

# GÜNEŞ ENERJİSİ VE ISI POMPALI KURUTUCUDA DİLİMLENMİŞ KİVİ KURUTULMASI

Mustafa AKTAŞ<sup>1</sup>, M. Çağatay KARA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara,

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknikokullar, Ankara.

[mustafaaktas@gazi.edu.tr](mailto:mustafaaktas@gazi.edu.tr), [muhammedkara\\_29@hotmail.com](mailto:muhammedkara_29@hotmail.com)

(Geliş/Received: 12.03.2013; Kabul/Accepted: 05.09.2013)

## ÖZET

Güneş enerjili ve ısı pompalı bir kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve kivi kurutulmuş deneysel olarak incelenmiştir. 5 mm kalınlığında dilimlenmiş kiviler 6 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 35 °C sıcaklıkta 0,53 g su/g kuru madde, 40 °C sıcaklıkta 0,25 g su/g kuru madde, 45 °C sıcaklıkta 0,14 g su/g kuru madde ve 50 °C sıcaklıkta 0,15 g su/g kuru madde nem miktarına kadar kurutulmuştur. Kiviler, 35 °C, 40 °C, 45 °C ve 50 °C kurutma havası sıcaklığında ve değişken hava hızlarında (0,1-1,0 m/s) ve sırasıyla 8,5 saat, 7,5 saat, 7,5 saat ve 6,5 saatte kurutulmuştur. Isı pompası performans katsayısı ( $COP_{hp,h}$ ) ve tüm sistemin ısı pompası performans katsayısı ( $COP_{ts}$ ) bütün deneyler için ortalama olarak sırasıyla 2,90 ve 2,27 olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, bütün deneyler için ortalama olarak dalgalı kanatçıklı havalı güneş kolektörü verimi % 56,7 olarak hesaplanmıştır. Bu deneysel çalışma ile, kivi kurutulması için uygun kurutma havası sıcaklık değeri 50 °C olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kanatçıklı güneş kolektörü, kivi kurutma, enerji analizi, değişken hava hızı

## SLICED KIWI DRYING IN A SOLAR ENERGY AND HEAT PUMP DRYER

### ABSTRACT

A solar energy and heat pump dryer was designed, manufactured and investigated experimentally by drying kiwi. Kiwis sliced into 5 mm thickness were dried from initial moisture content 6 g water/g dry matter to final moisture content at 35 °C - 0,53 g water/g dry matter, at 40 °C - 0,25 g water/g dry matter at 45 °C - 0,14 g water/g dry matter and at 50 °C - 0,15 g water/g dry matter. Kiwis were dried at the temperature of drying air 50 °C, 45 °C, 40 °C and 35 °C, variable air velocity (0,1-1,0 m/s) and 8,5 hours, 7,5 hours, 7,5 hours and 6,5 hours, respectively. Coefficient of performance of heat pump ( $COP_{hp,h}$ ) and whole system coefficient of performance of heat pump ( $COP_{ts}$ ) were calculated as average 2,90 and 2,27 for all experiments, respectively. Average efficiency of wavy finned air solar collector was calculated as 56,7% for all experiments. The appropriate drying air temperature has been determined as 50 °C for kiwi drying with this experimental study.

**Keywords:** Finned solar collector, kiwi drying, energy analysis, variable air velocity

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kurutma işlemi ile ürünlerin (gıda maddelerinin) uzun süre bozulmadan kalması ve nem miktarının düşürülmesine rağmen ürünün aroma ve besin değeri gibi özelliklerinin korunması da sağlanır. Kivi üreticiliğinde, hasat edilen kivilerin uzun süre muhafaza edilmesi büyük bir problem olarak üreticilerin karşısına çıkmaktadır. Genellikle soğuk hava depolarında saklanan kiviler önemli ölçüde enerji

ve yer sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunlar, üreticiyi üretmiş olduğu kivileri piyasa değerinin altında satmaya zorlamaktadır.

Phani ve Greg (2005) kapalı çevrimli sürekli akışlı ısı pompası destekli kurutma sistemini test etmişler ve bu sistemde ürün kalite optimizasyonu için düşük sıcaklıklarda kurutulması gereken (30°C-35°C) bitkileri kurutmuşlardır. Özgül nem çekme oranını (SMER) 0,06-0,61 kg/kWh arasında hesaplamışlardır.

Ürün kurutmasında elektrikli tel ısıtıcı konvansiyonel sistem ile ısı pompası sistemi karşılaştırıldığında ısı pompalı sistemde kullanılan enerjinin de %22 azaldığı görülmüştür [1]. Darıcı ve Şen (2011) kurutma havası hızının kurumaya olan etkisini incelemek amacıyla 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki kivi dilimlerini 60°C kurutma havası sıcaklığı ve %10 bağıl nemde 0,5, 1, 1,5 ve 2 m/s hava hızlarında kurutmuşlardır. Kurutma havası hızının 1 m/s'ye kadar olan değerlerinde kuruma süresinin artan hız ile azaldığı, 1 m/s' den daha büyük değerlerinde ise, kuruma süresinde önemli bir değişimin olmadığını belirlemişlerdir [2]. Koç ve ark. (2004), meyve ve sebze kurutmak üzere geliştirilen güneş enerjili bir kurutucuyu 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 [3].

