlarını kullanarak teorik model üzerinde papaya ve mango ürünlerinin kuruma ve ekonomik analizlerine yer vermişlerdir. En düşük maliyetle bir sistemde geri çevrim hava oranının, evaporatör by-pass hava oranının, hava debisinin ve kurutma sıcaklığı parametrelerinin etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Uzaklaştırılan birim su miktarını dikkate alarak ürün başlangıç nem miktarının, ürün geometrisinin ve ürüne ait difüzyon özelliklerinin etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Elde edilen sonuçlar her ürün için farklı şartların önem kazandığını ortaya çıkarmıştır, özellikle optimum hava debisi ve evaporatör by-pass havası. Maliyet analizi de yapılmış olup sonuçta ürünün fiziksel yapısının, hava debisi ve evaporatör by-pass oranının kesinlikle kurutma maliyetini etkilediği sonucuna varılmıştır [14].

Saensabai ve Prasertsan, bilgisayar simülasyonu ile yaptıkları bu çalışmalarında beş farklı ısı pompalı kurutucuyu karşılaştırmışlardır. Tam açık, yarı açık ve tam kapalı sistemler, harici kondenser ve harici soğutucu ile farklı kombinasyonlarda karşılaştırılmıştır. Isı pompalarının performansları yüksek ve düşük kurutma oranına ve 20 ile 40 °C çevre sıcaklıklarına göre incelenmiştir. Genel olarak tropik iklim ve yüksek kurutma oranlarında yarı açık sistemin en uygun olduğu fakat düşük kurutma oranlarında sistemin karmaşık olduğu ve çevre sıcaklığı değişimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir [15].

Teeboonma ve arkadaşları, ısı pompalı meyve kurutucularının optimizasyonunu yapmış. Isı pompalı meyve kurutucularının optimum şartları belirlenirken en önemli faktörlerin dönüş havası oranı, evaporatör by-pass oranı, kütleli debi ve kurutma havası sıcaklığı olduğunu belirtmiş. Sonuç olarak kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri optimum hava debisini ve evaporatör by-pass hava oranını önemli bir biçimde etkilemektedir ifadesini kullanmış [16].

Braun vd, ısı pompalı hava çevrimli kurutucuların enerji verimliliği analizini yapmış. Hava çevrimli ısı pompalı kurutucuda elbise kurutulurken ekonomik analiz yapılmıştır. Konvansiyonel kurutucularla karşılaştırıldığında hava çevrimli pratik ısı pompalı kurutucuların önemli verim iyileşmesine sahip olduğu saptanmıştır [17].

Chua vd, çalışmalarında ısı pompalı kurutucularda yeni gelişmeleri, gelecek tasarımlar ve yenilikleri inceleyerek ısı pompalı kurutucular hakkında geniş bilgi vermektedir. Ayrıca ısı pompalı kurutucuların genel çalışma prensipleri hakkında detaylı bilgi vermişlerdir. Isı pompalı kurutucuların limitlerinden ve avantajlarından da bahsetmektedir. Çalışmada iki farklı kurutucu detaylı olarak anlatılmıştır. Bunlar gıda ve kereste kurutucularıdır. Kurutma çevrimleri hakkında bilgi verilmiştir. Radyo frekanslı ve kızılötesi destekli ısı pompalı kurutucular gibi yeni teknolojilerden bahsetmişlerdir. Yeni gelişmeler kapsamında çok yönlü sistemler hakkında da çeşitli görüş belirtmişlerdir [18]. Olgun ve Rzayev, güneş enerjisi ile üç farklı sistemde fındığın kurutulmasını deneysel olarak incelemişler ve kabinet tipi, dolap tipi ve çadır tipi olmak üzere üç sistemde fındığı kurutmuşlardır. Sistemde ek ısıtıcı kullanıldığı durumda kurutma süresinin oldukça kısaldığı görülmüştür [19].

Chou ve arkadaşları, ısı pompalı kurutucuda tarımsal ve deniz ürünlerini (mantar, meyveler ve istiridye) kurutmuştur. Isı pompalı kurutucularda planlanmış kurutma şartları ile tarımsal ve deniz ürünlerinin kalitesinin arttırılabileceğini ifade etmişler [20-22].

Coşkun, ısı pompası yardımıyla sürekli kurutma sisteminin simülasyon programını oluşturmuştur [23].

Prasertsan ve arkadaşları, ısı pompalı kurutucuda tarımsal gıdaları (muz) kurutmuştur. Isı pompalı kurutucuların yüksek nem miktarına sahip materyaller için daha uygun olduğunu ifade etmiş. Isı pompalı kurutucuların işletme maliyetlerinin onları ekonomik olarak mümkün yaptığını belirtmişler [24-25].

Vazquez vd, İspanya'da yaptıkları deneysel çalışmalarında üzüm kurutmuşlardır. Isı pompalı kapalı çevrim bir kurutma düzeneği kurulmuştur. Bu kurutucuda farklı üzümler, değişik hava hızı ve sıcaklıklarında kurutulabilmektedir. Üzümlerin dış ortamda 40 gün gibi uzun sürelerde kurumasına karşın bu sistemde 24 saatte kurutma sağlayabilmişlerdir. Ayrıca zeytinyağı, K_2CO_3 gibi solüsyonlarla ön işlem yapılması kurutma süresinde azalmayı sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Renk ve üzüm kalitesinin bozulmadığını da bildirmişlerdir. Bu tür bir cihazın endüstriyel boyutta yapılmasının uygun olabileceğini söylemişlerdir [26].

Fırat, yapmış olduğu çalışmada dikey konumdaki saydam iki levha arasındaki hava akımının güneş enerjisi ile ısıtılması ve kurutma sistemlerine uygulanması incelemiştir [27].

Güngör ve Özbalta, çalışmalarında endüstride kullanılan kurutucuların sınıflandırılmasını, seçimine etki eden parametreler, kurutma sistemlerinde kütle ve enerji dengeleri, kuruma hızının belirlenmesi, malzemenin nem içeriği, kurutma sistemlerinde enerji tasarrufu ve kurutucu tasarımında dikkate alınması gereken önemli noktaları incelemişlerdir [28].

Strommen ve Kramer, ısı pompalı kurutucuda deniz ürünlerini (balık) kurutmuş. Isı pompalı kurutma sistemlerinin büyük avantajının kurutulmuş ürünlerin yüksek kalitede olmasını sağlaması ve kontrol edilebilen sıcaklık

programı ile ürün özelliklerine (gözeneklilik, rehidrasyon, renk, doku ve dayanıklılık) göre kurutma programının ayarlanabilmesinin mümkün kılınmasıdır ifadesini kullanmıştır [29].

Coşkun, kurutma işlemlerinde ısı pompası ile enerji tasarrufu sağlanmasını deneysel olarak incelemiştir. Kurutma havasının ısı pompasının yoğuşturucusunda ısıtılmasının fuel-oil ile ısıtılmasının yanında %25 daha verimli olduğunu saptamıştır. Ayrıca, geri beslemesiz tip ısı pompasından daha etkili olan geri beslemeli tip ısı pompası ise herhangi bir tekstil fabrikasında kullanıldığında fuel-oil ile çalışan klasik tip kurutucular yanında teorik olarak %48 civarında bir enerji tasarrufu sağlanacağını tespit etmiştir [30].

Güngör ve Yaşartekin, çalışmalarında dikey ekseninde güneşi izleyen kabinet tipi bir kurutucuda elma kurutulmasını incelemişlerdir [31].

3. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, hidrojen ve helyum gazlarından oluşur. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6 000 °C olup merkezinde bu sıcaklık 15 600 000 °C civarındadır. Bu yüksek sıcaklık nedeni ile elektronlar atom çekirdeklerinden ayrılır. Bu yüzden güneşte atomlar ve moleküller yerine serbest elektronlar ve atom çekirdekleri bulunur. Hafif elementlerin atom çekirdekleri bir araya gelerek ağır elementlerin çekirdeklerini oluştururlar. Güneş 3 bölgeden meydana gelir. Merkezindeki kor bölgesinde her saniyede binlerce ton hidrojen, nükleer reaksiyonlarla helyuma dönüştürülmekte ve dönüşüm esnasında aradaki kütle farkı da ısı ve ışık enerjisine dönüşüp uzay boşluğuna yayılmaktadır. Çeşitli dalga boylarında da dünyaya ulaşmaktadır. Güneş, ortalama 5 762 K sıcaklığında radyasyon yayan bir siyah cisim olarak kabul edilir. Güneşten dünya atmosferine kadar gelen ışınlar burada bir filtrasyona maruz kalırlar. Bir kısım ışınlar ozon tabakası tarafından geri yansıtılırken bir kısmı yutulur. Asıl önemli olan kısmı ise direkt olarak yeryüzüne ulaşır.

Termonükleer bir reaktör olan güneşin birim alanından birim zamanda çeşitli dalga boylarında 62 MW/m² enerji yayılmakta ve güneşin bütün yüzeyinden neşredilen enerjinin sadece iki milyarda biri yeryüzüne gelmektedir. Buna rağmen bir yıl boyunca yeryüzüne gelen enerji dünya enerji tüketiminin milyonlarca katıdır. Enerji sorununun çözümü için petrole alternatif yeni enerji kaynakları araştırılmakta ve doğanın en büyük enerji kaynağı güneşten yararlanmak amacıyla yoğun çalışmalar yapılmaktadır [32].

3.1. Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneş enerjisi bilinen en eski kaynak olarak geçmişten günümüze kadar bu enerjiden faydalanan birçok sistem ortaya çıkmıştır. Genel olarak evlerde su ısıtma basta olmak üzere, hacim ısıtma, ürünlerin kurutulması, güneşte pişirme, elektrik üretimi ve daha birçok alanda uygulamalar bulunmakta özellikle güneş enerjisi potansiyelinin konutlarda, fabrikalarda, turistik

tesislerde sıcak su ihtiyacını karşılayan sistemler halinde kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Binaların, seraların ısıtılmasında, kurutma tesislerinde ve damıtma işlemlerinde de bu enerjiden yararlanmak için gerekli teknoloji ve bilgi birikimi oluşmuş bulunmaktadır.

3.1.1. Yoğunlaştırıcı Sistemler

Güneş ısınlarnı belirli bir noktaya yoğunlaştıran sistemlerdir. Düzlemsel kollektörler için kullanılan kavram ve tarifler yoğunlaştırıcılar için de geçerlidir. Bunlardan farklı olarak bu sistemler için “yoğunlaştırma oranı” kavramından söz edilmektedir. Bu oran açıklık alanının, alıcı yüzey alanına oranı olarak tanımlanır. Yoğunlaştırma oranı parabolik oluk yoğunlaştırıcılarda 300, parabolik çanak yoğunlaştırıcılarda ise 40 000 civarındadır. Bu sistemlerde elektrik üretimi verimli olarak gerçekleştirilir [33].

i) Doğrusal Yoğunlaştırıcı Sistemler

Bu sistemlerde Güneş tek boyutlu hareket ile takip edilerek Güneş enerjisi bir doğru üzerinde yoğunlaştırılır. Güneş enerjisi, parabolün odağında siyah bir emici boruya yansıtılır. Doğrusal yoğunlaştırma yapan sistemler bir dizi parabolik kolektörlerden meydana gelmiştir. Bu sistemlerden elektrik üretimi için Güneş tarlası, buhar elektrik üretim sistemlerinde meydana gelen güç santralleri vardır. Bu santrallerde 30 °C üzerinde sıcaklık elde edilmekte ve su yerine akışkan olarak termal yağlar kullanılmaktadır. Isı toplama elemanı emiciliği %97 olan çelik alıcı boru ve cam-metal birleştiricilerden oluşmuş cam tüplerdir. Sistemdeki buhar çevrimi şu şekildedir: Buhar, ön ısıtma, buhar üretimi ve süper ısıtma kademelerinden geçer ve 370 °C’de 100 bar basınca yükselerek türbine girer ve çıkışta yoğunlaşan buhar aynı işlemlerden geçer [33].

ii) Noktasal Yoğunlaştırıcı Sistemler

Bu sistemler, Güneşi iki boyutta izleyerek noktasal yoğunlaştırma yaparlar. Bunlar kendi aralarında merkezi alıcı sistemleri ve parabolik çanak kollektörler olarak ikiye ayrılır [33].

Merkezi Alıcı Sistemler

Güneş ısınları, heliostatlardan (düzlemsel ayna) meydana gelen bir alanda kule üzerine monte edilmiş bir ısı esanjörüne (alıcı) odaklanır. Heliostatlar bilgisayarla kontrol edilerek alıcının her an güneş alması sağlanır. Bu sistemlerde elektrik üretimi 1000 °C'nin üzerine çıkan su buharının çevrimi ile sağlanır. Çevrimden sonra buhar, yoğunlaştırucuda yoğunlaştırılarak yeniden buhar jeneratörüne gönderilir [33].

Parabolik Çanak Kollektörler

Güneş, iki ekseninde takip edilerek ısınlara odak noktasına yoğunlaştırılır. Bu sistemlerde elektrik üretimi şöyledir: Güneş ısınları, yansıtıcı aynalar tarafından odakta stirling motoru üzerine yoğunlaştırılır ve motor ısı enerjisini jeneratör için gereken mekanik enerjiye çevirir. Üretilen elektrik, radar istasyonları, uzak yerleşim birimleri ve diğer elektrik santrallerinde kullanılır [33].

3.1.2. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ısınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Fotovoltaik piller olarak da bilinen güneş pilleri yarı iletken maddeler olup 100 cm²'lik alanlara sahip dörtgen şekilli ve 0,2 - 0,4 mm kalınlıkta yapıya sahiptir. Güneş pilleri yarı iletken malzemelerden oluşmuştur ve bunların çalışması için N veya P tipi silisyum halinde olmaları gerekir. N tipi silisyum, periyodik cetvelin 5. grubundan bir elementin silisyum erğine katılır. Silisyumun dış yörüngesinde 4 elektron ve 5. grup elementte fazla elektron bulunduğundan fazla olan elektron kristal yapıya verilir.

Bu elementlere “verici” veya “N tipi” katkı maddesi denir. P tipi silisyum için 3. gruptan bir element (Al, In, B vb.) silisyum eriyiğine katılır. Bu elementlerin son yörüngelerinde 3e olduğundan kristal içinde 1 e eksilmiş olur. Bu elektron yokluğuna “hal” veya “boşluk” denir ve (+) yük taşıdığı kabul edilir. 3. gruptaki elementlere “alıcı” veya “P tipi” katkı maddesi denir. P–N tipi fotovoltaiik pilin eklem bölgesindeki P bölümünde (-) verici iyonlar, N bölümünde (+) alıcı iyonlar toplanır.

Bu eklem bölgesine “geçiş bölgesi” veya “yükten arındırılmış bölge” denir. Yarı iletkenler yasak enerji bandı iletken bant ve valans bandından oluşur. Büyük enerjisi bir yasak enerji bandına geldiğinde enerjisi bir elektronu vererek enerjinin iletken banda geçmesini sağlar ve elektron-hol çifti oluşur. Bu olay P-N eklemine oluşmuşsa elektronlar N bölgesine, holler ise P bölgesine itilir ve elektron-hol çiftleri pilin uçlarında bir güç meydana getirirler ve süreç bu şekilde tekrarlanır [33].

3.1.3. Kolektörlü Sıcak Su Sistemleri

Kollektörlü sıcak su sistemleri 100 °C’nin altındaki düşük sıcaklıklarda hacim ısıtma su ısıtma, su havuzu ısıtma vb. amacıyla kullanılırlar. Kollektörlü sıcak su sistemleri genel olarak düzlemsel kolektörlerden meydana gelmektedir. Düzlemsel kolektörlü sıcak su sistemlerinin yapısı şunlardan oluşur:

- Güneş toplayıcı (kollektör)
- Şeffaf örtü
- Emici plaka
- Isıtma devresi
- Isı değıştirici (esanjör)
- Depo soğuk su girişı
- Depo sıcak su girişı

Kollektörlü sıcak su sistemleri tabii dolaşımli ve pompalı olarak iki gruptur:

Tabii Dolaşımli Sistemler

Bu tür sistemlerde sıcaklıkla orantılı olarak suyun yoğunluğunun artması veya azalması özelliğinden faydalanılır. Bu özelliklerden dolayı su sistemde kendiliğinden dolaşır. Tabii dolaşımli sistemlerde ısınan suyun sistemde dolaşabilmesi için depo, kolektörün en üst seviyesinden en az 30 cm yüksekte olması gerekmektedir ve bu nedenle bu sistemlerin uygulama alanları sınırlıdır. Sıcak su ihtiyacı az olan yerlerde verimleri yüksektir ve basit yapılı olduklarından maliyetleri düşüktür.

Pompalı Sistemler

Kollektör sistemindeki suyun sistemde dolaşabilmesi için bir pompaya ihtiyaç vardır. Büyük sistemlerde kullanıldıklarından depo kullanımı çok zordur ve ısı dirençlerin fazla olması suyun dolaşımını büyük ölçüde engellemektedir. Pompalı Açık Sistemler: Sistemde ısıtma suyu ve kullanılan su aynıdır. Ucuz ve yüksek verimli olmalarının yanı sıra soğukta donma ve kireçlenme riski vardır. Pompalı Kapalı Sistemler: Kolektörde dolaşan ısıtma suyu ve kullanılan su ayrıdır. Bu sistemlerde esanjör (ısı değıştirici) kullanıldığı için verim düşük ve maliyet fazladır [33].

3.2. Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinin Sınıflandırılması

Güneş enerjili kurutma sistemleri öncelikle ısıtma yöntemlerine ve güneş enerjisinin kullanılma yöntemine göre sınıflandırılır [34].

a-) Aktif güneş enerjili kurutma sistemleri

b-) Pasif güneş enerjili kurutma sistemleri

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

3.2.1. 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 [35].

Dağıtılmış (Dolaylı Tip) Doğal Sirkülasyonlu Güneş Enerjili Kurutucular

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. 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 [36]. 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

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 [37].

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.

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.

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. 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 [38].

3.2.2. 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 [35].

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 absorbsiyonlu sera tipi kurutucular

olarak üç kısımda incelenebilirler.

Bunlardan direkt absorbsiyonlu kurutucularda ürün doğrudan güneş radyasyonunu absorbe ettiğinden ayrı bir güneş kolektörüne ihtiyaç yoktur [34].

Dağıtılmış Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri

Bu tiplerde güneş kolektörü ile kurutma bölümü ayrılmıştır. 4 ayrı temel bölüm vardır:

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

Kombine Tip Aktif Güneş Enerjili Kurutucular

Güneş enerjili hava ısıtıcı bölüm, kanallama, ayrı bir kurutma bölümü ve fan içerirler. Ayrıca kurutma bölümü direkt absorbsiyon 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 [35].