Şevik (2013) çift geçişli havalı güneş kolektörü kullanarak 50 °C kurutma havası sıcaklığında havuç dilimlerini kurutmuştur. Havuç dilimleri 7,76 g su/g kuru madde nem miktarından 0,1 g su/g kuru madde nem miktarına 220 dakikada indirilmiştir. Kolektörün ısı verimini %60-78 arasında hesaplamıştır [4]. Orikasa ve diğerleri (2008) sıcak hava ile kurutma sırasında kivi meyvesinin kuruma karakteristiklerini belirlemişlerdir. 10 mm kalınlığında dilimlenmiş kivileri 40, 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarda kurularak L-askorbik asit değişimini incelemişlerdir. Sıcak hava ile kivi kurutulurken ayrışma için aktivasyon enerjisi 38,6 kJ/mol olarak belirlenmiştir [5]. Goh ve diğerleri (2011) kurutma uygulamalarında kullanılan ısı pompası sistemlerini detaylı olarak incelemiş ve analiz etmişlerdir. Kurutma uygulamalarında kullanılan ısı pompası sistemlerinde verim artışını sağlayacak gelişmeler ile enerji tüketiminin azalacağını ifade etmişlerdir [6]. Maskan (2001) mikrodalga ve sıcak havalı kurutucuda kivi kurularak renk değişiminin kinetiğini incelemiştir. Sıcak hava ile kurutmanın mikrodalga kurutmaya göre kivi meyvesinin rengine az olumsuz etkiye sahip olduğunu belirtmiştir [7]. Li ve ark. (2010) tarafından bir tahıl ambarı için üretilen güneş destekli ısı pompası kurutma sistemi tasarlanmış ve birim enerji tüketim performansı incelenmiştir. Konvansiyonel yöntem ile karşılaştırıldığında nem içeriğinde istikrar, düşük güç tüketimi ve kısa çevrim süresi elde edilmiştir. Ünitinin güneş fraksiyonu % 20'den daha yüksek, sistem performans katsayısı 5,19 ve SMER 3,05 kg/kWh olarak elde edilmiştir [8].

Bakırcı ve ark. (2009) güneş enerjisi destekli ısı pompası sisteminin analizini yapmıştır. Sırasıyla ısı pompasının ve tüm sistemin ortalama performans katsayıları 4,2 ve 3,6 olarak bulunmuştur [9]. Hawlader ve ark. (2006) ısı pompası ile kurutulmuş

gıdaların analizlerini yapmıştır. Yapmış oldukları kurutucuda yaklaşık 45 °C sıcaklıkta ve % 10 bağıl nemde yapılan kurutmada ürünlerin iyi fiziksel özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir [10]. Fudholi ve diğerleri (2010) tarım ve deniz ürünlerinin kurutulması için güneş enerjili kurutucuları incelemiş ve analiz etmişlerdir. Güneş enerjili kurutma sistemlerini kolektör tasarımı, yüksek verimlilik, enerji depolama ile uyumluluk ve uzun ömür gibi faktörler açısından analiz etmiş ve gruplandırmıştır [11]. Lewicki (2006) daha kaliteli kurutulmuş ürünler elde etmek için sıcak havalı kurutma sistemi tasarımı yapmıştır. İyi bir kurutucu tasarımı için kurutmanın bütün evrelerinin göz önünde bulundurulması gerektiğini ifade etmiştir [12]. Kavak Akpınar (2010) güneş enerjili kurutucuda ve açıkta nane yapraklarını kurutmuş, modelleme ve performans analizi yapmıştır. Analiz sonucunda ekserji verimi %34,76 ile %87,717 ve enerjinin kullanılma oranı (EUR) %7,826 ile %46,285 arasında değişmiştir [13]. Ramana Murthy (2009) güneş enerjili kurutucuların yeni teknolojilerini, modellerini ve deneysel araştırmalarını incelemiş ve analiz etmiştir. Bir çok gıdanın başlangıç-son nem miktarlarını, en yüksek müsaade edilebilir kurutma havası sıcaklık değerlerini incelemiştir [14]. Banout ve ark. (2012) çift geçişli güneş enerjili kurutucu ile et kurutmuşlardır. Yapmış oldukları güneş enerjili kurutucuda bir laboratuvar fırınına göre daha yüksek kuruma hızı gözlemlenmişlerdir [15].

Bu çalışmada, Türkiye'de üretimi gün geçtikçe artan kivi'nin ekonomik ve kalite değerlerinin artırılması amacıyla, havalı güneş kolektörlü ve ısı pompalı bir kurutucu kullanımı çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, uzun süreli depolamalarda kivi'nin bozulmasını önleyecek ve kurutma kusurlarını (ürün kalitesi, aflatoksin oluşumu vb.) ortadan kaldıracak bir kurutucunun tasarımı, imalatı ve test edilmesidir. Ayrıca, bu çalışmada kivi için uygun kurutma havası şartları tespit edilerek, sistemin enerji analizi yapılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Kurutma sistemi öncelikle kurutulacak ürünün ve kurutma sisteminin özelliklerine bağlı olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımdan sonra sistem için gerekli olan ekipmanların kapasite hesabında, ürünün nem miktarının belirlenmesinde ve daha da sonrasında sistemin analizinde aşağıda madde madde sunulan eşitlikler kullanılmıştır.

Başlangıçta kurutma sistemindeki fırın duvarlarının ısıtılması için gerekli ısı enerjisi;

$$q_1 = m_d \cdot c_d \cdot \Delta T \quad (1)$$

Kurutma havasının ısıtılması için gerekli enerji;

$$q_2 = V_h \cdot c_h \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (2)$$

Kivinin ısıtılması için gerekli enerji;

$$q_3 = m_k \cdot c_k \cdot \Delta T \quad (3)$$

Kivilerde bulunan neminin buharlaştırılması için gerekli enerji;

$$q_4 = m_{su} \cdot r_o \quad (4)$$

Fırından çevre havasına olan ısı kayıplarını karşılamak için harcanan enerji;

$$q_5 = U \cdot A \cdot \left[ \frac{(T_k + T_{ic})}{2} - T_d \right] Z \quad (5)$$

Eşitlikteki toplam ısı geçirgenlik katsayısı (U);

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{ic}} + \frac{1}{\alpha_{du}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (6)$$

ile ifade edilir [16,17]. Kurutma odasında kivinin kurutulması için gerekli olan toplam enerji miktarı ( $Q_{VTOP}$ );

$$Q_{VTOP} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (7)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Kurutma sisteminde kullanılan güneş kolektöründe toplanan enerji;

$$Q_t = m_p \cdot c_p \cdot \left( \frac{dT_p}{dt} \right) \quad (8)$$

Güneş kolektöründe kazanılan enerji;

$$Q_k = m_h \cdot c_h \cdot (T_\zeta - T_g) \quad (9)$$

Güneş kolektöründe emilen enerji;

$$Q_e = \eta \cdot I_{top} \cdot A_k \quad (10)$$

Güneş kolektöründen çevreye ısı kayıpları;

$$Q_{gk} = U_k \cdot A_{ka} \cdot (T_p - T_d) \quad (11)$$

Güneş kolektörünün verimi ise;

$$\eta = \frac{[\dot{m}_h \cdot c_h \cdot (T_\zeta - T_g)]}{(A_k \cdot I_{top})} \quad (12)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır [18,19].