4. ISI POMPALARI

Isı pompaları enerjinin düşük sıcaklık kaynağından yüksek sıcaklık kaynağına aktarıldığı düzenekler olup, prensip olarak uzun yıllardan beri bilinmektedir. Yakıt fiyatlarındaki artış ve diğer fosil yakıt kaynaklı ısıtma sistemlerinin çevreye olan zararlı etkileri nedeni ile ısı pompaları önemli bir ticari potansiyel oluşturmaktadır. Bir taraftan yakıtların çevreye verdiği zararlar ve küresel ısınma, diğer taraftan artan yakıt fiyatları ısı pompalarını cazip hale getirmiştir. Günümüzde dünyanın pek çok ülkesinde ve özellikle ABD, İsveç, Kanada, İsviçre, Avusturya, Almanya, Finlandiya... vb. ülkelerde ısı pompaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı pompaları ile insanlar doğada zaten var olan yenilenebilir enerjileri kullanmak sureti ile kışın ısınmakta, yazın serinleyebilmektedirler. Dış hava, toprak, nehir suyu, göl suyu ısı pompalarının kaynaklarını oluştururlar. Bu kaynaklardan kış şartlarında alınan ısı, ısıtılması hedeflenen hacme aktarılmakta, yaz şartlarında ise serinletilmesi hedeflenen ortamdan alınan ısı yine aynı kaynağa transfer edilmektedir [32].

Gerçekte bir soğutma çevrimi olan ısı pompası çevriminin temel prensibini Nicolas Léonard Sadi Carnot 1824 yılında ortaya atmıştır. 1850 yılında Lord Kelvin'in soğutma cihazlarının ısıtma maksadı ile kullanılabileceğini ileri sürmesiyle ısı pompası uygulamaya girmiştir. II. Dünya Savaşı'ndan önce ısı pompasının geliştirilmesi ve kullanılabilir hale getirilmesi için birçok mühendis ve bilim adamı bu alanda araştırmalar ve çalışmalar yapmıştır. Savaş yıllarında endüstri, imkânlarını daha acil problemlere yönelttiği için ara verilen bu çalışmalara savaştan sonra tekrar başlanmıştır.

Son yirmi yıl içerisinde ısı pompası sistemi çok az enerjiye ihtiyaç duyması, evlerdeki yoğun kullanımı ve klimatizasyon için ekonomik çözümler sunması sonucu dikkate değer bir biçimde performansını ve güvenilirliğini arttırmıştır. Çevre sorunlarında kirlilikte ve küresel ısınmayı oluşturan sebeplerde konutlardaki ısıtma ihtiyacını karşılamak üzere kullanılan fosil yakıtlar, sanayi

ve endüstrinin bıraktığı atıklar, taşıtların egzoz gazlarındaki kirleticiler etkili olmaktadır. Hava, su ve toprak kirliliğine neden olan bu zararlı maddeler ekolojik dengede olumsuz değişiklikler meydana getirmekte, canlı ve cansız varlıklar üzerinde zararlı etkiler yapmaktadır. Çevremizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan ısı pompaları düşük enerji tüketimleri CO₂ gazı emisyonunu önemli ölçüde azaltabilmeleri ve yüksek performans katsayıları ile günümüz iklimlendirme uygulamalarında daha çok tercih edilmeye başlamıştır. Bina ısıtmasında en çok kazanlar kullanılmaktadır. Buna karşın ısı pompası talebinin artması ile birlikte enerji tasarrufunda önemli mertebede artışlar olmaktadır. Fosil yakıt kaynaklı ısıtma sistemlerinin çevreye olan büyük zararları ve bu yakıtların fiyatlarındaki artışlar ısı pompalarının önemini bir kat daha arttırmaktadır. Yapılan araştırmalar; ısıtma ve soğutma amacı ile harcanan enerjinin ısı pompaları yardımı ile daha az tüketilebileceğini göstermektedir [32].

4.1 Isı Pompasının Termodinamik Esasları

Isı pompası, dışarıdan enerji verilmesi ile düşük sıcaklıktaki bir ortamdan aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki ortama veren bir makinedir. Kışın ısıtma maksadı ile kullanılan ısı pompası, yazın da soğutma için kullanılabilir. Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çevrimi gerçekleştirirler fakat kullanım amaçları farklıdır. Bir soğutma makinesinin amacı düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdan ısı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimi tamamlaması için yapılması zorunlu bir işlemdir. Isı pompasının amacı ise, bir ortamı sıcak tutmaktır [32].

4.2. Kullanıldıkları Kaynaklara Göre Isı Pompalarının Sınıflandırılması

Isı pompaları kullanımında hava, su, toprak ve güneş enerjisi olmak üzere dört kaynaktan yararlanılır. Bu kaynaklardan ilk üçü tek başlarına kullanılabilmeyle beraber, güneş enerjisi bugüne kadar genellikle yardımcı

kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmada enerjinin absorbe edildiği ve serbest bırakıldığı ortama göre ısı pompaları isimlendirilir. Isının çekildiği ve atıldığı kaynakların aynı sıcaklıkta olmaları halinde, ısı pompası maksimum verimde çalışır [32].

4.2.1 Hava Kaynaklı Isı Pompaları (HKIP)

Hava ısı pompası için üniversal, ucuz, bol bir ısı kaynağıdır. En büyük avantajları, sürekli bulunması, geniş uygulama alanı bulunması, kullanılan ekipmanların makul boyutlarda olması ve nispeten düşük işletme ve tesis maliyetleri gerektirmesidir. Tasarımı için çok geniş ve ayrıntılı bilgi kaynakları mevcuttur. Hava kaynaklı ısı pompalarının dezavantajları; Hava sıcaklığının çok değişken olması, buzlanma problemi, olarak sayılabilir. Isı ihtiyacının yüksek olduğu durumlarda kaynak sıcaklığı da düşüktür. Bu ise ısı pompasının kapasitesinin düşmesine neden olur. Bu durumlarda ek bir ısıtma kaynağına ihtiyaç duyulur. Isı kaynağının çok değişken olması projelendirmeyi ve ekipman seçimini zorlaştırır [32].

4.2.2 Su Kaynaklı Isı Pompaları

Kuyulardan, göllerden nehirlerden şehir şebekelerinden ve üretim işlerinden elde edilen su, ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Yıl boyunca su sıcaklığının fazla değişmemesi büyük bir avantajdır. Göl, nehir ve benzeri yerüstü sularında ise, sıcaklık, yıl boyunca kuyu sularına göre daha fazla değişmekle beraber, sıcaklık değişimi havada olduğu kadar olmamaktadır. Kuyu suyundan yararlanıldığında, buharlaştırıcıyı terk eden düşük sıcaklıktaki suyun kaynak sıcaklığını düşürmemesi için, genellikle bir daha kullanılmak üzere, bir başka yere atılması ve bu nedenle kaynağın bol miktarda su içermesi gerekmektedir. Dolayısıyla suyun bir defa kullanılması ve büyük miktarlarda gerekmesi, kuyu suyundan yararlanma olanaklarını azaltmaktadır. Kuyu suyunun maliyeti (sondaj, bakım) küçük tesisler için uygun olmamaktadır. Kaynak olarak su kullanıldığında diğer önemli bir husus

da suyun kalitesi olmaktadır. Su kalite testi kesinlikle yapılmalı ve içerdği mineraller korozyon probleminden ötürü incelenmelidir. Su kaynaklı ısı pompalarının en büyük avantajı ısı değiştiricilerinde, ısı geçişinin daha yüksek olmasıdır [32].

4.2.3 Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

Isı kaynağı olarak toprağın kullanılması diğer sistemlere göre daha pahalıdır. Toprak altına gömülen borulardan doğrudan soğutucu akışkan veya daha ucuz olması bakımından genellikle, salamura geçirilir. Toprak ısı değiştiricileri, yatay ve dikey olmak üzere iki şekilde döşenebilirler.

Toprağın bileşimi, yoğunluğu, içerdği nem miktarı ve gömme derinliği, toprak ısı değiştiricisinin seçimini ve boyutlandırılmasını etkiler. Toprak özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmesi projelendirmede güçlük yaratan sebeplerden birisidir. Aynı biçimde ısı pompası da çalıştırıldığı andan itibaren toprağın özelliklerini etkiler. Toprak kaynaklı ısı pompaları, buharlaştırıcısında topraktan çekilen ısıyı kullanan ısı pompalarıdır. Toprakla olan ısı alışverişi, toprağa yatay veya dikey olarak gömülmüş toprak ısı değiştiricileriyle gerçekleştirilir. Su veya salamura, toprak ısı değiştiricisini oluşturan borulardan geçirilerek elde edilen ısı enerjisi, ısı pompasındaki buharlaştırıcıda soğutucu akışkana aktarılır. Toprak kaynaklı ısı pompalarında ısı kaynağı toprak ise de, ısı topraktan sıvı akışkan vasıtası ile çekildiğinden kullanılan ısı pompaları su (salamura)/hava, su(salamura)/su ısı pompalarıdır [32].

4.2.4 Güneş Kaynaklı Isı Pompaları

Isı kaynağı olarak güneş enerjisinden yararlanmanın en büyük avantajı, ısı pompası buharlaştırıcı sıcaklığının yüksek seçilebilmesine imkân vermesidir. Bu suretle ısıtma tesir katsayısı yükselmiş olur. Güneş enerjisinden yararlanan ısı pompası sistemleri, daha düşük toplayıcı sıcaklığında

çalıştıklarından, toplayıcı verimi diğer güneş enerjisi sistemlerinde olduğundan yüksektir. Kaynak olarak güneş enerjisinden yararlanıldığında iki temel sistem söz konusudur. Bunlar direkt ve endirekt sistemlerdir. Direkt sistemlerde toplayıcılar buharlaştırıcı görevi görür. Endirekt sistemlerde ise toplayıcıdan su veya su buharı geçirilerek kaynak olarak bu akışkanlardan yararlanılır. Ancak, hava kaynağında olduğu gibi, ısı ihtiyacının yüksek olduğu günlerde güneş enerjisi de az olduğundan; ek bir ısıtma tesisatına veya ısınin depolanmasına gerek vardır. Bu ise, pahalı olan sistemin maliyetini daha da artırır [32].

4.3. Isı Pompası Sistemi

Bir soğutma devresinde “soğutkan” adı verilen soğutkanın bir yerde soğutma sağlayarak bir takım durum değişikliklerinden sonra, yeniden başlangıç konumuna gelmesine “soğutma çevrimi” denir. Çevrim sırasında bir miktar soğutkan yoğunlaştırılıyor ve buharlaştırılıyorsa buna; “buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi” denir. Bu tip soğutma çevriminde sistemde kompresör, kondenser, (yoğusturucu) genişletirici (kısmı vanası veya kılcal boru) ve evaporatör (buharlaştırıcı) bulunur.

Sistem elemanları boru ile birbirlerine seri olarak bağlanırlar ve kapalı bir devre oluşturulur. Soğutma devresi olarak oluşturulan kapalı sistemin havası vakum yapıldıktan sonra sistem içerisine bir miktar soğutkan enjekte edilir. Kompresör çalışmaya başladıktan sonra sistem içerisindeki gazı, az bir basınç farkı ile dolaştıracaktır [39].

Genleşme vanasının yavaş yavaş kısıldığı düşünüldüğü taktirde, sistemde iki basınç bölgesi oluşacaktır. Bu basınç bölgeleri; genleşme vanasının gerisinde, kompresörün basma ucuna kadar “yüksek basınç bölgesi” ve genleşme vanasından sonra yine kompresörün emiş ucuna kadar “düşük basınç bölgesi”dir. Genleşme vanası kısıldıkça basınçlar arasındaki oran artacaktır. Yüksek basınç bölgesindeki soğutkan sıkıştırıldıkça sıcaklığı da

artacaktır. Basınç şiddeti sistemdeki soğutkanın ısı özelliğine bağlı olarak, belirli bir basınçta ve çevre sıcaklığından yüksek sıcaklıktaki yoğuşturucuda yoğuşur. Bu yoğuşma sırasında yoğuşma gizli ısıyı açığa çıkar, çevre sıcaklığından yüksek sıcaklıkta olduğu için çevreye ısı atılır [39].

Diğer taraftan genleşme vanasından sıvı halde geçen soğutkan, oluşturulan düşük basınçta ve düşük sıcaklıkta buharlaştırıcıda buhar haline dönüşür. Sıvı halden gaz hale geçen soğutkan buharlaşma gizli ısını buharlaştırıcıdan alır. Buharlaştırıcı sıcaklığı çevre sıcaklığının altında olacak şekilde ayarlandığından, çevreden buharlaştırıcıya ısı akışı olur. Yani; soğutkan buharlaşma gizli ısını çevreden çekerek buharlaşır. Böylece, yoğuşturucudan atılan ısı buharlaştırıcıda sistem tarafından geri kazanılmış olur. Kazanılan bu ısı da akışkana geçer ve buharlaştırıcının bulunduğu ortamda soğuma meydana gelir [39].

Isı pompası, dışarıdan enerji verilmesi ile düşük sıcaklıktaki bir ortamdan aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki ortama veren bir makinedir. Kışın ısıtma maksadı ile kullanılan ısı pompası, yazın da soğutma için kullanılabilir. Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çevrimi gerçekleştirirler, fakat kullanım amaçları farklıdır.

Bir soğutma makinesinin amacı; düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdan ısı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimin tamamlaması için zorunludur. Isı pompasının amacı ise, bir ortamı sıcak tutmaktır. Bu işlevi yerine getirmek için düşük sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan alınan ısı, ısıtılmak istenen ortama verilir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposu genellikle soğuk çevre havası, kuyu suyu veya toprak, ısıtılmak istenen ise kapalı bir ortam ya da herhangi bir akışkan (su, hava vb.) olabilir [39].

Isı pompalarının kurutma işlemlerinde kullanıldığında, enerji verimliliği açısından iyi cihazlar oldukları bilinmektedir. Kurutma uygulamalarında,

yoğuşma gizli ısı ile kondenserde duyulur ısıtma yapması ısı pompalarını etkili kılmaktadır. Günümüzde değerli ürünlerin kurutulmasında ısı pompalarının çok iyi kontrol edilebilmeleri, onları uygulamada daha önemli hale getirmiştir [39].

4.3.1. Isı Pompalarının Temel Tipleri

Isı pompası sistemlerinde, buharlaştırıcıların ısı çektiği ortamlara “ısı kaynakları” denir. Isı pompası için çok önemli olan bu kaynakların ısı pompası ile uyum sağlayabilmesi, kaynak sıcaklığının fazla değişmemesine ve kaynak sıcaklığının mümkün olduğu kadar büyük olmasına bağlıdır. Bir ısı pompasının teknik ve ekonomik performansı, ısı kaynağının karakteristiğine bağlıdır. Sistemlerde kullanılan ısı pompaları; ideal bir ısı kaynağına, ısıtma dönemi boyunca yüksek ve fazla değişmeyen sıcaklığa, bol bulunabilirliğe, aşındırıcı ve kirletici etkenler taşımamasına, uygun termofiziksel özelliklere, düşük yatırım ve işletim maliyetine sahip olmalıdır. Çoğu durumda ısı kaynağının bulunabilirliği, en önemli etken olmaktadır [39].

Isı pompalarında ısı kaynağı olarak:

- Çevre havası
- Toprak
- Deniz, nehir, göl suyu
- Yeraltı suları
- Artık sıvılar
- Artık gazlar
- Artık ısılar
- Güneş
- Kaya

kullanılabilir.

Isı pompaları kullandıkları enerji kaynaklarına göre sınıflandırılır:

1. Havadan - havaya (Akışkan yön değişimi- hava yön değişimi): Sistem bir ortamda havadan aldığı ısıyı başka bir ortamda yine havaya atıyorsa buna “havadan-havaya ısı pompası” denir.
2. Havadan suya - sudan havaya (akışkan yön değişimi): Isı atılan ya da çekilen ortamlardan birisi su, diğeri hava ise buna “havadan suya - sudan havaya” ısı pompası denir.
3. Sudan suya (su yön değişimi): Isı atılan ya da çekilen ortamların her ikisi de su ise buna “sudan - suya “ ısı pompası denir.
4. Havadan toprağa-topraktan havaya (akışkan yön değişimi): Isı atılan ya da çekilen ortamlardan birisi toprak, diğeri hava ise buna “havadan toprağa–topraktan havaya” ısı pompası denir [39].

5. KURUTMA VE KURUTMA SİSTEMLERİ

5.1. Kurutma

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan veya katılardan su veya diğer sıvıların uzaklaştırılmasıdır. Kurutma teriminin en yaygın kullanım yeri katı maddelerden ısı yöntemleri ile su veya uçucu maddelerin buharlaştırılarak uzaklaştırılmasıdır. Kurutma uygulamalarında nemin buharlaştırılması için gereken ısı, kurutulacak maddeyi sıcak gazlarla doğrudan temas ettirerek taşınım veya ışınlama veya kurutulacak maddeyle temas eden katı yüzeyden iletimle transfer edilir [40].

Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) ünitelerin bütününe de “kurutma sistemi” denir. Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin bir çok dalında (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak uygulanmaktadır [41]. Bu alanlarda kurutma işlemi uygulanarak ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma, kullanım ve işleme kolaylığı vb. avantajlar kazandırılması da eklenebilir.

Gıda maddelerinde kurutma işlemi daha çok meyve ve sebzelere uygulanmaktadır. Kuru meyvelerin anavatanı ve binlerce yıllık üretim alanı olan Türkiye’de kuru meyveler tarih boyunca ve günümüzde özellikle dış ticaret gelirlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Türkiye’de kuru meyve yetiştiriciliğinin çok eski ve üretimin fazla olmasında bu meyvelerin kolay hasat, muhafaza ve nakil edilebilir oluşlarının, ekolojik imkanların uygunluğunun ve doğal olarak yetişmiş olmalarının büyük payı vardır.

Kurutma işlemlerinde basit olan fırınlar üreticiler tarafından daha çok tercih edilmektedir. Aynı zamanda sıcaklık, ağırlık ve nem kontrolünün daha basit ve ucuz olduğu sistemler daha çok tercih edilmektedir. Ürünün sisteme

yüklenmesinin ve sistemden boşaltılmasının da kolay olması tercih nedenlerindendir. Ürün kurutulurken harcanan enerji miktarı da son derece önemli olup, bu enerjinin elde edilmesi de, kullanılması da kolay olmalıdır. Yani ürünün kurutma maliyeti mümkün olduğu kadar düşük olmalı ve aynı zamanda kontrollü ve kaliteli bir kurutma yapılmalıdır [39].

5.1.1. Kurutma ile İlgili Temel Kavramlar

Gıdaların kurutulması, insanlığın tabiattan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Gerçekten bu metot tabiatla çoğu zaman kendi kendine gerçekleşmekte ve örneğin, çeşitli tahıllar ve baklagiller tarlada kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir. Doğada kuruma, güneş enerjisiyle gerçekleşmekte olduğundan, kurumanın her yerde ve her zaman bu yolla olması imkansızdır. Her ürünün güneşte kurutulması doğru değildir. Bu yüzden birçok ürünün diğer metotlarla kurutulma yolları geliştirilmiştir [1]. Kurutma işlemi çeşitli ön hazırlık işlemlerinden sonra, kurutulacak ürünün yere, tepsiye veya bir platform üzerine serilmesi ile gölgede hava geçişinin olduğu yerlerde yapılmaktadır [42].