Bu parametrelere bağlı olarak güneş kolektöründe enerji dengesi ise;

$$Q_t + Q_k = Q_e + Q_{gk} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Analizi yapılan bu kurutma sisteminde sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu en genel halde Eşitlik 14 ile ifade edilir [20].

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_h \cdot \left( h_\zeta - h_g + \frac{v_\zeta^2 - v_g^2}{2} \right) \quad (14)$$

Kurutma sisteminde hava ısıtma işlemi sırasında, güneş kolektöründe ve yoğuşturucudaki ısı değişimi eşitlik 15 ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot (h_\zeta - h_g) \quad (15)$$

Sistemde yoğuşturucudan atılan ısı miktarı ( $\dot{Q}_Y$ ) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\dot{Q}_Y = \dot{m}_h \cdot c_h \cdot (T_\zeta - T_g) \quad (16)$$

$$\dot{m}_h = \rho_h \cdot \dot{V}_h \quad (17)$$

Yoğuşturucu sıcaklığı ( $T_Y$ ) ile buharlaştırıcı sıcaklığı ( $T_B$ ) arasında ideal bir soğutma çevrimi için en yüksek ısıtma tesir katsayısı ( $COP_{c,h}$ ) Carnot çevrimi ile belirlenir.

$$COP_{c,h} = \frac{T_Y}{T_Y - T_B} \quad (18)$$

Sistemde elektrik enerjisi tüketimi ısı pompasının kompresöründe meydana gelmekte ve diğer ekipmanlarda da tüketim söz konusu olabilir, örneğin fan vb. Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı ( $COP_{hp,h}$ ) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$COP_{hp,h} = \frac{\dot{Q}_Y}{\dot{Q}_c} \quad (19)$$

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

$$COP_{ts} = \frac{\dot{Q}_Y}{\dot{Q}_c + \dot{Q}_f} \quad (20)$$

Kurutma deneylerinde kivilerin sırasıyla kuru ve yaş baza göre nem miktarlarının hesaplanması aşağıdaki eşitlikler ile yapılabilir.

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (21)$$

$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (22)$$

Gıdanın içerisindeki su oranının bulunduğu çevredeki havanın bağıl nemi ile dengeye ulaşması durumunda, çevre havası bağıl neminin 100' e bölünmesi ile o gıdanın mevcut su oranındaki su aktivitesi ( $a_w$ )

hesaplanmış olur.

$$a_w = \frac{C_{bn}}{100} \quad (23)$$

Deneylerde sıcaklık, hava hızı, güneş ışınımı ve ürün kütlesi gibi değerler ölçülmüştür. Bu ölçümler ile ilgili belirsizlikler aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır [21].

$$W_R = [(x_1)^2 + (x_2)^2 + \dots (x_n)^2]^{1/2} \quad (24)$$

### 3. KİVİ KURUTMA SİSTEMİ (KIWI DRYING SYSTEM)

Tasarlanan ve uygulanan kurutma sistemi dalgalı kanatçıklı güneş kolektörü, kurutma odası ve rafları, ısı pompası, fan, frekans invertörü, proses kontrol cihazı ve teraziden oluşmaktadır. Güneş enerjisi ve ısı pompalı kivi kurutma firmı detayı Şekil 1’de gösterilmiştir. Sistemde kurutma için gerekli olan enerji Eş. 1-7’den hesaplanmıştır.

Deney sistemi ısı pompası sisteminin yoğunlaştırıcısını ve dalgalı kanatçıklı havalı güneş kolektörünü enerji kaynağı olarak kullanacak şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Güneş kolektöründe yüksek kanat etkenliği için gerekli olan ısı transferi çözümleri yapılarak emici plaka bakır malzemeden ve dalgalı kanatlar da yüksekliği 6 cm ve kalınlığı da 0,1 cm olan yine bakır malzemeden yapılmıştır. Kurutma havası kurutma firmı içerisindeki kivilerin üzerinden geçerek kivilerdeki nemi bünyesine alacak ve kurutma odasından egzost edilecektir.

Sistemde güneş enerjisi ile yeterli enerji sağlanmadığı zamanlarda ısı pompası sistemi devreye

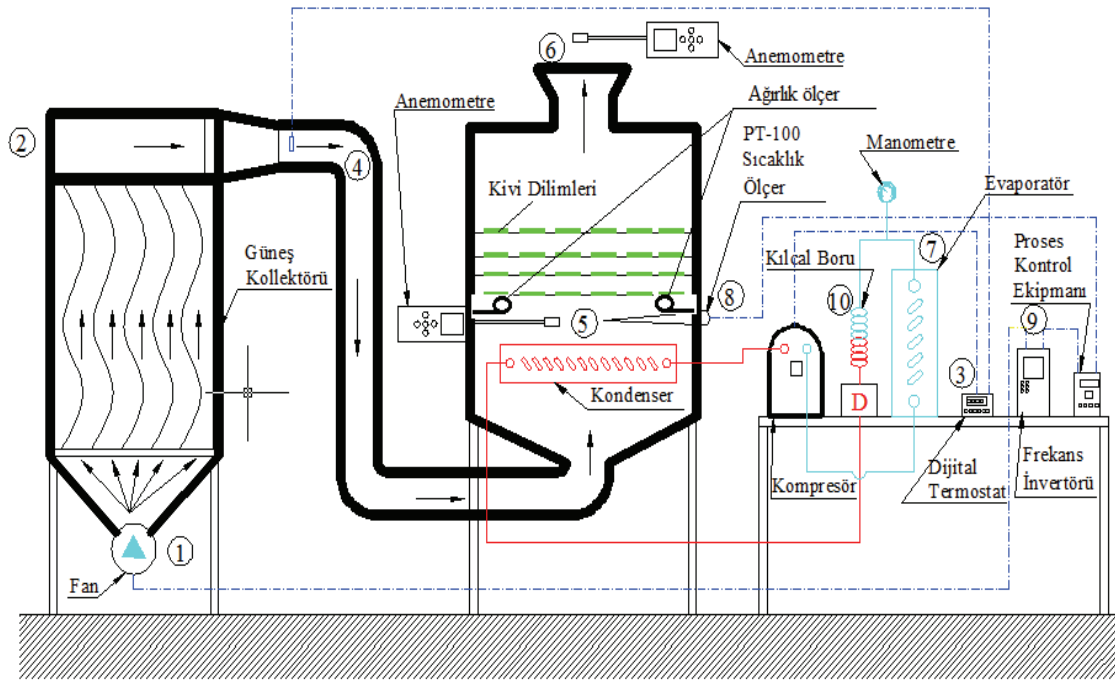
girecektir. Güneş kolektörü çıkışına yerleştirilen dijital termostatın sıcaklık algılayıcısından ölçülen değer ile set değeri arasındaki ilişkiye göre ısı pompası sisteminin kompresörü çalışıp duracaktır.

Kurutucu %100 dış hava ile çalışacaktır. Sistemde hassas bir şekilde sabit kurutma havası sıcaklığı amacını sağlamak için oransal-integral-türevsel (PID) kontrol yapılmıştır. Fanın devri kurutma havası sıcaklığı olarak belirlenen değere göre kurutma havası sıcaklık değerlerini sağlayabilmek için frekans invertörü ile değişken hale getirilmiştir. Böylece istenilen kurutma havası sıcaklığı sağlanacaktır. Güneş kolektörünün emici plaka kısmındaki kanatçıklı yüzeyden kurutma havası geçirilerek kurutma havasının duyulur olarak ısıtılması sağlanmaktadır. Isı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak R-134a gazı kullanılmıştır. Kurutma sisteminde proses kontrol cihazından ayarlanan istenilen kurutma havası sıcaklık değerine göre salyangoz fanın devri değişmektedir. İstenilen kurutma havası sıcaklık değeri ısı çift (Pt-100) ile ölçülen kurutma havası sıcaklık değerinden büyükse frekans invertörü salyangoz fanın devrini düşürecek. Böylelikle daha az debideki dış hava güneş kolektörü ve yoğunlaştırıcudan geçirilerek sıcaklığın, ayarlanan değere ulaşması sağlanmaktadır.

### 4. DENEYSEL PROSEDÜR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen kivilerin, aşağıdaki işlemler gerçekleştirilerek kuru ağırlığı belirlenmiştir;

- Kabukları soyulmuş haldeki kiviler 5 mm kalınlığında dilimlenmiştir.
- Kivinin kuru ağırlığının belirlenmesi için



Şekil 1. Güneş enerjili ve ısı pompalı kurutucu (Solar energy and heat pump dryer)

öncelikle  $103 \pm 2$  °C'da bir etüv fırınında her yarım saatte bir tartılarak, birbirini takip eden ölçümler yapılmıştır [22].

- c) Ağırlık değişimi her 30 dakikada bir takip edilmiş ve en son iki ölçüm arasındaki fark %1'den daha az olana kadar işleme devam edilmiş ve iki ölçüm arasındaki fark %1'den daha az olduğu durumda kiviler kuru kabul edilmiştir.
- d) Bu işlem üç defa tekrarlanmış kuru ağırlığın bulunmasında değerlerin ortalaması alınmıştır.

Kuru madde tayini sonucuna göre kuru baza göre Eş. 21'den başlangıç nem miktarları belirlenmiştir. Daha sonra kivi dilimleri, güneş enerjili ve ısı pompalı kurutucuda kurutma kabineye yerleştirilerek, kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Sisteme elektrikli rezistans eklenerek yapılan ön deneylerde 50 °C'nin üzerinde yapılan kurutma uygulamalarında kivi dilimlerinde büzülme ve esmerleşme olduğu görülmüştür. Kurutma uygulamalarında kurutma havası sıcaklığı arttıkça kivilerde L-askorbik asit içeriği ayrışma oranının arttığı bilinmektedir [5].

Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklıkları her deney için farklı olarak proses kontrol cihazından ayarlanarak kurutma işlemi başlatılmıştır. Kurutma işlemi sırasında kivilerdeki ağırlık değişimi her yarım saatte bir ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Yapılan bu

deneyler esnasında kullanılan cihazlar, teknik özellikleri ve belirsizlikleri Eş. 24 yardımıyla hesaplanarak Çizelge 1'de verilmiştir.

Kurutma işleminde aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurularak, kontroller yapılmış ve kurutma işlemi sonlandırılmıştır. Sistemde kurutulan kivilerin deney bitiminde 25 °C'deki su aktivitesi değerleri ölçülmüştür.

- Kivilerin son nem miktarı (g su / g kuru madde)
- Kurutma sonrası kivilerin su aktivitesi değeri ( $a_w$ )
- Kivilerde yapılan duyu analizi

Şekil 2'de gösterilmiş olan kurutulmuş kiviler ikiye katlandığında kırılmamış, tadında ve renginde bir bozulma olmadığı görülmüştür. Bir gıdanın su aktivitesi ( $a_w$ ), gıdanın mikrobiyolojik veya kimyasal-biyokimyasal yollarla bozularak kalitesini ve özelliklerini kaybetmesi üzerinde rol oynayan önemli bir faktördür [23]. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli minimum su aktivitesi değerleri incelendiğinde: aflatoksin (*Aspergillus flavus*) faaliyeti için minimum su aktivitesi değeri 0,82 ve toksin üretimi için minimum su aktivitesi değeri 0,83-0,87 aralığındadır [24]. Deney öncesi ve sonrası elde edilen kivilere ait resimler Şekil 2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Cihazlar, teknik özellikleri ve belirsizlikleri (Devices, technical specifications and uncertainties)