Kurutmanın uygulandığı en yaygın alanlar: gıda sanayi, deri sanayi, tarım sektörü, kimya sanayi, silah sanayi ve orman ürünleri sanayi olarak özetlenebilir. Kurutma proseslerinde ısı ve kütle transferi aynı anda meydana gelir. Kurutma ortamı hava koşulları ve malzeme özellikleri önemli parametredir. Bu nedenle nemli havanın ve kurutulacak malzemenin özellikleri bilinmelidir [40].

Birçok uygulamada, havanın kurutma sisteminde yeniden dolaştırılması ısı verimi artırır. Fazla dolaşım ile oluşan düşük ısı kaybı ile az dolaşım ile oluşan yüksek kuruma hızı, dolaştırılan hava oranı en uygun duruma getirilerek giderilebilir. Kurutma havasının nem içeriği, yeniden çevrimden etkilendiği için, istenilen hava neminin korunması amacıyla zaman zaman analiz

edilmelidir. Havanın soğurabileceği maksimum nem miktarını; yaş termometre sıcaklığındaki doyma nemi ile sisteme sağlanan havanın çiy noktası sıcaklığındaki nemi arasındaki fark verir. Havanın gerçek nem alma potansiyeli ısı ve kütle transferi oranlarıyla hesaplanır ve genelde maksimum değerlerden düşüktür [10].

5.1.2. Kurutmanın İç ve Dış Şartları

Kurutma işlemi gerçekleşirken ürünlerdeki serbest nem kısa sürede atılmakta ve kontrollü olmayan kurutma işleminden ve ürünlerdeki bağlı nemden dolayı kurutma süresi uzamaktadır. Bir kurutma sisteminde harcanan enerji; herhangi bir yakıtın yanmasıyla, alternatif enerji kaynaklarıyla (Güneş, rüzgar vb.), jeotermal enerjiyle, elektrik enerjisi ya da daha başka bir enerji kaynağı ile sağlanır. Kurutma için gerekli olan ısı ihtiyacı bu enerji kaynaklarından karşılanır ve böylece kurutma işlemi gerçekleşir.

Bir ürünün kurutulması sırasında aynı anda iki temel prensip birden oluşur:

1. Sıcak gazdan, kurutulacak ürün bünyesinden buharlaşan sıvıya doğru ısı transferi.
 2. Kurutulacak ürünün iç kısımlarından dış yüzeyine doğru, sıvı ya da buhar olarak, dış yüzeyden sıcak gaz içine doğru ise; kütle transferi işlemleridir [43].
- Bu işlemleri belirleyen şartlar aynı zamanda kurutma işlemlerini de belirleyen şartlardır. Bunlar iki kısımda incelenir:
1. Katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan, iç difüzyon, kılcallık gibi iç şartlar.
 2. Kurutucu olarak kullanılan sıcak gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış şartlardır [43].

Nemli Havanın Özellikleri

Kurutma fırınlarında hava hızının ya da sıcaklığının artması; fırına verilen enerji miktarının artmasını sağlar. Bunun paralelinde, ürün içerisindeki nemin

buharlaştırılması için verilmesi gereken enerji miktarının daha kısa sürede sisteme verilmesiyle, kurutma süresi de kısalır. Kurutma havasının sıcaklığı, nemi ve ürün içerisindeki nem, kuruma hızını (kurutma şiddetini) belirler. Kurutma havasının neminin azaltılması da bu kurutma şiddetini artırarak kurutma süresini kısaltır. Dolayısıyla; kurutma süresinin kısaltılması kuruyan üründen daha erken faydalanılmasını sağlamaktadır. Üründeki serbest nem ve ürün içindeki bağlı nem alınırken ürüne en uygun olan kurutma yöntemini seçmek günümüz enerji ve ekoloji dengeleri açısından oldukça önemli hale gelmiştir. Üründen buharlaştırılan birim miktardaki nem için harcanan enerji miktarı da kurutma sistemlerinde önemli bir kıstasdır [39].

Nem alma ve nemlendirme işlemlerinde saf sıvı faz ve bu sıvı ile tepkimeye girmeyen gaz arasında madde transferi söz konusudur. Bu süreçlerdeki madde transferi bazı prosesler için kolay olmasına karşın bazılarında ise oldukça karmaşıktır. Kurutma işlemlerinde ısı ve madde transferi aynı anda meydana gelir. Sıcak gazdan kurutulan ürüne ısı transferi meydana gelirken kurutulan üründen de gaz akışkana madde transferi meydana gelir. Endüstriyel kurutma proseslerinin çoğunda, ön ısıtılmış hava, kurutma ortamı olarak kullanılır. Kurutulan üründe de nem olarak su bulunur [2].

Ürün ile İlgili Özellikler

Bir katı kururken, iki süreç oluşmakta ve bu süreçlerden birincisi sıvıyı buharlaştırmak için gerekli olan ısı transferi ve diğeri de; buhar ve iç sıvı kütlesinin transferidir. Her bir işlemin oranını belirleyen faktörler kurutma hızını da belirler. Ticari kurutma işleminin en temel amacı; işlem için gerekli ısıyı verimli bir şekilde sağlamaktır. Isı transferi; iletim, taşınım ve ısınım veya üçünün birleşimi şeklinde gerçekleşebilir. Endüstriyel kurutucu tipleri, katıya olan ısı transferi yöntemlerine bağlı olarak değişir. Genelde ısı, önce katının dış yüzeyine sonra da katının içine doğru hareket eder. Bu durumun tersi yüksek frekanslı elektrik akımları aracılığıyla oluşur. Bu durumda iç bölgedeki

sıcaklık dış yüzeyden daha yüksektir ve ısı akışı içeriden dışarıya doğru oluşur [44].

Katı Maddenin Nemi: Kurutma süreçlerinde ısı ve kütle transferi aynı anda gerçekleşir. Kurutulan maddeye kurutma ortamından değişik mekanizmalarla ısı transferi (iletim, taşınım, ışıyım gibi) meydana gelir. Kurutulan maddenin içerdiği nem, sıvı veya buhar halinde maddenin iç kısmından madde yüzeyine ve buradan da kurutma ortamına transfer olur. Kurutulan maddelerin çok değişik yapıya sahip olması (ağaç, kağıt, sebze, meyve gibi) kurutma mekanizmalarının farklı olmasını gerektirir. Kurutucu tasarımı, kurutulan ürünün başlangıç ve son nemliliklerinin bilinmesi önemlidir.

Denge Nemi: Sıcaklığı ve nemi sabit olan bir kurutma havası ile ürün temas haline geçirildiğinde temas süresinin yeterince uzun olması durumunda hava ile temas eden maddenin nemi belli bir değere ulaşır ve değişmez [2].

5.2. Kurutma Sistemleri

5.2.1. Direkt Kurutucular

Bu tip kurutucularda kurutma için gerekli ısıнын transferi ıslak ürün ile sıcak gazlar arasında direkt temas yoluyla gerçekleşir. Buharlaşan sıvı ise kurutma ortamı olan sıcak gazlar tarafından kurutma hacminden uzaklaştırılır. Direkt kurutucular ayrıca taşınım kurutucuları olarak da adlandırılır [45].

Sürekli Kurutucular:

Kurutma işlemi, kurutulacak ıslak ürün beslendiği müddetçe devam eder. İstendiğinde bu tip kurutucular kesikli olarak da çalıştırılabilirler. Sürekli tepsi tipi kurutucular: Sürekli metal kayışlı, titreşimli, tepsili turbo kurutucu örnek olarak gösterilebilir.

Sürekli levha tipi malzeme kurutucuları: Özellikle tekstil ve bazı cins kağıtların kurutulmasında kullanılırlar.

- Pnömatik taşımali kurutucular: Kurutma genellikle yüksek sıcaklıklı ve hızlı gazlarla öğütme işlemi ile birlikte yapılır.

- Döner kurutucular: Malzeme, döner silindir içinde hem taşınır, hem de serbest düşmeyle silindir alt yüzeyine düşer.

- Püskürtmeli (spray) kurutucular: Genellikle süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılırlar.

- Ara dolaşımlı kurutucular (bantlı kurutucular): Bu kurutucularda malzeme sürekli bir iletim bandı üzerinde kurutucu içinde hareket eder ve bu esnada arasından sıcak kurutma havası üflenir [45].

- Tünel kurutucular: Bu tip kurutucularda malzeme bir tünel içinde hareket eden kurutma vagonları içine uygun biçimde yerleştirilir. Vagon tüneli terk ederken başka bir vagon tünele girer [45].

- Akışkan yataklı kurutucular: Akışkanlaştırılmış yatakta tanecik yapısındaki maddeler arasından kurutma ortamı olarak gaz akımı geçirilir.

- Kesikli Kurutucular: Bu tip kurutucular belirli bir zaman aralığında belirli miktarda yaş ürünün kurutulması amaçlı tasarlanır. Kesikli kurutucularda nem miktarı ve sıcaklık koşulları kurutucunun herhangi bir noktasında sürekli olarak değişim gösterir.

- Kesikli çalışan malzeme arasından sirkülasyonlu kurutucular: Malzeme elek yapılı tepsiler üzerindeyken sıcak hava üflenir.

- Tepsi ve kabin tipi kurutucular: Cihaz esas itibariyle dikdörtgen şeklinde bir odadan ibaret olup, bu odanın duvarları uygun bir ısı yalıtım maddesi ile kaplanmıştır. Bu odaların içerisinde tepsilerin yerleştirildiği ve üzerlerinde kolayca kaydığı raflar olabileceği gibi tamamen boş olup, tepsiler vagonlar üzerindeki raflara yerleştirilebilir ve kurutucunun kapıları kapatılır. Havayı tepsiler üzerinde ve kurutucu içerisinde dolaştıracak tedbirler alınmıştır. Bu tip kurutucularda havanın ısıtılması cihaz içerisindeki ısıtıcılar tarafından yapılır ve dışarıdan sıcak hava alınmaz.

- Akışkan yataklı kurutucular: Katı kurutulan maddeler bir sabit tank içinde akışkanlaştırılır. Akışkanlaştırma sıcak gaz akımı ile yapılabileceği gibi ısıtma serpantinleri de kullanılabilir [2].

5.2.2 Özel Kurutucular

- İnfrared (kızılötesi) radyant ısı kurutucular: Isıl ışınlam, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar ve elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanır.

- Dielektrik ısıtıcı kurutucular: Nemli malzeme yüksek frekanslı elektromanyetik alana yerleştirilirse, malzeme içinde ısı üretilir. Nemli bölgelerde kuru bölgelere göre daha fazla ısı üretilir. Bu şekilde malzeme içinde nem profili otomatik olarak düzenlenir. Su, malzeme aşırı derecede ısıtılmaksızın buharlaşır.

- Morötesi radyasyon kurutma: Morötesi kurutmada elektromanyetik radyasyon kullanılır. Monomer yapılı kaplamalar ve boyar maddeler UV radyasyon etkisinde kurutularak işlenir. Morötesi kurutmanın uygulanmasında en büyük sorun yüksek yatırım maliyetidir.

- Mikrodalga kurutma: Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına

uygulandığından bir dielektrik formu olarak nitelenebilir. Mikrodalga kurutma şerit şeklindeki ince malzemelere uygulanır [2].

5.2.3 Endirekt Kurutucular

Kurutmada kullanılan ısı bir ara duvardan geçerek nemli malzemeye ulaşır. Buharlaşan sıvı ise ısıtma ortamından bağımsız olarak kurutma ortamından uzaklaştırılır. Kuruma hızı ıslak malzemenin sıcak yüzeyler ile temasına bağlıdır.

İndirekt kurutucular ayrıca iletim (kondüksiyon) kurutucuları veya temaslı kurutucular olarak da isimlendirilir.

- Sürekli kurutucular: Kurutma malzemesinin sürekli olarak kurutucu içinden geçmesi ve yüzeylerle teması ile gerçekleşir.
- Silindirik kurutucular: Bu kurutucular devamlı bir tabaka halindeki kağıt ve tekstil gibi maddelerin kurutulmasında kullanılırlar.
- Drum kurutucular: Bu kurutucularda ısıtma buhar veya sıcak su ile gerçekleştirilebilir.
- Helezon ileticili kurutucular: Bu kurutucularda süreklilik olmasına karşılık, vakum altında çalışma ekonomik olmaktadır. Kurutmada kullanılan çözücünün geri kazanımı olanaklıdır.
- Buhar borulu döner tip kurutucular: Buhar veya sıcak su kullanılabilir. Çalışma hızlı düşük atmosfer altı basınçta ekonomiktir ve kurutmada çözücünün geri kazanımı gerçekleştirilebilir.
- Titreşimli–tepsili kurutucular: Bu kurutucularda ısıtma buhar veya sıcak su ile gerçekleştirilir.

- Özel tipler sürekli: Kumaş kayış hareket ederek buharla ısıtılan levhalar üzerinden ısıyı alır. Malzeme ise kayış üzerinde bulunurken ısıyı temasla alır ve kurutulur.
- Kesikli kurutucular: Kesikli indirekt kurutucular genellikle vakum altında çalışmaya iyi uyumludur. Bu tip kurutucular ayrıca karıştırmalı veya karıştımsız olarak da sınıflandırılabilirler.
- Karıştırmalı kaplı kurutucular: Bu kurutucular atmosferik veya vakum altında çalışmaya iyi uyumludur. Devamlı çalışan döner bir kurutucuda kurutulamayacak kadar yapışkan olan, tepsi veya kompartıman tipi kurutucuda kurutulacak kadar değerli olmayan pek çok maddenin kurutulmasında, çok değişik tipleri bulunan ve mekanik olarak karıştırılan kurutucular kullanılmaktadır [45].
- Dondurmalı kurutucular: Dondurarak kurutma farmakolojik ürünler, serumlar, bakteri kültürleri, meyve suları, sebze, kahve ve çay özlerinin elde edilmesinde, et ve süt üretiminde uygulanabilir. Malzeme önce dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırıcısı ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan malzemeye iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada uçucu element genellikle su süblimleşir ve yoğunur, ya da nem alıcı madde tarafından absorplanır. Dondurarak kurutma genellikle -10°C ile -40°C arasında uygulanır. Dondurarak kurutma pahalı ve yavaş yürüyen bir işlemdir, ısıya duyarlı malzemeler için uygundur [45].
- Vakumlu döner kurutucular: Atmosfer basıncı altında kaynama sıcaklığına kadar ısıtılmaları sakıncalı olan, hassas maddelerin kurutulması için vakum altında çalışan tek silindirik bir kurutucu kullanılabilir.
- Vakumlu tepsi kurutucular: Pek çok durumlarda maddenin, atmosfer basıncı altında suyun buharlaşacağı sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkta ve kısa

zamanda kurutulması istenebilir. Böyle bir durumda vakum altında çalışan raflı bir kurutucu kullanılır [2].

5.2.4. Güneş Enerjili Kurutucular

Tarım ürünlerinin kurutuldukları dönemlerde kurutma için gereken enerji, yeterli güneş enerjisi olan yörelerde, güneş enerjisinden yararlanılarak sağlanabilmektedir. Güneş enerjisiyle çalıştırılan kurutucuların, güneş enerjisinin günlük ve mevsimlik olarak değişkenlik göstermesi ve düşük enerji yoğunluğu gibi özellikleri nedeniyle geniş toplaç alanları ve güneş enerjisinin yetersiz olduğu saat ve mevsimlerde de kullanılmak isteniyorsa büyük depolama hacimlerine gereksinim duyulması gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır [46].

Güneş enerjili kurutucular temel olarak aşağıda belirtilen şekilde üç ana gruba ayrılabilir:

- Güneş enerjili doğal kurutucular
- Güneş enerjili fanlı kurutucular
- Güneş enerjisi destekli yapay kurutucular.

Güneş enerjili doğal kurutucularda, yalnızca güneş enerjisinden yararlanılır. Herhangi bir yardımcı başka enerji kaynağı yoktur. Güneş enerjili fanlı kurutucularda, güneş enerjisi ile ısıtılan havanın kurutucu içinde dolanımının hızlanması için bir fandan yararlanılır. Güneş enerjisi destekli yapay kurutucularda ise, kurutma havasının ısıtılmasında diğer enerji kaynaklarından da yararlanılmakta, güneş enerjisinin yetersiz kaldığı ya da olmadığı zamanlarda yakıtla çalışan ısıtma düzenleri devreye girmektedir. Kurutma işleminin güneşli kurutucularda yapılması düşünülüyorsa, karar vermeden önce, güneşli doğal kurutucular için güneşte serilerek yapılan kurutma ile güneş enerjili fanlı veya güneş enerjisi destekli kurutucular için

ise bilinen sıcak hava akımlı kurutucularla teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırma yapılmalıdır [2].

Güneş Enerjili Doğal Kurutucular

Bu tip kurutucular herhangi bir yardımcı enerji kaynağına gereksinim göstermediklerinden kırsal kesimlerde rahatlıkla kullanılabilirler. Güneş enerjili doğal kurutucular kendi aralarında pasif ve aktif kurutucular olarak iki gruba ayrılabilir. Pasif tiplere, güneş kabinleri, çadır veya seraları ve baca tipi kurutucuları; aktif tiplere ise güneş pilli bataryalar veya rüzgar enerjisiyle çalışan fana sahip olanlar gösterilebilir [2].

Güneş Enerjili Fanlı Kurutucular

Bu tiplerde, ürünü kurutmada kullanılan havanın kurutucu içindeki dolaşımı elektrik motoruyla çalışan fan yardımıyla sağlanır. Hava giriş ve çıkış kesitleri damperlerle kontrol edilerek, kurutucunun ısıl etkinliği bir ölçüye kadar artırılabilir. Güneş enerjisiyle kurutma yapan fanlı tip kurutucularda ısı depolarından da yararlanılabilir. Güneş enerjisinin yeterli olduğu dönemlerde toplanan ısıнын bir bölümü ısı depolarında depolanır ve gereksinim duyulduğunda, depolanan bu ısı kurutma havasının ısıtılmasında kullanılır. Isı depolama malzemesi olarak su, taş havuzları ve sentetik bazı materyaller kullanılabilir [46].

Güneş Enerjisi Destekli Kurutucular

Bu tip kurutucularda güneş enerjisinin yeterli olduğu dönemlerde kurutma havası doğrudan güneş enerjisiyle ısıtılır. Güneş enerjisinin yetersiz olduğu dönemlerde ise havanın ön ısıtılmasında güneş enerjisinden yararlanılır [46].

5.3. Kurutma Teorisi

Gıda maddelerine uygulanan kurutmanın birçok amacı vardır ve bunların belki de en belirgin olanı, uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma işlemi uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmadan kalmasını, ürünün nemini mikrobiyal gelişme veya diğer reaksiyonları sınırlamaya yeterli seviyeye düşürerek sağlar. Buna ek olarak ürünün nem miktarının düşürülmesi ile aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin muhafazası da sağlanmaktadır. Kurutma işleminin diğer amacı ürün hacmini azaltarak, gıda maddesinin önemli bileşenlerinin taşınmasında ve depolanmasında verimliliği artırmaktır [39].

5.3.1. 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 açılarından incelenebilir [46].

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 ($P_ü$) 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.

Bir gıdanın su aktivitesi (a_w), onun mikrobiyolojik veya kimyasal-biyokimyasal yollarla bozularak kalitesini kaybetmesi üzerinde rol oynayan önemli bir faktördür. Gıdaların içerisindeki nemin bulunduğu ortam havasının bağıl nemi ile dengede bulunmasına “higroskopik denge” denir [46]. 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}). İzotermin DBN eksenine ile arasında kalan bölge içindeki her noktanın P_{ib} 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_{ib} değeri ise P_b den daha büyüktür. Bu bölge, materyalin çevreye nem verdiği şartları belirtmektedir [34].

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.

Kuruma süreci içinde üç karakteristik evreyle karşılaşılmaktadır. Bu evreler,

- Materyalin ısınma evresi (MIE)
- 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 [34].

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 [34].

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. 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 [34].

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. 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 bağılı olarak tabakalar arasındaki konsantrasyon farkı küçölür. Materyal içinde tabakalar arası konsantrasyon farkının azalması, bu etkene bağılı 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 [34].

Bu 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 bağılı değildir. 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.

Azalan hızla kuruma evresi (AHE) sırasında ise, 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 içeriğı 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 [34].

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 azalmasında ve materyal sıcaklığı artışında izlenen düzgünlük değişir. Sıcaklık artışı hızlanırken, kuruma hızı ve nem azalması yavaşlar. Değişim eğrisel bir görünüm alır. 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 [34].

5.3.2. Denge Nemi (DN)

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 [34].

Bir kap içindeki su buharlaşarak kendisini çevreleyen atmosferle dengeye eriştiği gibi, herhangi ıslak bir madde de aynı davranışı göstererek bulunduğu sıcaklıkta kendisini çevreleyen atmosferle nem açısından bir dengeye ulaşır. Her gıdanın belli şartlarda ulaştığı denge nemi farklıdır ve kendine özgüdür. Ürünün sorpsiyon izoterminin belirlenmesi için uygulanan en basit yöntemde, sorpsiyon izotermi saptanacak gıda maddesi, bağıl nemi sabit kalabilen kavanozlarda belli sıcaklıkta, dengeye erişilene kadar tutulur. Bir kavanozda istenen düzeyde nem içeren bir atmosfer oluşturmak için, kavanozun içine konan değişik tuzların çözeltilerinden yararlanılır. Böylece, içindeki atmosfer havasının bağıl neminin sabit kaldığı kavanozlara gıda maddesi uygun bir

şekilde yerleştirilip, 20 °C'deki sorpsiyon izotermi bulunmuş olur. Gerçekte gıdaların sorpsiyon izoterm eğrilerinin belirlenmesinde gıdanın yaş veya kuru olmasının etkisi vardır. Yaş gıdanın nemini vermesi (desorpsiyon) ile, kuru gıdanın nem alması (adsorpsiyon) olgusu tam olarak aynı yolu izleyen bir dönüşüm değildir. Buna göre, ıslak maddenin farklı bağıl nemli atmosferde tutulup, dengeye erişmesi beklendikten sonra tartılarak, ağırlık kaybının saptanmasıyla elde edilen eğriye “desorpsiyon izotermi” denir [39].

Başlangıçta tam anlamıyla kuru olan bir materyalin, yine değişik bağıl nemli ortamlarda tutularak elde edilen eğriye “adsorpsiyon izotermi” denir. Sorpsiyon izotermilerinden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır. Nitekim desorpsiyon izotermi, ürünlerin kurutulma işleminin izlenmesi ve incelenmesinde yararlı bilgiler vermektedir. Adsorpsiyon izotermi ise kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma koşullarını ortaya koymaktadır [43].

5.3.3. 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 [48].

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 [49].

Sabit hızla kuruma evresi süresince,

- Ürün yüzeyinin ince bir su filmiyle kaplı olduğu,
- Kuruma hızının, kurutma havasının sıcaklığından, bağıl neminden ve hızından etkilendiği,
- Kuruma hızının, ürünle ilgili unsurlardan etkilenmediği,
- Ürün yüzey sıcaklığının, kurutma havasının yaşı termometre sıcaklığına eşit olduğu, 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 [34].

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 [34].

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
- 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 [34].

5.3.4. 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 [48].

5.4. Kurutma Hızı

Kurutmacılıkta esas, kurutulacak ürünlerdeki suyu buharlaştırmak, sonra da bu buharı ortamdaki uzaklaştırmaktır. Bu durumda buharlaşma ısısını sağlamak gereklidir. Bu ısı normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak 1 kg su için 590 kcal'dir [49]. Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını belirler. Kaliteli ürün elde edilmesi 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. 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 [39].

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 elde edilmesi 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 [43]. 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 nem içeriği tespit edilebilir.

5.5. 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 [34].

- 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

5.5.1. Basit Kurutma Modelleri

Difüzyon Modeli

Azalan kuruma devresinde katının iç gözeneklerinden yüzeyine doğru sıvı nem akımı meydana geldiğini kabul eder. Elde edilmiş çözümlerin geçerliliği birçok maddenin kurutulmasında deneysel yöntemlerle ispatlanmıştır. Genel olarak bu difüzyon modelinin iç gözenekleri çok küçük olan katılarda geçerli olduğu gözlenmiştir [34].

Kılcal Akım Modeli

Katının iç gözenekleri büyük olursa, katının azalan kuruma devresindeki nem akımının gözenekler arasından kılcal akım mekanizması prensiplerine göre olduğu 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 [34].

5.5.2. 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 [34].

Peck Modeli

Azalan kuruma devresinde kurutma hızını etkileyen faktörlerin sadece katının özelliklerini yansıtan içyapısal faktörlerden olduğu 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 iyi sonuçlar vermiştir [34].

Lykon Modeli

Kurutma sırasında katının içinde oluşan ısı ve kütle transferine ilave olarak hidrodinamik kuvvetlerin etkisi altında meydana gelen üçüncü bir transfer mekanizması bu model de 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 [34].

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 [34].

5.6. Kurutmada Meydana Gelen Başlıca Değişmeler

5.6.1. Fiziksel Değişmeler

Yöresel kuru madde birikimi: Meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında çoğu geri dönüşsüz fiziksel ve kimyasal değişmeler belirmektedir. Bunlardan birisi olan yöresel kuru madde yığılımı, doğrudan doğruya kuru madde yığılımı 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 kurumanın 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 yığılımı 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. [1].

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

tabakalar halinde bulunur. Kurumuş tabakalar büzüşerek 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 [34].

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 cımsı 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 [34].

Kitle yoğunluğunda değişimler: Herhangi bir materyalin birim hacminin ağırlığına kitle yoğunluğu denir. Kurutulmuş bir ürünün kitle yoğunluğu, onun

kurutulmasında uygulanan koşulların bir belirticidir. 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 kurummasına 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 bulunduğu için 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 orijinaline daha fazla benzer. Ancak bunların ambalaj, depo ve taşıma 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 [34].

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 tümden ve hızla eriyip dağılması istenir. Bu niteliğe “instant özellik” denir. Ürünlerin rehidrasyon yeteneği veya instant özelliği kuruma koşulları ile yakından ilgilidir [34].

5.6.2. Kimyasal ve Diğer 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 ısıнын şiddeti, bu değişimlerin düzeyini etkileyen en önemli faktördür. Ancak her kurutulan üründe daima ortaya çıkan olumsuzluk rengin esmerleşmesidir. Renk esmerleşmesi kurutmada 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 gelemmez. 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. SO₂ bir taraftan enzimleri inaktif hale getirmekte, diğer taraftan özellikle enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarını engellemektedir. Kükürt dioksit gazı ayrıca daha önce oluşmuş esmer rengin açılıp düzeltilmesini de sağlamaktadır. Ancak SO₂ , antosiyaninlerle reaksiyona girerek onların renginin kaybolmasına neden olduğundan pembe mor renkli ürünlerde uygulanmazlar [34].

6. ÇAM FISTIĞI KOZALAĞI ve KURUTULMASI

6.1. Çam Fıstığı Kozalağı

Çam fıstığı, fıstık çamının (pinus pinea) kozalaklarından çıkartılan sert kabukların kırılması sonucu elde edilen ve besin değeri oldukça yüksek bir besin maddesidir. Yenilebilir ve yüksek ticari değeri olan bir tohumdur. Yetiştirme yeri bakımından sorun çıkartmayan türlerdendir. Neredeyse her tür toprakta yetişmekte; fakir kumlu, kireçli veya killi topraklarda kurak iklimlerde yetişir. Güneşli yerleri sever, soğuk ve sert iklimlerde gelişemez, ışık isteği fazladır. Ülkemizin şartları, çam fıstığının yetişmesine müsaittir.

Çam fıstığı ağacı özellikle Akdeniz ikliminin görüldüğü yerlerde yetişir; bilhassa Batı Anadolu'da (Ayvalık, Aydın, Muğla) orman oluşturacak kadar yaygındır (Resim 6.1). Kuzeybatı Anadolu'da yetişenler Kozak tipi (Bergama), Aydın ve Antalya'dakiler Aydın tipi, Kahramanmaraş civarında yetişenler de, Maraş tipi çam fıstığı olarak adlandırılır. TSE standartlarına göre de çam fıstığı; Kozak tipi, Aydın tipi ve Maraş tipi olarak üç tipe ayrılmaktadır. Çam fıstığı özelliklerine göre ise tek sınıftır [51].



Resim 6.1 Çam ağacı ve kozalaklar

Çam ağacının; kabuk, katran, reçine, polen, soymuk, tomurcuk ve esans gibi çeşitli ürünlerinden faydalanılmaktadır. Bu ürünlerden biri de çam fıstığıdır. Fıstık çamı, 12–25 m kadar uzayabilen, taç kısmı şemsiyeye benzeyen gösterişli bir ağaçtır. 150 yıl kadar yaşayabilen bu bitki, 7–9 yaşlarından itibaren ‘meyve’ tabir edilen ‘kozalak’ vermeye başlar. (Resim 6.2) Bu kozalaklar, ağaç 10–15 yaşlarına geldiğinde toplanacak duruma gelir. Çam fıstığı, isteğe bağlı olarak kabuklu veya kabuksuz şekilde tüketiciye sunulur. Bu ağaçlardan 70–80 yaşına kadar bol mahsul alınabilir. Üç yılda olgunluğa erişen kozalaklar, üçüncü yılın Kasım–Şubat ayları arasında toplanır [52]. Fıstıkçamı kozalağı olgunlaştıktan sonra toplanması gerekirken, bazı yörelerde erken toplanmaktadır. Dolayısıyla kozalaklar tam olgunlaşmadan toplandığından besin değeri düşmektedir. Ayrıca haşlamadan dolayı, lezzet, aroma ve beyazlığını kaybetmekte, kalitesini yitirmektedir.



Resim 6.2. am fıstığı kozalağı

am fıstığı isteğe göre kabuklu veya kabuğundan çıkartılmış i olarak üretilir (Resim 6.3). Bir ağaçtan yaklaşık 120 kg kozalak, bundan da 6-8 kg i fıstık elde edilir [53]. Nitekim Kozak ve Mazon yörelerinde fıstıkçamı ormanlarında bir ağaçtaki kozalak miktarı 22 ve 56 adet, hektardaki ortalama verim ise 68.3 kg ve 118.5 kg i fıstık olarak belirlenmiştir [54].

İthalatçı lkeler, am fıstığının özellikle beyaz, iri, kırksız, iyi elenmiş, yıkanmış olmasını ve aflotoksin gibi zararlılara karşı sağlık belgesi istemektedirler. am fıstığının ana ihrac limanı İzmir olup, Gaziantep ve İstanbul'dan da ihracat yapılmaktadır.

Çam fıstığı beyazımsı bir renge ve kendine has bir aromaya sahiptir. Enerji verici bir hususiyeti vardır. Bol protein ve mineral ihtiva eder. Bu hususiyetleri dolayısıyla dünyadan haklı bir üne sahip olan bu gıda sağlıklı diyetler için tavsiye edilmektedir. 100 gr çam fıstığı terkininde 44.9 gr yağ- 31.6 gr protein- 5.15 gr karbonhidrat ila vitaminler, mineraller ve su bulunmaktadır. En çok bulunan vitaminler askorbik asit (C vitamini), tiamin (B1 vitamini) ve riboflavindir (B2 vitamini) çam fıstığında doymamış yağ asitlerinden oleik asit ve ginoik asit; doymuş yağ asitlerinden de palmitik asit ve sitearik asit bulunmaktadır [52].



Resim 6.3. Çam fıstığı kozalağı ve içi

Çam fıstığının 100 gramının kalori değeri 583 olarak belirtilmiştir. Çam fıstığı tuberkuloz ve aneminin gelişmesinin engellemeye vesile olmakta; ayrıca damar tıkanıklığı, yüksek tansiyon, oniki parmak bağırsağı, siroz, MS ve mide tedavisinde kullanılmaktadır. Bu gıda pankreas hastalıkları ile romatizmanın tedavisinde de tesirlidir. Çam fıstığının muhteviyatında bulunan doymamış yağ asitlerinden linoleik asit vücutta oluşması muhtemel birçok zehir için panzehir özelliği taşımaktadır. Yağ asitlerinin bir kısmı vücut tarafından üretilmez, yalnızca beslenme yoluyla alınır. Çam fıstığı, vücut için gerekli olan gamma linolenik asid-pinolenik asidin (GLA) mühim kaynaklarından biridir. Çam fıstığı ayrıca GLA'dan başka karoten, çinko, manganez, bakır, potasyum, omega-3, omega-6, fosfor, B, E vitamini ve demir yönünden oldukça zengin, güçlü antioksidanlardan biridir [52].

Çam fıstığı ile alınan linolenik asit vücutta, gamma linolenik asite (GLA) dönüştürülür. Bu, daha sonra vücutta bir dizi reaksiyonla prostaglandinlere dönüşmektedir. Hormonlara benzer tesiri olan ve pek çok metabolik işleme tesir eden prostaglandinler, hücre fonksiyonlarının düzenlenmesinde hayati öneme sahip kılınmıştır. Başta MS (Multiple Skleroz) olmak üzere, kolesterolden zengin diyet, çinko eksikliği, viral enfeksiyonlar, şeker hastalığı, stres, radyasyon, kanser, yaşlılık gibi durumlar bu enzimi bloke eder. Bu sebeple GLA'nın vücuda dışarıdan alınması, tedavide olumlu neticeler vermektedir. GLA ihtiva eden bileşiklerin lâboratuvar şartlarında kanser hücrelerinin ölmesine vesile olduğu tespit edilmiştir. Beyin, prostat ve son olarak meme kanseri hücrelerinde denenmiş olan GLA, İngiltere'de 'göğüs kanseri' olan kadınlarda, Tamoxifen adlı (meme kanserinde kullanılan) hormonal bir ilâçla birlikte kullanılmış ve hastaların bu ilâca cevap verme nispetlerinde artış tespit edilmiştir. Kesin olarak bilinmemekle birlikte, GLA'nın, tümörün beslenmesine ve gelişmesine yol açan damarlanmadaki artışı (anjiogenesis) baskılamaya vesile olduğu tahmin edilmektedir. Bir çalışmada GLA'nın kanser ilâçlarının tümör üzerindeki tesirini artırmada rol aldığı tespit edilmiştir. Meme kanserinde kullanılan Vinorelbin adlı ilâçla birlikte alınan GLA'nın tümör hücrelerinin üremesinin hızlı ve tesirli bir şekilde

durmasına vesile oluğu belirlenmiştir. Başka bir çalışmada ise, GLA'nın tümör hücrelerindeki yapışma (adhezyon) zelliğini, dolayısıyla da tümör hücresinin hareket etme kabiliyetini azaltmada rol aldığı ortaya konulmuştur. Yine aynı araştırmada; GLA'nın tümör hücresi üzerinde lipit peroksidasyonu adı verilen bir mekanizma ile seçici toksisite (zehirleme) zelliği gösterdiği ve tümörün beslenmesini sağlayan damarlanmayı baskılamaya vesile olduğu tespit edilmiştir. İtalya'da yetiştirilen am fıstığının 1.300 adedi 1 kg gelirken, kozak yöresinde yetişen am fıstığının 1213 adedi 1 kg gelmektedir [52].

6.2. am Fıstığı Kozalağının Kurutulması İşlemi

Kurutma; bir madde içinde bulunan sıvının uzaklaşmasıdır. Teknik kurutmada, kuruma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem değişik metotlarla alınır. Bu nedenle kurutma; kuruyacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine belli bir süreçte indirgenmesi olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) nitelerin bütününe de "kurutma sistemi" denir. Kurutulmuş ve kurutulmamış kozalaklar ait resim Resim 6.4'de görülmektedir.



Resim 6.4 Kurutulmuş ve kurutulmamış kozalaklara ait resim

Kozalakların açılmasıyla elde edilen kabuklu çam fıstığına ait resim Resim 6.5’de verilmiştir.



Resim 6.5. Kozalakların açılmasıyla elde edilen kabuklu çam fıstığı

Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin birçok dalında (gıda, kâğıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak uygulanmaktadır [41]. Birçok uygulamada, havanın kurutma sisteminde yeniden dolaştırılması ısı verimi artırır. Fazla dolaşım ile oluşan düşük ısı kaybı ile, az dolaşım ile oluşan yüksek kuruma hızı, dolaştırılan hava oranı en uygun duruma getirilerek giderilebilir. Kurutma havasının nem içeriği, yeniden çevrimden etkilendiği için, istenilen hava neminin korunması amacıyla zaman zaman analiz edilmelidir. Havanın soğurabileceği maksimum nem miktarını; yaş termometre sıcaklığındaki doyma nemi ile sisteme sağlanan havanın çiy noktası sıcaklığındaki nemi arasındaki fark verir. Havanın gerçek nem alma potansiyeli ısı ve kütle transferi oranlarıyla hesaplanır ve genelde maksimum değerlerden düşüktür [10].

Kurutmanın iç ve dış şartları:

Bir ürünün kurutulması sırasında aynı anda iki temel prensip birden oluşur:

1. Sıcak gazdan, kurutulacak ürün bünyesinden buharlaşan sıvıya doğru ısı transferi.

2. Kurutulacak ürünün iç kısımlarından dış yüzeyine doğru, sıvı ya da buhar olarak, dış yüzeyden sıcak gaz içine doğru ise; kütle transferi işlemleridir [43].

Bu işlemleri belirleyen şartlar aynı zamanda kurutma işlemlerini de belirleyen şartlardır. Bunlar iki kısımda incelenir:

1. Katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan, iç difüzyon, kılcallık gibi iç şartlar.
2. Kurutucu olarak kullanılan sıcak gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış şartlardır [42].

Bir kurutma sistemi seçiminde izlenecek yol aşağıdaki gibi olmalıdır [44-55-56]:

1. Uygun kurutucunun araştırılması.
2. Değişik tiplerin ön maliyet analizlerinin yapılması: İlk yatırım ve işletme maliyetleri.
3. Prototip veya laboratuvar ölçeklerinde yapılan kurutma testleri ve bu testler için en uygun donanımın kullanılması (Bazen pilot bir işletme de kullanılabilir).
4. Örneklerin kurutulduğu denemelerin sonuç analizlerinin yapılması.