Kullanılan cihaz	Teknik Özellikleri	Hata Analizi
Dijital tartı	6100 g, ölçüm hassasiyeti $\pm 0,01$ g.	$\pm 0,0141$ g
Hava hızı ve sıcaklık ölçüm cihazı	Sıcaklık -20,+70 °C, hız 0-20 m/s ölçüm hassasiyeti $\pm 0,01$ m/s, $\pm 0,1$ °C.	$\pm 0,017$ m/s $\pm 0,173$ °C
Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm cihazı	Bağıl nemde $\pm 3$ % ölçüm hassasiyeti, sıcaklıkta $\pm 0,5$ °C ölçüm hassasiyeti	$\pm \% 0,03$ $\pm 0,75$ °C
Su aktivitesi ölçüm cihazı	Su aktivitesi $a_w$ değeri 0–1 arasında olduğunda ölçüm hassasiyeti $\pm 0,001$ .	$\pm 0,00141$
Sıcaklık ölçüm cihazı	Tip J, ölçüm aralığı 0°C–400 °C, 12 kanallı	$\pm 0,287$ °C
Solarimetre	Ölçüm hassasiyeti $\pm 3\%$ , ölçüm aralığı: 0- 1200 Watt/m <sup>2</sup>	$\pm \%3,04$ W/m <sup>2</sup>
Isıl çift	Skala 0-70 °C, besleme 24 V-DC, çıkış 4-20 mA, hassasiyeti $\pm 0,1$ °C	$\pm 0,141$ °C
Ağırlık Ölçer	Zemic 5 kg kapasite, 40~+80 °C, 5~12 (DC), hassasiyeti $\pm \% 0,02$ .	$\pm \%3$



a) Kurutma öncesi

b) Kurutma sonrası

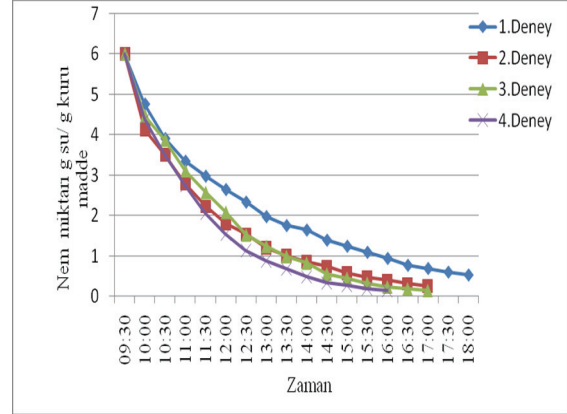
**Şekil 2.** Kurutma öncesi-sonrası kivi fotoğrafları (Kiwi photos before-after drying)

Kurutulmuş ürünlerde çorba, kavrulmuş kabuklu meyvalar, bal, bakliyat, baharatların bazıları, ıhlamur, çay, kahve, pestil, ve çipsler su aktivitesi değerinin 0,60 değerinin altındaki nemi düşük olan ve dayanıklı dolayısıyla depolanabilir gıdalar sınıfına girmektedir [25]. Kivilerin kurutma sonrası su aktivitesi değeri ( $a_w$ ) 0,58-0,47 aralığında ölçülmüştür.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

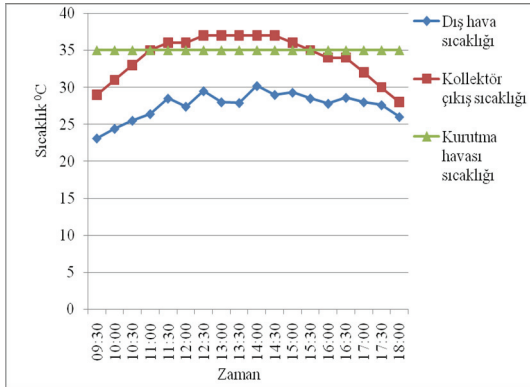
Kuru madde miktarı belirlenen kivilerin başlangıç nem miktarı 6 g su/g kuru madde olarak bulunmuştur. Deneyler süresince kivinin kuru baza göre nem miktarının değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'de de görüleceği üzere, kurutma işleminin başlangıcında ürün içerisindeki serbest nemden ötürü kuruma hızı da fazla olmuştur.

Kurutma işleminin ilerleyen safhalarında ürün içerisindeki nem miktarına göre kurutma hızı azalmıştır. Deneylerde dış hava, güneş kolektörü çıkış havası ve ayarlanan kurutma havası sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimleri Şekil 4'de gösterilmiştir.

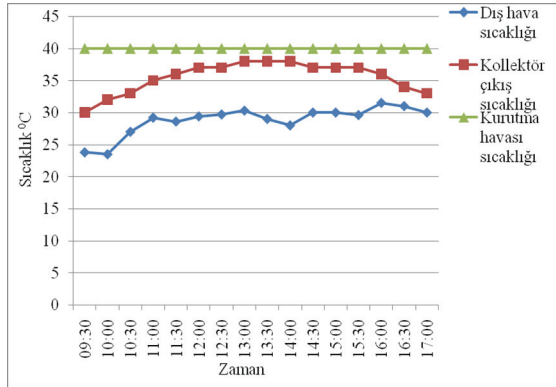


Şekil 3. Nem miktarının kurutma süresine göre değişimi (Moisture content changes according to drying time)

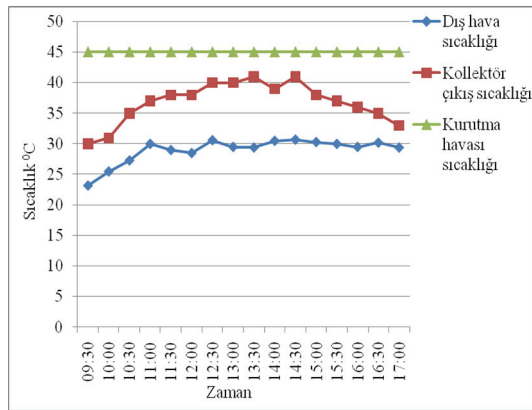
Kurutma havası sıcaklığı 40 °C, 45 °C ve 50 °C sıcaklıklarda yapılan deneylerde  $\pm 0,4$  °C hassasiyetle sağlanmıştır. 35 °C'de yapılan deneylerde kurutma havası sıcaklığı 35 °C'yi aştığında fan 50 hz'de çalışmasına rağmen kurutma havası sıcaklığı sadece öğle saatlerinde güneş kolektörü tarafından istenilen değer olan 35 °C'nin üstüne çıkmış; deneyde belli bir aralıkta (35 °C - 37 °C) aralığında tutulabilmiştir (Şekil 4a).