İşletme ve ilk yatırım maliyetini etkileyebilecek faktörler ise aşağıda verildiği gibidir:

1. Ürün kalitesi (kesinlikle ödün verilmez).
2. Tozlanma, çözücü veya diğer ürün kayıpları.
3. Yer kısıtlamaları.
4. Ürünün yığın yoğunluğu (paketlenme maliyetini etkileyebilir).

7. SİSTEM ANALİZİ

Bu çalışmada öncelikle güneş enerjisi desteği yetersiz olması durumunda sonra da ısı pompası desteği ile her ikisinin de yetersiz olduğu durumlarda elektrikli ısıtıcıların kullanılması ile çam fıstığı kozalaklarının kurutulması amaçlanmıştır.

Güneş dünyanın en önemli enerji kaynağıdır. Diğer enerji kaynakları da güneş enerjisinin türevleridir (rüzgar, bioenerji, hidroelektrik vs.). Güneş ışını ciddi ölçüde enerji taşır. Bu enerji bilinen ölçeklerde atmosfer dışında 1370 W/m^2 , yer yüzünde ise öğle saatlerinde 1000 W/m^2 değerindedir. Bu nedenle güneş enerjisinin çok küçük bir kısmının dahi kullanılabilir enerjiye çevirilmesi dünyanın enerji ihtiyacını karşılayacak büyüklüktedir.

Dünyada mevcut teknolojiler ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan enerji elde etmeye dayanmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması hava kirliliğine ve atmosferdeki karbondioksit oranının artmasına bağlı olarak dünyanın ısısının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtların süratle terk edilmesi bunun yerine doğaya zararı olmayan kaynaklara yönelme zorunluluğu doğmuştur [57].

Bunun için de güneş enerjisi çevreye zarar vermeden kullanılabilecek en önemli kaynaklardan biri olarak görülmüştür. Güneş enerjisini doğrudan kullanabileceğimiz sistemler doğrudan ısı elde edilen ve sıcak su veya buhar üretimi yapılabilen sistemlerle, güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi elde edilebilen fotovoltaik (PV) sistemler en önemli yöntemlerdir.

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre mevcut bulunan güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından yapılan çalışmada Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640

saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışıınım şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Çizelge 7.1.'de verilmiştir [58].

Çizelge 7. 1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

AYLAR	AYLIK TOPLAM (kcal/cm ² -ay)	GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -ay)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
OCAK	4,45	51,75	103,0
ŞUBAT	5,44	63,27	115,0
MART	8,31	96,65	165,0
NİSAN	10,51	122,23	197,0
MAYIS	13,23	153,86	273,0
HAZİRAN	14,51	168,75	325,0
TEMMUZ	15,08	175,38	365,0
AĞUSTOS	13,62	158,40	343,0
EYLÜL	10,60	123,28	280,0
EKİM	7,73	89,90	214,0
KASIM	5,23	60,82	157,0
ARALIK	4,03	46,87	103,0
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	308,0 cal/cm²- gün	3,6 kWh/m²-gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da Çizelge 7.2.'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı [57].

BÖLGE ADI	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m ² -yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G. DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

Çam fıstığı kozalağı kurutma sisteminde kurutma işlemi için gerekli enerji miktarının hesaplanması, ısı pompası sisteminin kapasite hesaplamaları, ısıtma tesir katsayısı, özgül nem çekme oranı, güneş kolektörü verimi hesaplamaları ve çam fıstığı için tam kuru ağırlığın belirlenmesi ile ilgili eşitlikler irdelenecektir.

İlk olarak kurutma odasında çam fıstığı kozalaklarının kurutulabilmesi için sistemde ihtiyaç duyulan toplam enerji miktarı

$$Q_{TOP} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (7.1)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Sistemde Q_1 kurutma odası dış duvarlarının ısıtılması için gerekli olan enerji

$$Q_1 = m_d \cdot c_d \cdot \Delta T \quad (7.2)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Q_2 fırın havasının ısıtılması için gerekli enerji:

$$Q_2 = m_h . c_h . \Delta T \quad (7.3)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Çam fıstığı kozalaklarının ısıtılması için gerekli enerji

$$Q_3 = m_{\phi} . c_{\phi} . \Delta T \quad (7.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Sistemde kurutma odasında kurutulacak üründeki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji

$$Q_4 = S_a . q_{4a} \quad (7.5)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

7.5 nolu eşitlikteki q_{4a} ise

$$q_{4a} = [h''_{ss} - h'_s] \quad (7.6)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [39].

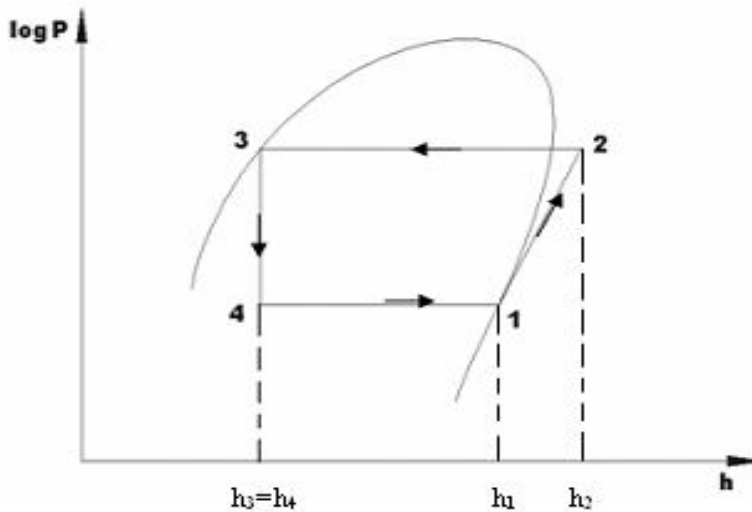
Kurutma sisteminin dış duvarlarından çevre havasına olan ısı kayıpları ise

$$Q_5 = K . A . \Delta T . Z \quad (7.7)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Sistemde gerektiğinde kurutma işlemi için gerekli toplam enerji miktarını ısı pompası sisteminde atılan ısı sağlamalıdır. Hesabı yapılan ve ihtiyaç duyulan bu ısı ihtiyacına göre sistemde gerekli olan kondenser, evaporatör ve kompresör güç değerleri ısı pompası sisteminin çalışma sıcaklık aralıkları belirlenerek hesaplanabilir.

Sistemde kullanılan soğutucu akışkanın log P- h diyagramından yararlanılarak hesaplanabileceğinden ısı pompası çevriminin log P- h diyagramı Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Isı pompası sisteminin log P-h diyagramı

Kullanılan soğutucu akışkanın log P-h diyagramında:

h_1-h_2 : Kompresör giriş-çıkış,

h_2-h_3 : Kondenser giriş-çıkış,

$h_3=h_4$: Genleşme vanası giriş-çıkış

entalpi değerleridir. Kondenser kapasitesi gerekli toplam ısının kompresörün dinlenmesi için %25 fazlası kadar alınarak, sistemde kullanılacak soğutucu akışkan debisi

$$\dot{Q}_K = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (7.8)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Kondenserin kurutma havasına verdiği ısı:

$$Q_{KV} = \dot{Q}_k \cdot F_h \quad (7.9)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanır.

Sistemde gerekli toplam ısı miktarı kondenser kapasitesi kabul edilerek soğutucu akışkan debisi bulunan sistemde, kompresör gücü için de;

$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (7.10)$$

eşitliğinden faydalanılır.

Sistemdeki evaporatör kapasitesi:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (7.11)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Çam fıstığı kozalaklarının kurutulmasında kullanılan sistem ısıtma, soğutma ve nemlendirme (kurutma havasının nemlenmesi) proseslerini içermektedir.

Kütlenin korunumu kanununun genel eşitliği kurutma sistemine uygulandığında:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (7.12)$$

Su buharı için kütle korunumunun genel eşitliği:

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad (7.13)$$

ya da

$$\sum (\dot{m}_{ia} \cdot \omega_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{oa} \cdot \omega_o \quad (7.14)$$

Enerjinin korunumunun genel eşitliği:

$$\dot{Q}_K - \dot{W} = \sum \dot{m}_{ia} \cdot \left(h_{oa} - h_{ia} + \frac{V_o^2 - V_i^2}{2} \right) \quad (7.15)$$

Sistemdeki fandaki kinetik enerji değişimi ve sistemin diğer kısımlarındaki kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Kurutma havasının entalpisi:

$$h = cp T + w h_{satT} \quad (7.16)$$

Nemin çekilmesi için kurutma odasında kullanılan ısı miktarı:

$$\dot{Q}_{Dc} = \dot{m}_{ia} (h_{ia} - h_{oa}) \quad (7.17)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Sistemde kondenserde atılan ısı miktarı ($\dot{Q}_{Cd}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{ia} \cdot c_p \cdot (T_{ia} - T_{aai}) \quad (7.18)$$

$$\dot{m}_{ia} = \rho_{ia} \cdot \dot{V}_i \quad (7.19)$$

Eşitlikte $\dot{m}_{ia}$, kurutma havasının kütleli debisi, c_p , kurutma havasının özgül ısıtma ısı, $\dot{V}_i$, kurutma havasının hacimsel debisi, ρ_{ia} , kurutma havasının yoğunluğu, T_{ia} ve T_{aai} ise sırasıyla kondensere giren ve kondenserden çıkan havanın sıcaklığıdır.

Kondenser sıcaklığı (T_C) ile evaporatör sıcaklığı (T_E) arasında ideal bir soğutma çevrimi için maksimum ısıtma tesir katsayısı ($COP_{c,h}$) Carnot çevrimi ile saptanır.

$$COP_{c,h} = \frac{T_C}{T_C - T_E} \quad (7.20)$$

Normal bir uygulama için, enerji tüketimi sadece ısı pompasının kompresöründe meydana gelmektedir. Sistemde diğer ekipmanlarda söz konusu olabilir örneğin fan, pompa vb.

Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı ($COP_{hp,h}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir [39].

$$COP_{hp,h} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c} \quad (7.21)$$

Bütün sistem için ısıtma tesir katsayısının (COP_{wh}) hesaplanmasında tüketim ekipmanları için (kompresör, fan ve diğer ekipmanlar) aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$COP_{wh} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c + F_1 + F_2} \quad (7.22)$$

Kurutma esnasında kurutma prosesinde kurutma odasında enerjinin kullanılma oranı (EUR_{dc}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$EUR_{dc} = \frac{\dot{m}_{ia} \cdot (h_{ia} - h_{oa})}{\dot{m}_{ia} \cdot c_p \cdot (T_{ia} - T_{aai})} \quad (7.23)$$

Özgül nem çekme oranı (SMER) kurutma sistemlerinde bu oran 1 kg suyu kaldırmak için harcanması gereken enerji miktarı olarak tanımlanır. Bu kompresörün güç girişi ile ilgili olup ($SMER_{hp}$), yada fan gücü ve elektrikli cihazların verimleri tüm sistemin toplam özgül nem çekme oranını verir ($SMER_{oa}$). Bu oranlar aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

$$SMER_{hp} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_c} \quad (7.24)$$

$$SMER_{oa} = \frac{SMER_{hp}}{(1 + \dot{W}_c / \dot{W}_f)} \eta_{el} \quad (7.25)$$

Çam fıstığındaki nem tayini çam fıstığının sıcaklığı kontrol edilebilen bir etüvde (103 ± 2) °C'da, çevre basıncında kurutulması sonunda meydana gelen kütle kaybına dayanarak rutubet muhtevasının belirlenmesidir.

Etüv, elektrikle ısıtılan sıcaklığı kontrol edilebilen hava dolaşımını haiz, sıcaklığı (103 ± 2)°C'da tutabilen bir cihaz olmalıdır.

Etüvün kapağı kapatılır ve numune kurumaya terkedilir. Bu sürenin sonunda etüvün kapağı açılır. Kuru madde kabının kapağı çabucak kapatılır ve soğuması için desikatöre yerleştirilir, oda sıcaklığına kadar soğutulur. Kapağı kapalı olan kuru madde kabı, içeriği ile birlikte 0,001 g yaklaşımla tartılır (M_2). Numunenin rutubet muhtevası yüzde olarak, aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Rutubet muhtevası (\%) = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_1 - M_0)} \times 100 \quad (7.26)$$

Yapılan dört tayinden elde edilen değerlerin ortalaması alınır.

Çam fıstığı kozalaklarının kuru esasa göre hesaplanan su oranı için;

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (7.27)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Çam fıstığı kozalaklarının yaş esasa göre hesaplanan su oranı için;

$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (7.28)$$

eşitliği kullanılmıştır [39].

Kurutmada kütle taşınımı (Kütle transferi):

Isı taşınımında olduğu gibi ısı taşınım katsayısının bulunması kütle taşınımında kütle transfer katsayısının $h_{k\ddot{u}tle}$ (m/s) belirlenmesi, yüzey geometrisi, akış rejimi, akış hızı ve akışkanın özelliğinin ve yapısının değişimi gibi akışkan akış ile ilgili ve karmaşıktır. Bu yüzden kütle transferini bulmak için tıpkı ısı taşınımını bulurken kullandığımız deneysel bağıntılara güvenmek durumundayız.

$$\dot{Q}_t = h_t \cdot A (T_s - T_\infty) \quad (7.29)$$

Isı taşınımı bu bağıntı ile bulunurken, kütle taşınımında;

$$\dot{m}_{taş.} = h_{k\ddot{u}tle} \cdot A \cdot (\rho_{g,s} - \rho_{g,\infty}) \quad (7.30)$$

Burada; $\dot{m}_{taş.}$ buharın yüzeyden akışkana kütle transferidir (kg/s), $h_{k\ddot{u}tle}$ kütle transfer katsayısı (m/s), A yüzey alanı (m²), ρ_v yüzeydeki buharın özkütlesi (kg/m³) ve ρ_v ortamdaki buharın özkütlesidir.

Kütle transfer katsayısının bulunması:

$$\text{Nusselt sayısı } Nu = \frac{h_{taş.} \cdot L_c}{k} \quad (7.31)$$

L_c karakteristik uzunluk ve k akışkanının ısı iletkenlik katsayısıdır.

Isı taşınımında hız ve ısı sınır tabakalarda momentum ve ısı yayılımının bağıntısı;

$$\text{Prandtl sayısı } Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (7.32)$$

olarak tanımlanır ve boyutsuz sayı Prandtl sayısıdır. Kütle taşınımında bunun karşılığı olan boyutsuz sayı Schmidt sayısıdır ve

$$\text{Schmidt sayısı } Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (7.33)$$

olarak tanımlanır. Laminer akışta hız ve ısı sınır tabakaların bağıl büyüklüklerini Pr sayısı belirlerken, hız ve derişim tabakalarının büyüklüklerini Schmidt (Sc) sayısı belirler.

Kütle taşınımında bunun karşılığı olan boyutsuz sayı Sherwood sayısıdır.

$$\text{Sherwood sayısı } S_h = \frac{h_{\text{k\u00fctle}} \cdot L_c}{D_{AB}} \quad (7.34)$$

Burada D_{AB} k\u00fctle yayılım katsayısıdır (m^2/s) ve \u015fu \u015fekilde belirlenir:

$$D_{H_2O-hava} = 1,87 \times 10^{-10} \frac{T^{2,072}}{P} \quad (7.35)$$

Sıcaklık $280 \text{ K} < T < 450 \text{ K}$ arasındadır.

Uygulamadaki \u0f6nemi sebebiyle hava-su buharı yayılımını bir\u00e7ok \u00e7alı\u015fmaya konu oldu\u011fundandır.

$D_{H_2O-hava}$ yayılım katsayısı i\u00e7in bu amprik form\u00fcl\u00fc Marrero ve Masan (1972) geli\u015ftirmi\u015ftir [59]. Burada P atmosferik basın\u00e7 (atm) ve T sıcaklıktır (K). Nusselt ve Sherwood sayıları sırasıyla, y\u00fczeyde ısı ve k\u00fctle transferinin (ta\u015fınımının) etkilerini g\u0f6stermektedir.

Zorlanmış ta\u015fınımda ortalama Nusselt sayısı ile Reynold sayısı ve Prandtl sayılarına ba\u011flı iken zorlanmış k\u00fctle transferinde Sherwood sayısı ile Reynold ve Schmidt sayıları arasında

Nusselt sayısı $Nu = f(Re, Pr)$

Sherwood sayısı $Sh = f(Re, Sc)$

ba\u011fıntısı vardır.

Nusselt ve Sherwood sayıları arasındaki benze\u015fim do\u011fal ta\u015fınım k\u00fctle transferinde de ge\u00e7erlidir.

$Sh = f(Gr, Sc)$ 'dir. Bu durumda Grashof sayısı

$$Gr = \frac{g(\rho_{\infty} - \rho_s) \cdot L_c^3}{\rho \cdot \nu^2} = \frac{g\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (7.36)$$

ifadesi ile bulunur [60].

Eş zamalı ısı ve kütle transferinde ise

$$\dot{Q}_{\text{duyulur, transfer edilen}} = \dot{Q}_{\text{gizli soğ.}}$$

ya da

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \cdot h_{fg}$$

şeklinde yazılabilir.

$\dot{m}_g$ buharlaşma debisi (kg/s) veya yüzeyden taşınım ile transfer edilen kütle debisi (kg/s)'dir. h_{fg} suyun yüzey sıcaklığındaki buharlaşma gizli ısıdır (kJ/kg).

8. KURUTMA SİSTEMİ DENEY DÜZENEGİ

Çam fıstığı kozalakları ya güneşin doğrudan tesiri ile kurutularak ya da kaynatılıp yumuşatılarak patoz makinelerinde dövülme işlemi ile içerisindeki sert kabuklu çam fıstığı çekirdeği çıkartılabilmektedir. Kaynatma yöntemiyle işlenen kozalaklardan elde edilen iç fıstık sararmakta, rengi, kokusu, aroması ve besin değeri düşmektedir. Doğal kurutma yönteminde ise Kasım-Aralık döneminde toplanan kozalaklar ancak Haziran-Temmuz aylarına kadar bekletilip kurutulmaktadır. Her iki yöntemde de ekonomik kayıplar olmaktadır. Bu tez çalışmasında bu olumsuz nedenleri ortadan kaldırmak amacıyla endüstriyel amaçlı ısı pompalı ve güneş enerji destekli bir kurutma yöntemi tasarlanmıştır (Şekil 8.1).