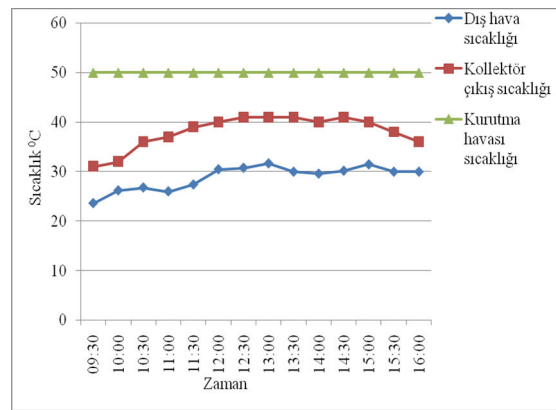
a) 35 °C'de yapılan deney



b) 40 °C'de yapılan deney



c) 45 °C'de yapılan deney



d) 50 °C'de yapılan deney

Şekil 4. Güneş kolektörü sıcaklık değişimleri (Solar collector temperature changes)

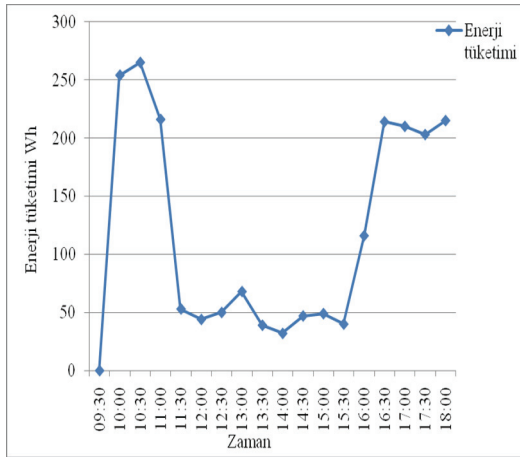
Deneylerde, 35 °C yapılan deneyde ısı pompası çok az devreye girmiştir. Kolektör çıkış sıcaklığı güneş ışınımının fazla olduğu saatlerde ayarlanan sıcaklık değerinin üzerine çıkmasıyla invertör aracılığıyla fan devri artmış ve fırın içerisindeki kurutma sıcaklığı istenilen değerde tutulmaya çalışılmıştır.

Şekil 4’de görüldüğü gibi, ayarlanan kurutma havası sıcaklığı arttıkça kolektörden çıkan hava sıcaklığı ile arasındaki fark artmıştır bu da ısı pompasının daha fazla devrede kalmasına ve enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur. 40 °C, 45 °C ve 50 °C yapılan deneylerde sıcaklık değerinin artmasıyla doğru orantılı olarak kompresör devreye girmiş ve devrede kalma süresi artmıştır (Şekil 5). Bu durum enerji maliyetlerinin yüksek olması açısından istenilmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Kolektör sayısını artırıp seri bağlanması ile ya da kolektör boyutunun artırılması ile güneşli günlerde yapılan kurutma işlemlerinde enerji maliyetini önemli bir ölçüde azaltacaktır.

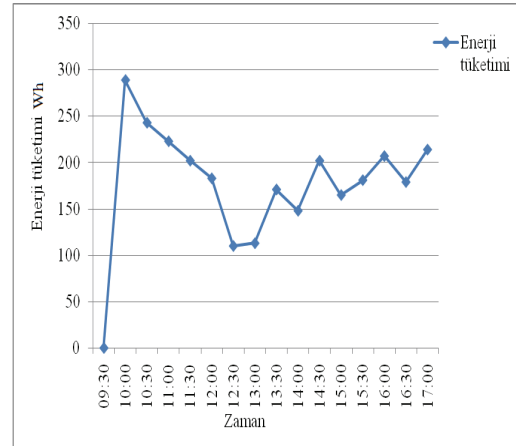
Şekil 5’de güneş ışınımının az olduğu saatlerde (sabah ve akşam) sistemde enerji tüketiminin fazla olduğu, öğle saatlerinde ışınımın artmaya başlamasıyla beraber

enerji tüketiminin düştüğü gözlemlenmiştir. Deneylerde güneş ışınımının artmaya başlamasıyla kolektörden çıkan havanın sıcaklığı artmıştır. Deneylerde kurutma işlemlerindeki yoğunlaştırıcı yüzeyindeki hava hızlarının ısı pompasının devreye girip çıkmasına bağlı olarak dalgalandığı gözlemlenmiştir. Ürün üzerindeki hava hızı ayarlanan sıcaklık değerine bağlı olarak 0,1-1 m/s arasında değişmiştir.

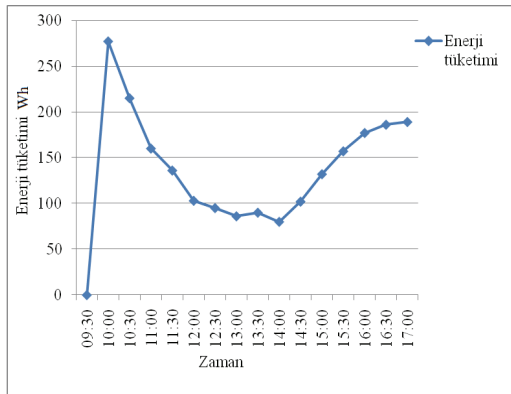
Analizler yapılırken, güneş kolektörü verimi ve yoğunlaştırıcıdan atılan ısı hesabında ortalama hava hızı değerlerine göre hesap yapılmıştır. Deneyler sırasında elde edilen ortalama kolektör verimleri ( $\eta$ ) Eş. 12’den hesaplanmıştır (Çizelge 2). Buna göre en yüksek ortalama kolektör verimi 35 °C’de yapılan deneyde gerçekleşmiştir. Kolektörde elde edilen hava sıcaklığı azaldıkça çevreye olan ısı kayıpları da azalmıştır. Buna ek olarak hava debisinin artması dolayısıyla ısı taşınımının artması ile de 35 °C’de güneş kolektör verimi en yüksek değere ulaşmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre Eş. 19 ve 20 kullanılarak  $COP_{hp,h}$  ve  $COP_{ts}$  değerleri hesaplanmıştır. Kurutucuda kullanılan fanın harcadığı enerji de hesaba katılarak  $COP_{ts}$  değeri hesaplanmıştır.