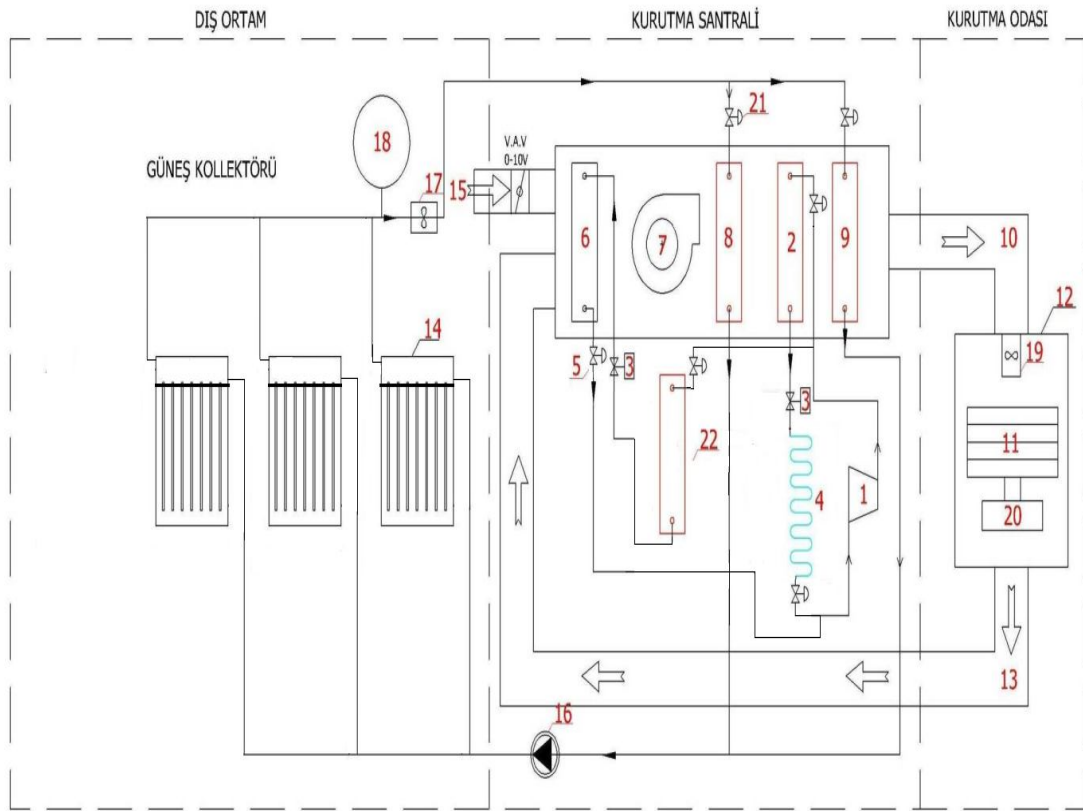
Klasik kurutma sistemlerinde kurutulan ürün üzerinden geçirilen havanın nemi artmakta ve bu sıcak ve nemli hava sistemden atmosfere atılmaktadır. Bu işlem kurutma uygulamalarında enerji kayıplarına yol açmaktadır. Bu çalışmada Şekil 8.1’de görüldüğü gibi kurutma havası resirküle ettirilip, ürünün nem alan hava kurutma santralinde çiy noktası sıcaklığının altına kadar soğutulup havanın soğuk yüzeyde nemi alınacaktır. Soğuyan ve nemi alınan hava güneş kolektörlerinden gelen sıcak suyun gönderildiği Şekil 8.1’de verilen 8 nolu ön ısıtıcı bataryadan geçirilerek duyulur olarak ısıtılacaktır. Daha sonra kondenserde (2 nolu batarya) yine duyulur olarak ısıtılıp kurutma odasına gönderilecektir. Eğer kurutma odasına üflenen havanın sıcaklığı yeterli olmazsa, güneş kolektörlerinden gelen sıcak suyun gönderildiği Şekil 1’de verilen 9 nolu son ısıtıcı bataryadan geçirilerek kurutma odasına gönderilecektir. Şekil 8.1’de verilen 7 nolu fan sistemde hava dolaşımını sağlayacak olup 19 numaralı anemometreden ölçülen hava hızı değeri ve set değeri arasındaki ilişkiye göre frekans invertörü ile devrini ayarlayacaktır.

Sistemde ısı pompası devrede olduğunda, kondenserin daha rahat ısı atabilmesi için güneş enerjisi sisteminin ön ısıtıcısının akışını kontrol eden Şekil 8.1’de verilen 21 nolu selonoid vana ile akış kesilecektir.

Güneş enerjisinin yeterli olmadığı ya da olmadığı zamanlarda sistemin enerji kaynağı ısı pompası sisteminin kondenseri olacaktır. Kondenserde ısıtılan hava kurutma odasına gönderilecek, kurutma odasından çıkan havanın bağıl nemi yüksek ise otomatik kontrol ile iç evaporatör soğutma yapması sağlanarak havanın çiy noktası sıcaklığının altında bir yüzey sıcaklığı elde edilerek havanın nemi alınacaktır. İkinci bir alternatif olarak sistemde kurutma odasından çıkan havanın bağıl nem miktarı yükseldiğinde eğer dış havanın bağıl nemi düşük ise Şekil 8.1’de verilen 15 numaralı değişken hava debisi ayar ünitesi ile gerekirse bir miktar taze hava alınabilmesi de mümkün olacaktır.

Ürün ağırlığı ise loadcell (ağırlık ölçer) ile bilgisayardan kontrol edilerek son nem miktarına gelindiğinde kurutma işlemi sonlandırılacaktır. Sistemde, kurutma havası sıcaklığı, hızı ve bağıl nemi kontrol edilecek ve bu kontrol ile sistem optimum şartlarda çalışabilecek bu da sistemde enerji giderlerini azaltacaktır.

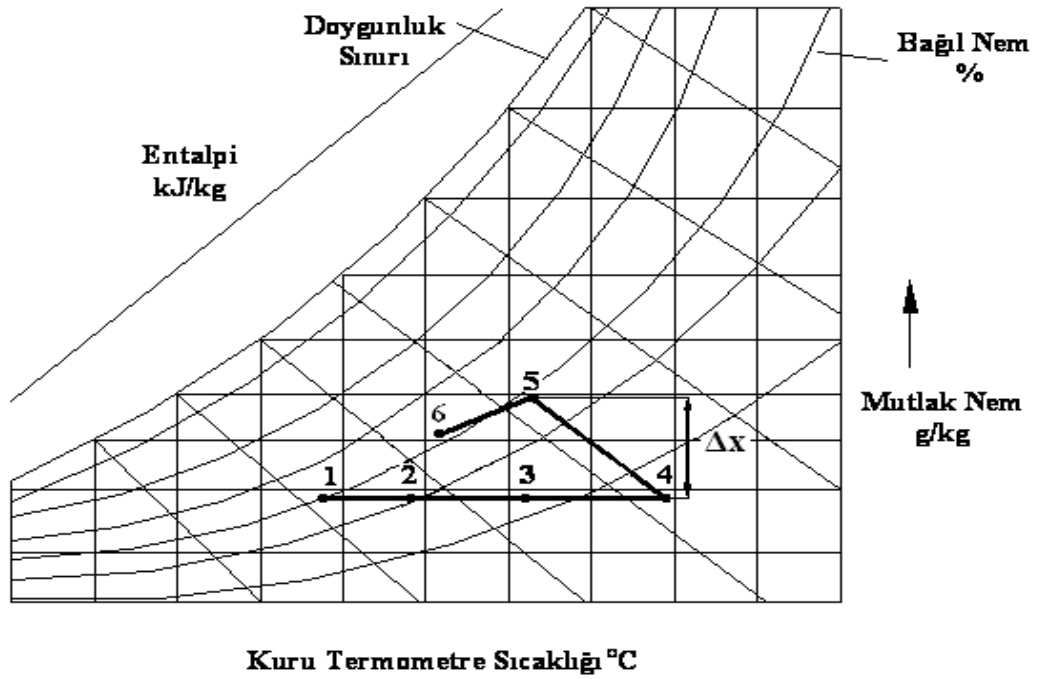
Sistemde kurutulacak ürünün özellikleri de dikkate alınarak bilgisayar yardımıyla gerekli otomatik kontrol yapılarak ürün standartlara uygun ve optimum şartlarda kurutularak çam kozalaklarının açılması sağlanacaktır. Bu yöntemle çam fıstığının son nem miktarına kadar kurutma işlemi gerçekleştirilerek renk, koku, tat ve aroması istenilen şartlarda, doğal kurutmadan hiçbir farkı olmadan, endüstriyel ölçekte 24 saat çalışma prensibine dayalı olarak yaz-kış işletme devam edecek ve ekonomiye büyük katkı sağlayacaktır.



1. Kompresör, 2. İç kondenser, 3. Genleşme valfi, 4. Evaporatör, 5. Selonoid vana (soğutucu akışkan hattı), 6. İç evaporatör (nem alıcı batarya), 7. Fan, 8.-9. Isıtıcı batarya, 10. Kuru hava gidiş kanalı, 11. Kuru raflar, 12. Kuru oda, 13. Kuru santrale dönüş kanalı, 14. Güneş enerjisi sistemi, 15. Değişken debili dış hava kanalı, 16. Sirkülasyon pompası, 17. Debimetre, 18. Genleşme tankı, 19. Anemometre (hava hızı ölçümü), 20. Load cell (ağırlık ölçer), 21. Selonoid vana (sıcak su hattı), 22. Dış kondenser.

Şekil 8.1. Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli çam fıstığı kurutma sistemi

Şekil 8.1’de tasarlanan kurutma sistemin taslak psikrometrik analizi Şekil 8.2’de görülmektedir.



1-2: Güneş enerjisi ön ısıtıcı, 2-3: Kondenser, 3-4: Güneş enerjisi son ısıtıcı, 4-5: Kurutma odası, 5-6: Soğutucu batarya

Şekil 8.2. Güneş enerjisi ve ısı pompası destekli kurutma sisteminin taslak psikrometrik analizi

Şekil 8.2’de görüldüğü gibi 1 şartlarında güneş enerjisi sisteminin ön ısıtıcısına giren hava duyulur olarak ısıtılarak, 2 şartlarında kondensere girmekte ve 3 şartında çıkmaktadır. Sistem havası 4 şartında da güneş enerjisi sisteminin son ısıtıcısını terk etmektedir. 4 şartlarında kurutma odasına üflenen hava Δx kadar nemi artarak kurutma odasını 5 şartlarında terk etmekte ve gerektiğinde son olarak da soğuk yüzeyde nemi alınarak 6 şartına ulaşmaktadır.

Tasarımı, gerekli olan hesaplamaları ve termodinamik ve ısı transferi analizleri yapılan güneş enerjisi ve ısı pompası destekli çam fıstığı kozalağı kurutma fırını bilgisayar kontrolü olarak ve gerektiğinde de uzaktan kontrollü olarak çalışacak ve denetlenebilecek şekilde düşünülmüştür.

Güneş enerjisi ve ısı pompası desteğiyle çalışacak olan kurutma sisteminde kurutma odasında kurutulacak ürün miktarına göre gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. 1200 kg çam fıstığı kozalağı kurutma kapasitesine sahip sistemde bu ürünün sisteme yüklenebilmesi, ürünün boşaltılabilmesi için tek noktadan sabitlenmiş gerektiğinde hareket edebilen bir raf düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu raf düzeneğinin her bir katında yaklaşık 150 kg ürün kurutulabilecektir. (Resim 8.1)



Resim 8.1. Kurutma sistemi raf düzeneği

Kurutma raf sisteminde hava sirkülasyonunun sağlanabilmesi için raflar delikli sacdan imal edilmiştir. Kurutma odasında kullanılan raf sistemine ait resim Resim 8.2’de görülmektedir. Kurutma sisteminde kullanılan raflara ürün yerleşimi hareket edebilen raf mekanizması ile sağlanmıştır. Normalde sabit

olan ve gerektiğinde hareket edebilen noktalardan raf sisteminin hareketi sağlanarak raflara çam fıstığı kozalakları gerektiğinde doldurulup ve gerektiğinde de boşaltılabilecektir.



Resim 8.2 Kurutma sisteminde kullanılan raflara ürün yerleşimi

8 katlı olan bu raf sisteminde ürün kütle değişimini takip edebilmek için bir ağırlık ölçer (load-cell) uygulaması yapılmıştır. 4 adet ağırlık ölçer kullanılarak bir ağırlık ölçme sistemi yapılmıştır. Sistemde ağırlık ölçer kullanılarak 2000 kilograma kadar ağırlık ölçmek mümkün olabilecektir. Ürün kurutulurken raf ile beraber ağırlığı ölçülebilecek, gerektiğinde dara alınabilecek ve gerekli olan son nem miktarına ulaşınca otomatik kontrol ile kurutma işlemi durdurulacaktır. (Resim 8.3)

Raf sistemi ağırlık ölçer üzerine bir kızak ile sürülecek ve gerektiğinde kurutma odasının dışına çıkartılabilecek şekilde tasarlanmış ve imal

edilmiştir. Ağırlık ölçerlerin ısınmaması için ağırlık ölçerler metal bariyer ile kaplanmıştır. Kurutma odası sıcaklığından etkilenmesi böylece aza indirilmeye çalışılmıştır.



Resim 8.3 Kurutma sisteminde kullanılan ağırlık ölçer

Daha sonraki aşamada kurutma odası dış duvarları 6 cm yalıtımlı sandviç panellerden imal edilerek yapılmıştır. Bu paneller birbirine birleştirilerek birleşim noktalarında sızdırmazlık sağlanmıştır. Uygulamada kurutma odasının yalıtımlı olması çevreye olan ısı kayıplarını azaltacaktır. Ön kısmına iki adet kanattan oluşan sağ-sol açılan bir kapı yapılan kurutma odası böylece tamamlanmıştır. (Resim 8.4)

Kurutma odasında kapı ve diğer kısımlarda sızdırmazlık sağlanmıştır. Ağırlık ölçer bağlantısı, raf sistemi, yükleme sistemi ve kurutma odası ile ilgili



Resim 8.5 Sistem kurutma santrali

Kurutma santralinde kullanılan ekipmanların özellikleri Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Kurutma santralinde kullanılan ekipmanların özellikleri

Malzemenin adı	Özelliği
Filtre	Kaba filtre, G4 tipi
Nem alma bataryası	22 kW, çok girişli, bakır boru, alüminyum kanatçıklı, soğutucu gaz için özel imalat
Güneş enerjisi ön ısıtıcı	15 kW, tek giriş tek çıkışlı, bakır boru, alüminyum kanatçıklı, özel imalat
Kondenser	33 kW, çok girişli, bakır boru, alüminyum kanatçıklı, soğutucu gaz için özel imalat
Güneş enerjisi son ısıtıcı	30 kW, tek giriş tek çıkışlı, bakır boru, alüminyum kanatçıklı, özel imalat
Fan	6000 m ³ /h, salyangoz fan, kasnak kayış

	sistemli, değişken devirli
Kompresör	11 kW, 380 V, devri ayarlanabilir, R134 a soğutucu akışkanı ile uyumlu
Santral	Paslanmaz malzemeden özel üretilmiş, sızdırmazlık testi yapılmış
Dış Ünite	Paslanmaz malzemeden özel üretilmiş, sızdırmazlık testi yapılmış

Sistemde filtre havanın temizlenmesi için kullanılmıştır. Nem alma bataryası ise gerektiğinde soğuk yüzeyde havanın neminin alınması için kullanılacaktır. Güneş enerjisi sisteminin ön bataryası üç yollu vana ile ve son bataryası da üç yollu vana ile bağlanmıştır. Sistemde bataryalar sıcaklık değerlerine göre otomatik kontrolle devreye girecektir. Kurutma santralindeki kondenser ise ısı pompası sisteminde kurutma havasının ısıtılması için kullanılacaktır. Isı pompası sistemi havadan-havaya olup soğutucu akışkan olarak R-134'a gazı kullanılmıştır.

Güneş enerjisi sisteminde her biri 200 lt hacme sahip üç depo sıcak su kullanılarak her birinde 24 adet vakum tüpü ile sıcak su üretimi yapılacaktır (Resim 8.6).



Resim 8.6 Güneş enerjili sıcak su üretim sistemleri

Sistemler açık sistem olup genleşme gerektiğinde takviye olacaktır. Depolar şebekeye bağlı olup, flatör ile seviye kontrolü yapılacaktır.

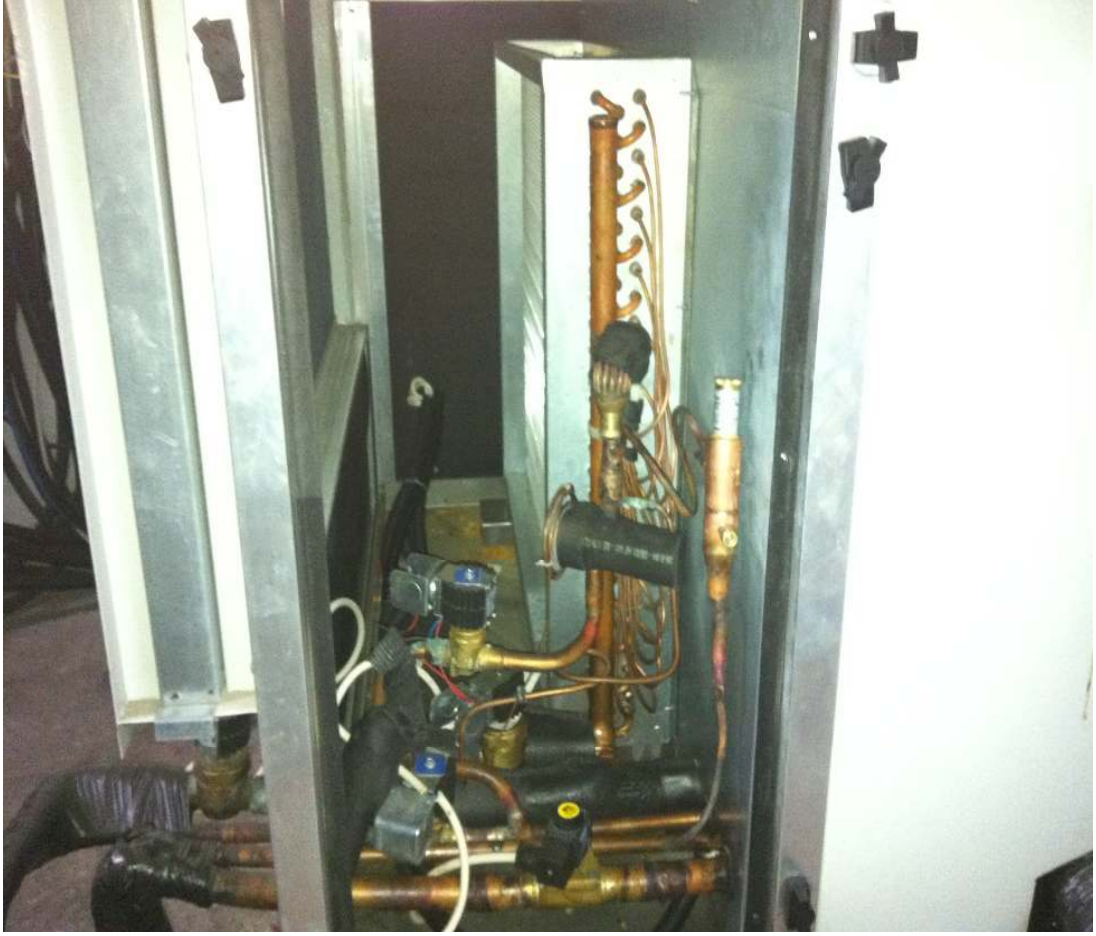
Kurutma sisteminde elde edilen sıcak su yeterli olduğunda otomatik kontrol ile ilk önce güneş enerjisi ön bataryası sonra da gerekli ise son batarya beslenerek kurutma havası ısıtılacaktır. Güneş enerjisine rağmen sıcaklık yeterli değil ise ısı pompası sistemi devreye girerek kurutma havasını ısıtacaktır. Yine de sıcaklık yeterli değilse sistemde bulunan 4 adet 5'er kW gücünde olan elektrikli ısıtıcılar sıcaklık değerine bağlı olarak kademeli bir şekilde devreye girecektir.

Güneş enerjisi sistemi sirkülasyon pompası ise otomatik kontrol ile devreye girecek ve üç yollu vanaların sıcaklığa bağlı kontrolü de sağlanacaktır.

Güneş enerjisi sisteminde 600 litre su, yalıtımlı 3 adet depoda bulunacak, depo edilecek ve gerektiğinde kullanılabilecektir. Sistemde güneş enerjisi ilk

önce değerlendirilecek enerji kaynağı olacaktır. Kurutma uygulaması Aydın İlinde gerçekleştirildiğinden donma riski çok az olduğu için sistemler açık sistem olarak düşünülmüş ve uygulanmıştır.

Isı pompası sisteminde iki adet evaporatör ve iki kondenser ile sistem düzenlenmiştir. Kurutma işleminde kurutma santralinde nem alma işlemi gerçekleşeceğinde iç evaporatör çalışarak (solenoid vanalar ile) kurutma havasından nemi çekecektir. Böylece soğuyan ve nemi azalan havanın tekrar kondenserde duyulur olarak ısıtılması ile kurutma kabiliyeti arttırılacaktır. Eğer havanın neminin alınması söz konusu değilse solenoid vanaların yardımı ile dış evaporatör devreye girerek ısıyı çekecektir (Resim 8.7).



Resim 8.7 Dış evoparatör ve otomasyonu

Sistemde kondenserden atılan ısı ile kurutma havası ısıtılacak ve böylece kurutma işleminin sağlanması devam ettirilecektir. Isı pompası sistemi dış havadan aldığı ısı ile çalışmaya devam edecektir. Isı pompası sisteminde üretilen sıcak havanın sıcaklık değeri yeterli olunca sistem devreden çıkacaktır. Ayrıca ısı pompası sisteminde sistemde gözetleme camı, gerektiğinde soğutucu akışkanı gözetlemek için soğutma devresine konulmuştur.

Yağ ayırıcı, yüksek ve alçak basınç soğutkan depoları ısı pompası sisteminde kullanılmıştır. Yüksek ve alçak basınç transmittirleri ile sistemde basınç değerleri bilgisayardan okunabilecektir.

Bu oluşan değerlere göre yüksek ve alçak basınç değerleri sınırlandırılarak (prosestat mantığındaki gibi) gerektiğinde ısı pompası sisteminin kompresörünün durdurulması sağlanacaktır.

Bütün sistemin otomasyon panosu Resim 8.8’de görülmektedir.



Resim 8.8 Sisteme ait otomasyon panosu

Kurutma santralinde kurutma için istenilen psikrometrik şartlara getirilen hava, kanallar ile kurutma odasına iletilecektir. Kurutma odasına üflenen sıcak ve kuru hava üründen nemi alarak soğuyacak ve tekrar santrale dönecektir. Santralde işlenen hava tekrar kurutma odasına gönderilebilecektir. Sistem bu halinde kapalı devre çalışacaktır. Gerektiğinde de sisteme taze hava alınıp, alınan hava kadar hava da atılabilecektir.

Sistemde ısı üretimi önce güneş enerjisi sonra ısı pompası daha sonra da elektrikli ısıtıcı ile sağlanacaktır. Otomatik kontrol sistemi de bu sıralamayı sorgulayacak bir döngüde kurulmuştur. Bu döngüde önce enerji güneş enerjisi sisteminden sağlanmaya çalışılacak, enerji yetersizse ısı pompası sistemi devreye girecektir. Yine de yetersiz ise elektrikli ısıtıcılar devreye girerek istenilen debi ve sıcaklıkta hava sağlanacaktır.

Sistemde frekans invertörü ile fan ile istenilen hava debisi (üst sınır 6000 m³/h) sağlanabilecektir. Kanal içine yerleştirilen anemometre ile bilgisayar bağlantılı olarak kanaldaki hava hızı da ölçülebilecektir.

Kurutma santralinde her bir ısı değiştirici öncesi ve sonrasında sıcaklık ve bağıl nem sensörü kullanılarak değerler ölçülecek ve bilgisayardan okunabilecektir.

Hava kanallarında olması gereken uygun hava hızı değerlerine göre kanal çapı hesabı yapılarak kurutma sistemine ait hava kanalları projelendirilmiştir. Hesabı yapılan hava kanalları galvanizli sacdan imal edilmiştir. İmalat sonrası kanalların montajı yapılarak ısı yalıtımı sağlaması amacıyla kanallar izole edilmiştir. Daha sonra bu kanalların sızdırmazlık testleri yapılarak hava kanalı uygulaması tamamlanmıştır.

Kurutma odasında havanın ürün ile daha fazla temas edebilmesi ve havanın daha iyi dolaştırılabilmesi için hesaplamalar yapılarak her biri 6000 m³/h debide olan 9 adet eksenel (aksiyal) fan kurutma kabininin içine monte edilmiştir (Resim 8.9). Bu fanlar otomatik kontrol paneline bağlanmıştır.



Resim 8.9 Kurutma odasında kullanılan fanlar

Çam fıstığı kozalağı kurutma sisteminde kurutma santralindeki salyangoz fanın devri bilgisayar ekranından frekans değeri girilerek istenilen değerde tutulabilecektir. Ayarlanan frekans sonrasında kanalda hava hızı değeri anemometre ile okunabilecek ve kanal kesit alanından geçen hava debisi hesaplanabilecektir.

Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklık değeri de bilgisayar ekranından ayarlanabilecek ve sistem istenilen üfleme sıcaklık değerine göre çalıştırılabilecektir. Kurutma sisteminde zamanla havanın bağıl nemi yükseleceğinden set edilen bağıl nem değerine ulaşıldığında santraldeki iç evaporatör devreye girerek soğuk yüzeyde havanın nemi alınacaktır. Böylece kurutma sisteminde bilgisayar ekranından ürün ağırlığı, sıcaklık, hava hızı ve

bağıl nem değerleri hem okunabilecek hem de gerekli kontroller yapılarak sistem çalıştırılabilecektir.

Sistemde yapılan programlama ile kurutulacak ürün istenilen kurutma yapıldığında yani ürün olması gereken son nem miktarına ulaştığında kurutma sistemi durdurulacaktır. Set edilen sıcaklık değerine göre önce güneş enerjisi sonra ısı pompası ve en son da yeterli sıcaklığa ulaşılamadığında elektrikli ısıtıcılar devreye girecektir.

Isı pompası sisteminde ölçülen alçak ve yüksek basınç değerleri bilgisayar ekranından görüntülenerek programlamada set edilen değerler dahilinde çalışması sağlanmıştır. Sistemde yüksek ya da alçak basınç değerlerine ulaşıldığında kompresör devreden çıkartılacaktır.

Ayrıca kompresörün dinlenmesi için sistemde programlama ile 180 saniye saydıktan sonra kompresörün tekrar devreye girmesi sağlanmıştır. Otomatik kontrolle kontaktör bağlantılı olarak dış evaporatör devrede iken fanın da devreye girmesi, çıktığında da devreden çıkması sağlanmıştır. Kompresöre ait resim Resim 8.10'da görülmektedir.



Resim 8.10 Kompresör ve detayı

Sistemde herhangi bir olumsuz duruma karşı üst sıcaklık limit termostatu yerleştirilerek olası bir arıza durumunda sistemin tamamen devreden çıkartılması sağlanmıştır.

Sistemde ısı pompası ile çıkılabilecek üst sıcaklık değeri 55 °C olacak şekilde hesaplama ve tasarımlar yapılmıştır. Bu sıcaklık değerine göre basınç transmitterinden okunan değer ile olabilecek en yüksek basınç değeri arasındaki ilişkiye göre otomatik kontrol ile sistem kompresörü devreden çıkartılacaktır.

Çam fıstığı kozalağı kurutma sistemi hazırlanan program dahilinde internet bağlantısı ile istenilen şartlara göre gerektiğinde uzaktan kontrol edilip çalıştırılabilecektir.

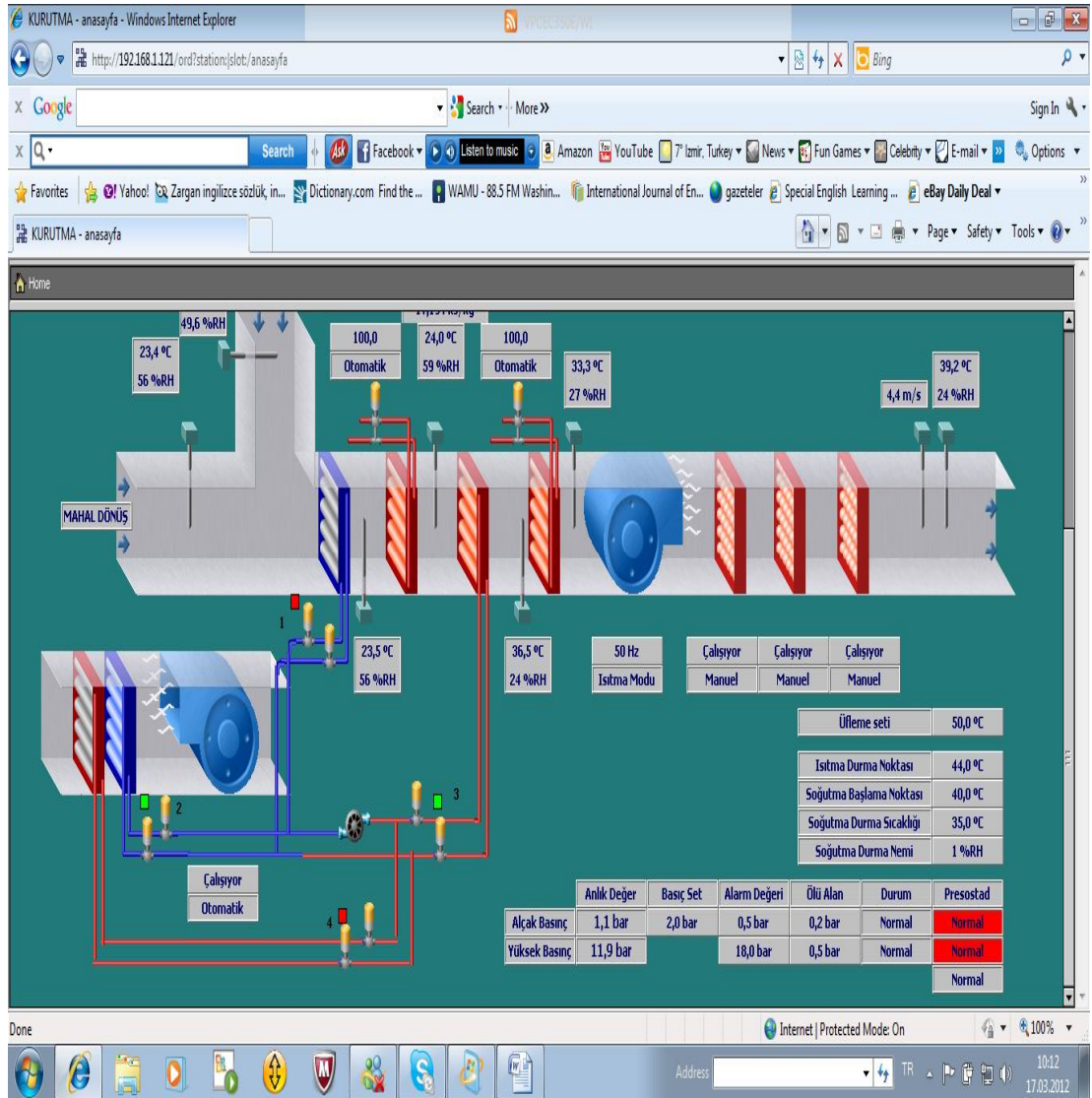
9. DENEYLER VE SONUÇLARI

Tasarlanan ve imal edilen deney setinde sistem kurutmaya etki eden parametrelerin değiştirilip denenmesine uygun şekilde yapılmıştır. Bu parametreler temel olarak kurutma havası sıcaklığı, bağıl nemi ve hava hızıdır.

Sistemde yapılan ön deneylerde 50 °C sıcaklığın üzerinde yapılan deneylerde üründe bozulmaların meydana geldiği görülmüştür. 50 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde yapılan kurutma uygulamalarında kurutma süresinin kısaldığı fakat çam fıstığında bozulmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu bozulmalar ise ürün renginde bir morarmanın meydana gelmesi ve sıcaklık arttıkça bu morarma da artmıştır. 50 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde yapılan kurutma uygulamalarında çam fıstığının tadında istenmeyen değişimler sıcaklık olmuş arttıkça ürün acılaşmış ve kavrulmuştur.

Deneylere başlamadan önce ürünün etüv fırınında tam kuru ağırlığı belirlenerek kuru baza göre başlangıç nem miktarı Eş. 7.27'den 0,26 g su / g kuru madde olarak hesaplanmıştır.

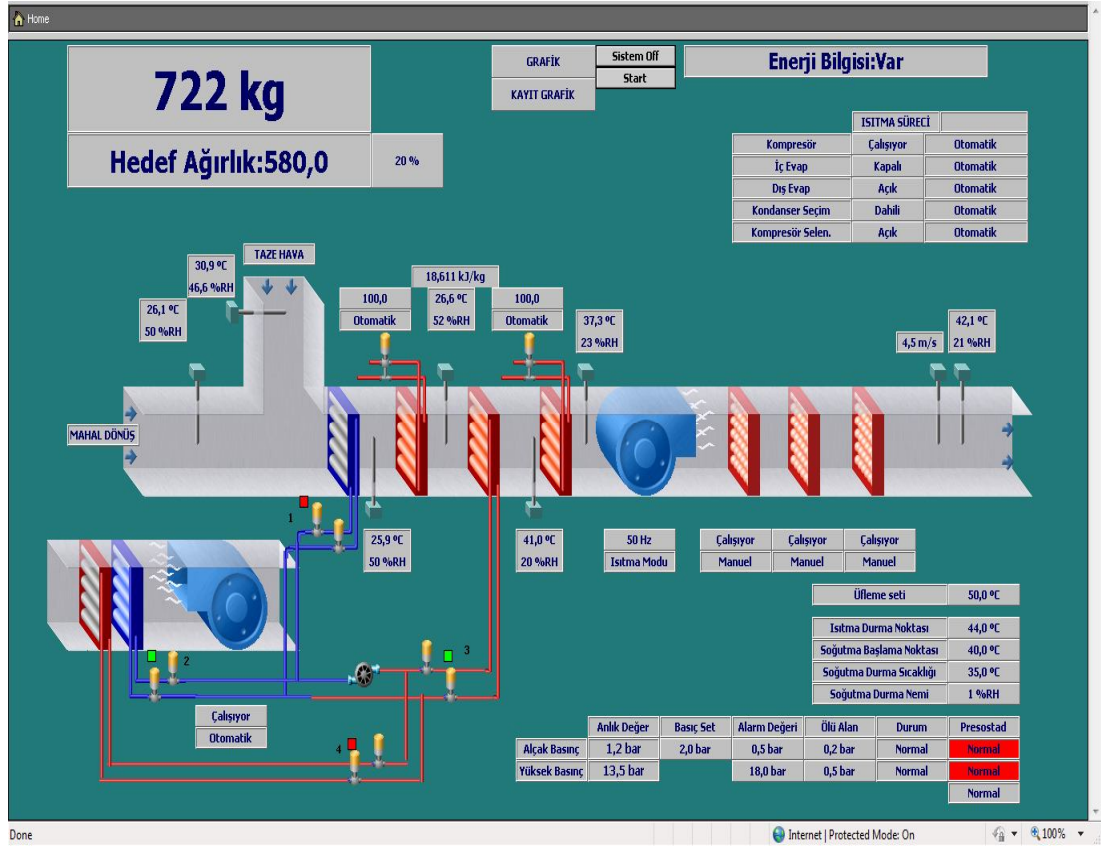
Yapılan ön denemelere göre sistemde nihai deneye başlanmış ve bu deneye ait değer ve sistem parametreleri aşağıda Şekil 9.1'de görülmektedir.



Şekil 9.1. Deneye ait değer ve sistem parametreleri

Şekil 9.1’de görüldüğü gibi sistemde üfleme havası sıcaklığı set değeri 50 °C olarak set edilmiştir. Bu değere göre sistem ekipmanları önce güneş enerjisi desteği sonra ısı pompası daha sonra da elektrikli ısıtıcı desteğiyle çalışacaktır. Sistemde kurutma odasından dönen hava 44°C olduğunda ısıtma prosesleri tamamen devre dışı kalacaktır. Sıcaklık 40 °C’ye düştüğünde iç evaporatör devreye girecek ve sistem fanı 25 hz frekans değerinde çalışarak kurutma havasının nemi soğuk yüzeyde alınmıştır. Bu işlem sıcaklık 35 °C’ye düştüğünde nem alma işlemi tamamlanmıştır.

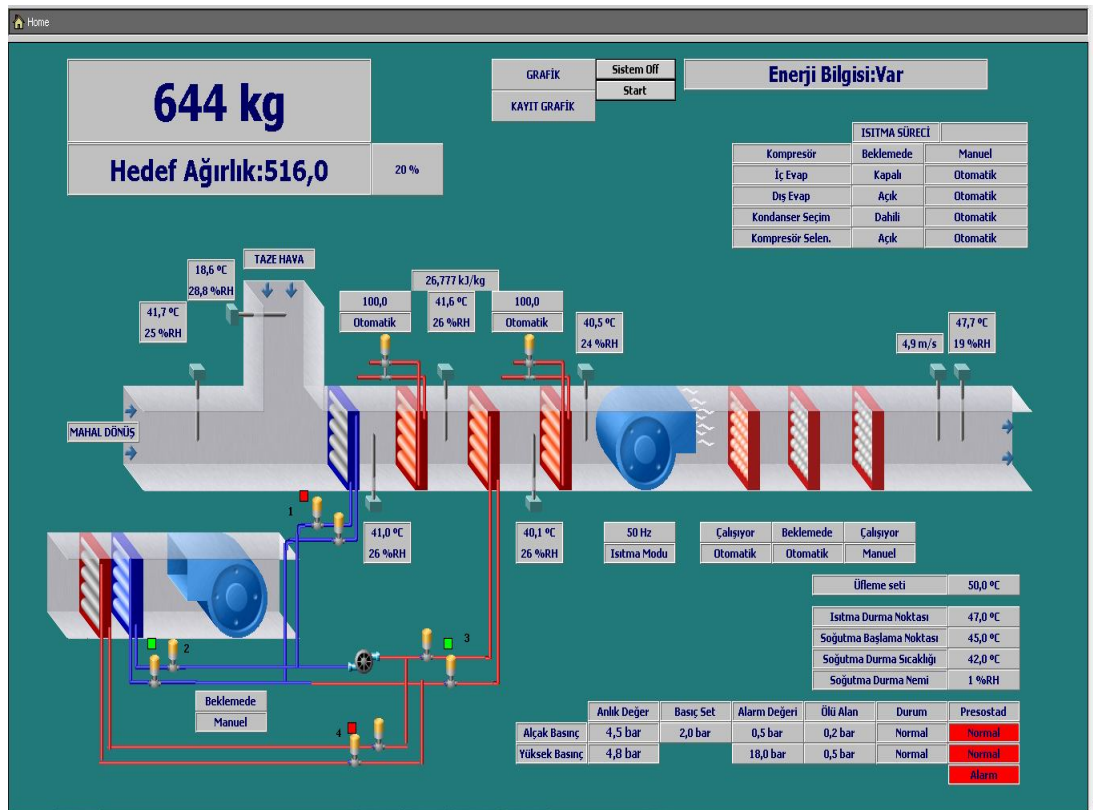
Yapılan deneyler esnasında sistemde set edilen ve ölçülen değerlere ait bir görüntü Şekil 9.2’de görülmektedir.