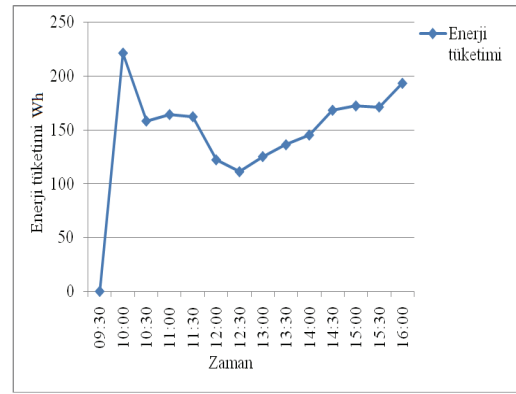
a) 35 °C’de yapılan deney



b) 40 °C’de yapılan deney



c) 45 °C’de yapılan deney



d) 50 °C’de yapılan deney

Şekil 5. Sistemde kurutma süresine göre harcanan enerji değişimleri (Consumed energy changes according to drying time in the system)

**Çizelge 2.** Deneysel sonuçlar (Experimental results)

	Kurutma havası sıcaklık değerleri			
	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C
$COP_{hp,h}$	2,68	2,94	2,99	3,02
$COP_{ts}$	2,09	2,30	2,33	2,37
Ortalama kolektör verimi ( $\eta$ )	0,672	0,611	0,564	0,421
25 °C’de ölçülen su aktivitesi değeri ( $a_w$ )	0,58	0,52	0,48	0,47
Kurutma süresi (saat)	8,5	7,5	7,5	6,5

Çizelge 2’de görüldüğü gibi, yapılan bütün deneylerde kurutucuda depolamaya uygun değer olan 0,60 su aktivitesi değerinin altına inilmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Tasarlanan, imal edilen ve farklı şartlarda test edilen güneş enerjili ve ısı pompalı kurutma fırınında yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kurutma işlemleri için güneş enerjili sistemler seçilmesi ve uygulamanın ışınımın fazla olduğu öğle saatlerinde yapılması sistemlerin enerji tüketimini azaltacaktır.
- Güneş kollektörü destekli ısı pompalı kivi kurutma sisteminde kivi dilimleri 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C’ de kurutulduğunda; sırasıyla ısıtma tesir katsayıları ( $CO_{Php,h}$ : 2,68,  $CO_{Pts}$ :2,09), ( $CO_{Php,h}$ :2,94,  $CO_{Pts}$ :2,30), ( $CO_{Php,h}$ :2,99,  $CO_{Pts}$ :2,33), ( $CO_{Php,h}$ :3,02,  $CO_{Pts}$ :2,37) olarak hesaplanmıştır.
- Kurutma sisteminde, 35 °C, 40 °C, 45 °C ve 50 °C sıcaklıklarda ve 0,1 - 1 m/s değişken hava hızında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kivinin kurutulması için en ideal sıcaklık değerinin 50 °C olduğu tespit edilmiştir.
- Kurutma havası sıcaklığının PID olarak kontrol edildiği kurutma işlemlerinde sıcaklık değerleri: 40 °C kurutma havası sıcaklığında (39,8–40,2 °C), 45 °C kurutma havası sıcaklığında (44,8–45,2 °C), 50 °C kurutma havası sıcaklığında (49,8–50,2 °C) arasında tutulmuştur. Böylece, ısı pompalı kurutucuda kurutma havası sıcaklığı ortalama olarak  $\pm 0,2$  °C hassasiyet ile tutularak kurutmanın gerçekleşmesi sağlanmıştır.
- Kivi kurutulmasında kurutma süresine etki eden en önemli parametre kurutma havası sıcaklığıdır.
- Türkiye, güneş enerjisi ile sıcak su üretiminde dünya genelinde üçüncü sırada yer almaktadır [26]. Sıcak su üretiminde olduğu gibi kurutma sistemlerinde de güneş enerjisinin yaygın kullanımı enerji giderlerini azaltacaktır.
- Soğuk hava depolarında saklanan yaş kivilerin

teknik metotlar kullanılarak kurutulması ile soğuk hava depolarındaki enerji giderleri azalacak ve yer sorunu çözülebilecektir.

- Sistemde kurutma havası ürün üzerinden geçirildikten egzost edilmiştir. Bu atık havanın ısısı ile, sisteme alınan taze hava ısıtılarak sistemde ısı verim artırılabilir.

## SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

A	Fırın toplam duvar yüzey alanı, m <sup>2</sup>
$A_k$	Kollektör yüzey alanı, m <sup>2</sup>
$A_{ka}$	Kollektörün ısı kaybeden yüzey alanı, m <sup>2</sup>
$c_d$	Fırın duvarlarının özgül ısısı, kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$c_h$	Havanın özgül ısısı, kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$c_k$	Kivinin özgül ısısı, kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$c_p$	Plakanın özgül ısısı, kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
d	Malzeme kalınlığı, m
KA	Kuru ağırlık, kg
$I_{top}$	Kollektör yüzeyine gelen toplam güneş ışınımı şiddeti, W.m <sup>-2</sup> .gün <sup>-1</sup>
$m_d$	Duvar kütlesi, kg
$m_h$	Hava kütlesi, kg
$m_k$	Kurutulan kivilerin kütlesi, kg
$m_p$	Plaka kütlesi, kg
$\dot{m}_{su}$	Kivilerden çekilen su kütlesi, kg.s <sup>-1</sup>
$\dot{Q}_c$	Kompresör gücü, kJ.s <sup>-1</sup>
$\dot{Q}_f$	Fan gücü, kJ.s <sup>-1</sup>
$Q_{VTOP}$	Kurutma işlemi için gerekli toplam enerji, kJ
$\dot{Q}_Y$	Yoğuşturucu gücü, kJ.s <sup>-1</sup>
$r_o$	Suyun buharlaşma ısısı, kJ.kg <sup>-1</sup>
$SO_{KA}$	Üründeki kuru ağırlığa göre su oranı, g su.g kuru ağırlık <sup>-1</sup>
$SO_{YA}$	Üründeki yaş ağırlığa göre su oranı, g su.g yaş ağırlık <sup>-1</sup>
U	Fırın duvarlarının toplam ısı geçiş katsayısı, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$U_k$	Kollektör duvarının toplam ısı geçiş katsayısı, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$V_h$	Hava miktarı, m <sup>3</sup>
YA	Yaş ağırlık, kg
Z	Kurutma süresi, h
$\dot{W}$	Birim zamanda yapılan iş, kJ.s <sup>-1</sup>
$W_R$	R büyüklüğünün toplam belirsizliği
x	x ile gösterilen faktörlere göre bağımsız değişken



$\alpha_{iç}$	İç yüzey ısı taşınım katsayısı, $W.m^{-2}.K^{-1}$
$\alpha_{dış}$	Dış yüzey ısı taşınım katsayısı, $W.m^{-2}.K^{-1}$
$\lambda$	Duvarları oluşturan her bir katmanın ısı iletim katsayısı, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$\eta$	Verim, %

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

07/2010-21 kodlu projeye vermiş oldukları desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Phani, K., A., Greg, J., S., “Re-Circulating Heat Pump Assisted Continuous Bed Drying and Energy Analysis”, **Int. J. of Energy Research**, 29, 961-972, 2005.
- Darıcı, S., Şen, S., “Kivi meyvesinin kurutulmasında kurutma havası hızının kurumaya etkisinin incelenmesi” **X. Ulusal Tesisat Müh. Kongresi**, İzmir, 13-16 Nisan 2011.
- Koç A., B., Toy M., Hayoğlu İ., Vardin H., “Kırmızı biber kurutmada kullanılan güneş enerjili bir kurutucu performansı”, **Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi**, 8(2): 57-65, 2004.
- Şevik S., “Design, Experimental Investigation and Analysis of a Solar Drying System”, **Energy Conversion and Management**, 68, 227-234, 2013.
- Orikasa, T., Wu, L., Shiina, T., Tagawa A., “Drying Characteristics of Kiwifruit During Hot Air Drying”, **J. of Food Eng.**, 85, 303-308, 2008.
- Goh, L., J., Othman, M., Y., Mat, S., Ruslan, H., Sopian, K., “Review of Heat Pump Systems for Drying Application”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, 4788– 4796, 2011.
- Maskan, M., “Kinetics of Colour Change of Kiwifruits During Hot Air And Microwave Drying”, **J. of Food Eng.**, 48, 169-175, 2001.
- 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, 2010.
- Bakırcı, K., Çomaklı, K., Özyurt, Ö. ve Yılmaz, M., “Güneş Kaynaklı Isı Pompasının Enerji ve Ekserji Analizi”, **Mühendis ve Makina**, 50, 590, 2009.
- Hawladar MNA, Perera CO, Tian M. “Properties of Modified Atmosphere Heat Pump Dried Foods”, **J. of Food Eng.** 74, 392–401, 2006.
- Fudholi A., Sopian, K., Ruslan M., H., Alghoul, M., A., Sulaiman M., Y., “Review of Solar Dryers for Agricultural And Marine Products”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14, 1-30, 2010.
- Lewicki, P., P., “Design of Hot Air Drying For Better Foods”, **Trends in Food Science & Technology**, 17, 153-163, 2006.
- Kavak Akpınar E., “Drying of Mint Leaves in a Solar Dryer and Under Open Sun: Modelling, Performance Analyses”, **Energy Conversion and Management**, 51, 2407-2418, 2010.
- Ramana Murthy, M., V., “A Review of New Technologies, Models and Experimental Investigations”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13, 835-844, 2009.
- Banout, J., Kucerova, I., Marek S., “Using a Double-Pass Drier For Jerky Drying”, **Energy Procedia**, 30, 738-744, 2012.
- Ashrae, “**Tarım Ürünlerinin Kurutulmasında ve Depolanmasında Göz Önüne Alınacak Fizyolojik Etkenler**”, Temel El Kitabı Bölüm 10, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınlar 2, 10-15. 1993.
- Pitts, D., R., & Sissom, L., E., “**Theory and problems of heat transfer**”, McGraw-Hill Book Company, 200, 1977.
- Shariah A, Al-Akhras M. A. & Al-Omari I. A., “Optimizing the Tilt Angle of Solar Collectors”, **Renewable Energy**, 26: 587-598, 2002.
- Esen, H., “Experimental Energy And Exergy Analysis of a Double-Flow Solar Air Heater Having Fifferent Obstacles on Absorber Plates”, **Build Environ**, 43,1046-1054, 2008.
- Çengel, Y., A., Boles, M., A., “**Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik**”, Güven Bilimsel Yayınları, 230-232, 2008.
- Holman JP. “**Experimental Methods for Eng.**”, Singapore, McGraw-Hill;1994.
- AOAC 1990. Official Method of Analysis, **Association of Official Analytical Chemist**, IAC, Arlington, Virginia
- Anthony, J., Fontana, Jr., “Water Activity’s Role in Food Safety and Quality”, **Presented at the Second Nsf International Conference on Food Safety**, Savannah, GA, USA, 1, 2000.
- Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., “**Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi**” Gıda Teknolojisi Derneği, 28, 541 – 542, 544-570, Ankara, 2003.
- Özay, G., Pala, M., Saygı, B., “Bazı Gıdaların Su Aktivitesi ( $a_w$ ) Yönünden İncelenmesi”, **Gıda**, 18 (6), 377-383, 1993.
- Şenol, R., “Tarımsal Sulama ve Güneş Enerjisi”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 27, (3), 519-526, 2012.