Şekil 9.2 Deneyler esnasında sistemde set edilen ve ölçülen değerlere ait bir görüntü

Şekil 8.2’de görüldüğü gibi sistem ısıtma modunda, elektrikli ısıtıcılar kontrol dahilinde devrede, fan 50 hz ‘de, ve ısı pompası devrededir. Kurutma işlemi Şekil 9.2’de görülen şartlarda devam etmiştir.

Şekil 9.3’de görülen şartlarda sistemin performansını görebilmek amacıyla ısı pompası devre dışı bırakılmış ve deneyler sürdürülmüştür.



Şekil 9.3. Deneyler esnasında sistemde set edilen ve ölçülen değerlere ait bir görüntü

Şekil 9.3’de görülen şartlarda sistem ısıtma modunda çalışmakta otomatik kontrol ile operatör ısı pompasını devre dışı bırakmış sistem ısı yükü elektrikli ısıtıcılar karşılanmıştır. Görüldüğü gibi ürün ağırlık değişimi bilgisayardan takip edilmiş ve son nem miktarına ulaşıncı kurutma otomatik kontrolle sonlandırılmıştır.

Yapılan deneylere ait sonuçların bir kısmı Çizelge 9.1’de görülmektedir.

Çizelge 9.1. Deneylere ait sonuçlar

Zaman	Enerji tüketimi değişimi (kWh)	Ürün ağırlığı (kg)	Ürün kütle değişimi (kg)	Kurutulan ürün yüzey sıcaklığı °C	Kurutma odası hava sıcaklığı °C	Kurutma odası hava bağıl nemi %
10:00	0	730	0	10,5	11,2	35
11:00	23	728	2	30,1	32,7	28
12:00	18	726	2	33,1	36,4	26
13:00	8	724	2	38,1	41,0	24
14:00	12	720	4	40,2	42,2	23
15:00	12	715	5	42,1	45,7	22
16:00	11	712	3	41,5	43,4	23
17:00	11	705	7	43,9	46,0	21
18:00	9	702	3	44,4	46,8	19
19:00	12	698	4	44,9	45,9	20
22:00	31	688	10	43,5	45,1	21
24:00	24	680	8	41,9	42,0	19
07:00	78	656	24	43,4	45,9	20
08:00	6	653	3	45,1	48,0	17
10:00	15	644	9	44,1	47,4	18
11:00	8	639	5	42,1	43,8	19
12:00	9	634	5	43,4	45,8	20
13:00	8	630	4	45,6	47,9	21
14:00	9	625	5	46,8	48,9	20
15:00	10	620	5	42,1	44,5	19
Toplam	314 kWh	110 kg	110 kg	-	-	-

Yapılan deneyler ve elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuç ve öneriler maddeler halinde sunulmuştur.

- Deney sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda çam fıstığı kozalakları 0,26 g su / g kuru madde nem miktarından 0,07 g su / g kuru madde nem miktarına 29 saatte indirilmiştir. Bu yapılan kurutma işlemi ile ürün işlenecek hale getirilmiştir.
- Deneyler kış sezonunda Aydın ilinde yapılmıştır. Sistem gündüz saatlerinde yeterli enerji olduğunda güneş enerjisi desteğiyle çalışmıştır.
- Deney sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda ısı pompası sisteminin ısıtma tesir katsayısı ortalama olarak 2,75 olarak hesaplanmıştır.
- Deney sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda kurutma sisteminde tüm sistemin özgül nem çekme oranı 0,35 kg/kWh olarak hesaplanmıştır.
- Tarım ürünlerinin istenilen özelliklerde bozulmadan uzun süre saklanamaması, dayanıklılığının arttırılmasının sağlanması, besin ve aroma değerlerinin korunması gibi etkenler kurutmaya olan ihtiyacı göstermektedir. Gıdaların uzun süre saklanabilmeleri için, denge nemi değerine kadar kurutulup, muhafaza edilmeleri gereklidir. Yapılan bu teknik kurutma ile ürün kontrollü olarak kaliteli bir şekilde kurutulabilmiştir.
- Kurutma sonrası yapılan duyusal muayene ile üründe herhangi bir bozulma olmadığı görülmüştür.

- Türkiye’de birçok ürünün kurutulması güneşe serilerek tabii olarak yapılmaktadır. Kontrolsüz olarak yapılan tabii kurutma işlemlerinde ürün daha uzun sürede ve kalitesiz olarak kurumaktadır. Yapılan kontrolsüz kurutma işlemleri ile üründe istenmeyen mikrobiyolojik bozulmalar meydana gelmektedir. Bu çalışma ile bütün bu kusurları ortadan kaldıran bir kurutma prosesi uygulama konulmuştur.
- Kurutma sistemi güneş enerjisi ve gerektiğinde ısı pompası desteğiyle otomatik kontrol ile optimum şartlarda çalıştırılmış bu da enerji giderlerini azaltmış ve enerji verilmiş bir şekilde kullanılarak enerji tasarrufu sağlanmıştır.
- Kurutulacak ürünün özellikleri dikkate alınarak bilgisayar yardımıyla sıcaklık, nem ve hava hızı kontrolü de yapılarak çam fıstığı kozalakları standartlara uygun şekilde teknik kurutma yöntemiyle kaliteli olarak kurutulmuştur.
- Bu maksatla 24 saat çalışma esasına dayalı yani 24 saat kesintisiz çalışabilecek bilgisayar kontrollü bir kurutma sistemi geliştirilmiştir.
- Türkiye için önemli bir tarımsal ihraç ürünü olan çam fıstığının işlenmesi esnasında, kalite kayıplarının sebeplerini ve bozulma mekanizmalarını anlamak, kalitenin yükseltilmesi ve korunması için gerekli önlemlerin alınması açısından önemlidir. Çam fıstığı üretiminde yetersiz olan kurutma ve işleme yöntem ve şartları sebebiyle, özellikle küfler faaliyet göstermekte ürünün aroması bozulmakta, bu da çam fıstığında önemli kalite kayıplarına sebep olmaktadır. Çam fıstığı kozalağının işlenmesinde sadece kurutma işlemi ile değil tamamen kontrollü bir sistem geliştirilmelidir. Böylece hem zaman açısından hem de kalite açısından istenilene ulaşılabacaktır.

- Aynı zamanda Enerji Verimliliği Kanunu kapsamında, enerjinin etkin kullanılması, israfın önlenmesi, enerji maliyetinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi ve çevrenin korunması için enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artması amaçlanmıştır. Bu çalışma ile bilgisayar kontrollü kurutucuda enerji giderleri azaltılmış ve aynı zamanda ürün daha kaliteli bir şekilde kurutulmuştur.
- Yapılan teknik kurutma ile çam fıstığı iç ve dış piyasada hak ettiği yeri bulacaktır. İç piyasadaki ve ihracat değeri de artarak çam fıstığı kurutma ve işleme sistemi istihdam da yaratacaktır.

KAYNAKLAR

1. Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., “Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi” **Gıda Teknolojisi Derneği**, 28, 541 – 542, 544-570, Ankara, (2003).
2. Atalay, Ö., “Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi” **Doktora Tezi**, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2010).
3. Aghbashio, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., “Performance Analysis Of Drying Of Carrot Slices In A Semi-Industrial Continuous Band Dryer, **Journal Of Food Engineering**”, Cilt 91, Sy 99-108, (2009).
4. Lee, K. H., Kim, O. J., Investigation On Drying Performance And Energy Savings Of The Batch-Type Heat Pump Dryer, **Drying Technology**, Cilt 27, Sy 565-573, (2009).
5. Marfil, P. H. M., Santos, E. M., Telis, V. R. N., Ascorbic Acid Degradation Kinetics In Tomatoes At Different Drying Conditions, **LWT-Food Science And Technology**, Cilt 41, Sy 1642-1647, (2008).
6. Li, H., Dai, Y., Dai, J., Wang, X. and Wei, L., “A Solar Assisted Heat Pump Drying System for Grain in-store Drying”, **Front. Energy Power Eng. China**, 4(3): 386–391, DOI 10.1007/s11708-010-0003-3, 2010.
7. Hawlader, M. N.A., Rahman, S. M. A., Jahangeer, K. A., “Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer”, **Energy Conversion and Management**, Cilt 49, Sy 1612-1619, (2008).
8. Hawlader, M., N., A., Jahangeer, K., A., “Solar Heat Pump Drying and Water Heating in the Tropics”, **Solar Energy**, 80(5): 492-499, (2006.).
9. Hawlader, M., N., A., **Engineering Drive**, Department of Mechanical Engineering, National of Singapore, 9: 185-193, (2003).
10. Günerkan, H., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, **Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi**, 36(13): 1-10, Mart-Nisan, (2005).
11. Queiroz, R., Gabas, A. L., Telis, V. R. N., “Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers”, **Drying Technology**, Cilt 22, Sy 1603-1620, (2004).

12. Akpınar, E., K., "Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer", **Int. Comm. Heat and Mass Transfer**, (31)8: 1165-1176, (2004).
13. Toy M., Koç A. B., Hayoğlu İ., Vardin H., " Kırmızı biber kurutmada kullanılan güneş enerjili bir kurutucu performansı", Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümü, **H.R. Ü.Z.F. Dergisi** 8(2): 57-65, (2004).
14. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., "Optimization of Heat Pump Fruit Dryers", **Journal of Food Engineering**, Cilt 59, Sy 369-377, (2003).
15. Saensabai, P., Prasertsan, S., "Effects of Component Arrangement and Ambient and Drying Conditions on The Performance of Heat Pump Dryers", **Drying Technology**, Cilt 21, Sy 103-127, (2003).
16. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., "Optimization of Heat Pump Fruit Dryers", **Journal of Food Engineering**, 59, pp 369-377, (2002).
17. Braun, J., E., Bansal, P., K., Groll, E., A., "Energy Efficiency Analysis of Air Cycle Heat Pump Dryers", **International Journal of Refrigeration**, 25, pp, 954-965, (2002).
18. Chua, K. J., Chou, S. K., Ho, J. C., Hawlader, M. N. A., "Heat Pump Drying: Recent Developments And Future Trends, **Drying Technology**", Cilt 20, Sy 1579-1610, (2002).
19. Olgun, H., Rzayev P., "Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması" **Tr. J. Engin. Environ. Sci.**, Tübitak, 24: 1-14, (2000).
20. Chou S.K. , Hawlader M.N.A. , Ho J.C. and Chua K.J.. 1998, "On the Study of a Two-Stage Heat Pump Cycle for Drying of Agricultural Products", **Proceedings of the ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology Phitsanulok Thailand**. June 3–5, Thailand().
21. Chua K.J. , Chou S.K. , Hawlader M.N.A. and Ho J.C., A Two-Stage Heat Pump Dryer for Better Heat Recovery and Product Quality", **Journal of the Institute of Engineers**, Singapore, 38(6), pp.8-14, (1998).
22. Chua K.J. , Mujumdar A.S. , Chou S.K. , Hawlader M.N.A. and Ho J.C.. "Heat Pump Drying of Banana, Guava and Potato Pieces: Effect of Cyclical Variations of Air Temperature on Convective Drying Kinetics and Colour Change, **Drying Technology**, 18(5), (2000).

23. Coşkun, S., “Isı Pompası Yardımıyla Sürekli Kurutma Sisteminin Simülasyonu”, **Doktora Tezi**, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, (2000).
24. Prasertsan S. , Saen-saby P. , Prateepchaikul G. and Ngamsritrakul P., Heat Pump Dryer Part 3: Experiment Verification of the Simulation, **International Journal of Energy Research**, 21 pp.1-20, (1997).
25. Prasertsan S. and Saen-saby P., Heat Pump Drying of Agricultural Materials, **Drying Technology**, 16, pp. 235-250, (1998).
26. Vazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., Cruz, E., “Grape Drying in a Pilot Plant with a Heat Pump”, **Drying Technology**, Cilt 15, Sy 899-920, (1997).
27. Fırat, Y., “Dikey Konumdaki Saydam İki Levha Arasındaki Hava Akımının Güneş Enerjisi ile Isıtılması ve Kurutma Sistemlerine Uygulanması”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **Yüksek Lisans Tezi**, Ankara, (1997).
28. Güngör, A., Özbalta, N., Endüstriyel Kurutma Sistemleri, **III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi**, İzmir, (1997).
29. Strommen I. and Kramer K., New Applications of Heat Pumps in Drying Process, **Drying Technology**, 12 pp. 889-901, (1994).
30. Coşkun, S., “Kurutma İşlemlerinde Isı Pompası İle Enerji Tasarrufu Sağlanmasının İncelenmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, (1993).
31. Güngör, A., Yaşartekin, Y., “Dikey Eksende Güneşi İzleyen Kabinet Tipi Bir Kurutucuda Elma Kurutulması”, **Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü**, İzmir, 1-3, (1991).
32. Siyahhan, Z., “Güneş Enerjisi Kaynaklı Isı Pompası Destekli Isıtma Sistemlerinin Termodinamik ve Termoekonomik Analizi” **Doktora Tezi**, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2009).
33. Yamaç, Ö., “Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalarının Teorik İncelenmesi” **Yüksek Lisans Tezi**, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antakya, (2005).

34. Çakmak, G., “Çekirdekli Üzüm Kurutmada Güneş Enerjisi Destekli Dönel Akışlı Kurutucu Tasarımı” **Doktora Tezi**, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, (2007).
35. Düzer, İ., “Güneş Enerjisi ile Kurutma”, **Yüksek Lisans Tezi**, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Gebze, (2003).
36. Close, D.J., Yusoff, M.B., The effects of air leaks on solar air heater behaviour, **Solar Energy**, 20, 459-463, (1978).
37. Ezeike, G.O.I., Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system, **Energy in Agric**,5,1-20, (1986).
38. Ekechukwu, O.V., Norton, B., Review of Solar-Energy Drying Systems II: An Overwiev of Solar Drying Technology, **Energy Conversion and Management**, 40, 615-655, (1999).
39. Aktaş, M., Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Doktora Tezi**, Ankara, 70-85, Mayıs 2007.
40. Güngör, A., Özbalta, N., Kurutmanın Temelleri ve Endüstriyel Kurutucular Kurs Notları , **IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi**, İzmir, (2009).
41. Ceylan, İ., Doğan, H., “Nem Kontrollü Kondenzasyonlu Kereste Kurutma Fırını”, **II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi**, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 155-166, (2004).
42. Bulduk, S., “Gıda Teknolojisi”, **Detay Yayıncılık**, Ankara, (2002).
43. Demirtaş, C., “Fındık kurutma şartlarının belirlenmesi”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **Doktora Tezi**, Trabzon, (1996).
44. Industrial Drying Systems, **ASHRAE Applications Handbook**, (SI), Chapter 28, 1-2, (2003).
45. Mirza, M., Isı Pompalı Kurutucun Isıl Tasarımı, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Yüksek Lisans Tezi**, İzmir, (2006).
46. Yağcıoğlu, A., Tarım Ürünlerini Kurutma Tekniği, **Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları**, No: 536, İzmir, (1999).
47. Anthony J., Fontana Jr. Ph.D., “Water activity’s role in food safety and quality”, **Presented at the second NSF International conference on food safety**, Savannah, GA, USA, 1, (2000).

48. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C. W., Drying Cereal Grains, **The AVI Publishing Company**, Westport, Connecticut, (1974).
49. Hall, C. W., P.E., Drying and storage of agricultural crops. **The AVI publishing company**, Westport, Connecticut, (1980).
50. Gürses, Ö.L., Gıda işletme mühendisliği-II, **A.Ü. Ziraat Fakültesi yayınları**, No:963, Ankara, (1986).
51. TSE, Çam Fıstığı Standardı, **TS 1771**, ICS 67.220.10, Ankara, (2003).
52. İsmail Şafak, Taner Okan, "Kekik, defne ve çam fıstığının üretimi ve pazarlaması", Doğu Akdeniz Ormancılık Araştırma Müdürlüğü, **DOA Dergisi (Journal of DOA)**, Sayı: 10 sayfa: 101-129, (2004).
53. OGM, Ülkemizdeki Bazı Önemli Orman Tali Ürünlerinin Teşhis ve Tanıtım Kılavuzu, **Orman Bakanlığı Yayın No:659**, Seri No:18, 89 Sayfa, Ankara, (1987)
54. Bilgin, F., Ay, Z., Ege Bölgesinde Çam fıstığı İşletmeciliği Üzerine Araştırmalar. Orman Bakanlığı Ege Ormancılık Araştırma Müdürlüğü, **Orman Bakanlığı Yayın No:045**, 49 Sayfa, İzmir, (1997).
55. Friedman S., J., "Steps in the Selection of Drying Equipment", **Heating and Ventilating**, 95, (1951).
56. Parker N., H., "Aids to dryer selection", **Chemical engineering**, 70, 115, (1963).
57. www.solarjen.com.tr, 2011.
58. www.eie.gov.tr "Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü", Güneş Enerjisi, 2011.
59. T.R.Marrero and A.E. Manson. "Gaseous Diffusion Coefficients", **Journal of Phys. Chem. Ref. Data**, p 3-118, 1972.
60. Yunus A., Çengel, "Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım", Üçüncü Baskı, Güven Yayınevi, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : POLAT, Turgay
 Uyuşu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 04.04.1970 Ankara-Bala
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 359 2160
 e-mail : turgaypolat@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üni. Makine Eğitimi Böl.	1996
Lisans	Erciyes Üni. Makine Mühendisliği Böl.	1994
Lise	Keçiören Lisesi	1988

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1994-1999	Gazi Üniversitesi	Arş. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Şahin, H. M., Koçak, S., Aktaş M., Polat T., “Güneş Enerjili Bir Endüstriyel Kurutma Sisteminin Enerji Analizi”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası 5. Güneş Enerjisi sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, s 216-225, 7-8 Ekim 2011, Mersin, Türkiye.

2. Şahin, H. M., Koçak, S., Aktaş M., Polat T., “ Bilgisayar Kontrollü Isı Pompalı ve Güneş Enerjili Endüstriyel Kurutma Sistemi Tasarımı”, TMMOB

Makine Mühendisleri Odası VI. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, s 310-320, 21-22 Ekim 2011, Kayseri, Türkiye.

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Futbol, Tenis