

Isı Pompalı Endüstriyel Fındık Kurutma Fırınının Modellenmesi

Mustafa AKTAŞ, İlhan CEYLAN, Hikmet DOĞAN
Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

Bu çalışmada son yıllarda yapılan kurutma fırınlarının fındık kurutulmasına uygulanabilirliği araştırılmıştır. Yapılan araştırmaların ışığında fındık kurutma havası şartları da göz önünde bulundurularak sıcaklık, nem ve ağırlık kontrollü nem yoğunlaştırıcı (kondenzasyonlu) bir fındık kurutma fırınının modellenmesi yapılmıştır. Kurutma hızını ve kalitesini belirleyen bu üç unsurun kontrol edilmesi ile üründen daha erken faydalanılması ve kalitesinin artırılması amaçlanmıştır. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfiyatı olurken, diğer günlerde de kurutma işleminin devamlılığı ısı pompası yardımı ile sağlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Fındık Kurutma, Güneş Enerjisi, Isı pompası, Modelleme, Kurutma Hızı

Design of Industrial Hazelnut Drying Kiln with Heat Pump

ABSTRACT

In this study, the applicability of drying kilns which have been manufactured lately on hazelnut drying has been investigated. A hazelnut drying kiln having temperature, humidity and weight control and humidity condenser has been designed taking into account the drying air conditions according to related research results. The aim of this work is to use the product earlier and to improve the quality by controlling these three factors which determine drying speed and quality. On sunny days less energy is consumed using solar energy and on other days drying process is performed with a heat pump.

Key Words: Hazelnut Drying, Solar Energy, Heat Pump, Modelling, Drying Speed

1. GİRİŞ

Kuruma; 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, buharlama vb.) ünitelerin bütününe de kurutma sistemi denir. Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayiinin bir çok alanında yaygın olarak gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında uygulanmaktadır.

Kurutma işlemi bir ısı ve kütle transferi olayı olup, özellikle güneş enerjisi ile tarım ürünlerini kurutma, en eski ve en önemli gıda saklama usullerinden birisi olarak bilinmektedir. Günümüz Türkiye'sinde bir çok tarım ürününün kurutulmasında açık sergide kurutma yöntemi uygulanmaktadır. Açık sergide kurutmanın; tozlanma, mikroorganizma üremesi, bozulma ve yerel meteorolojik şartlara bağlılık gibi birçok mahzurlu tarafları vardır. Özellikle hasat dönemlerindeki kararsız meteorolojik şartlar ürün kalitesine önemli ölçüde olumsuz etkiler yapmaktadır. Ayrıca Türkiye, yüksek oranda kurutulmuş meyve ve sebze potansiyeline de sahiptir.

İhracatın istenilen oranda artırılması için kaliteli kurutulmuş meyve ve sebze üretiminin sağlanması gerekmektedir. Bunun için de uygun kurutma tekniklerinin seçilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Üretici bazında istenilen, ürünün daha kısa sürede kuruması ve daha kaliteli olmasıdır. Bu da güneş enerjili sistemlerin kullanım ihtiyaçlarını doğurmaktadır. Güneş enerjili kurutma sistemleri kullanımında aşağıda belirtilen üstünlükler vardır.

- Kurutma süresinin önemli ölçüde azalması
- Kayıpların önlenmesi
- Ürün kalitesinin artması
- Kurutma sırasında ürünlerin yağmurdan, tozdan, böcek ve diğer zararlılardan korunması (1).

Kurutma fırınlarında hava hızının ya da sıcaklığının artması fırına verilen enerji miktarının artmasını sağlar. Bunun paralelinde ürün içerisindeki nem buharlaştırılması için verilmesi gereken enerji miktarının daha kısa sürede sisteme verilmesiyle kurutma süresi de kısalmır. 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 erken faydalanma avantajını sağlar.

Bu çalışmada sıcaklık, nem ve ağırlık kontrollü nem yoğunlaştırıcı (kondenzasyonlu) bir fındık kurutma fırını modellenerek kurutma sisteminin enerji, analizi fındık kurutma ile ilgili teknik bilgiler ışığında ayrıntılı olarak yapılmıştır.

2. LİTERATÜRDE FINDIK KURUTMA

Fındık ılıman iklimlerde yetişebilen, Türkiye'nin de Karadeniz bölgesinde yaygın üretimi yapılan sert kabuklu bir yemıştır. Türkiye'deki ekonomik çeşitler; "C. Avellana Var, Pontica", "C. Maxima Mill", ve "C. Colurna Var Galndulifera" (Türk fındığı) türlerinden ve bunların melezlerinden seçilmiştir. Yıllık 400.000 - 450.000 tonla dünyanın en büyük fındık üreticisi olan Türkiye'yi, İtalya, İspanya ve ABD izlemektedir. Türkiye ürettiği fındığın %83' ünü kabuklu ya da iç fındık olarak ihraç ederek, yılda yaklaşık 750 milyon \$ gelir elde etmektedir. İç fındıkların %80' i çikolata, %15'i pasta, bisküvi ve şekerleme ve %5'i çerezlik olarak kullanılmaktadır. Fındık kendine has aromasıyla bulunduğu geniş kullanım alanı yanında, beslenme açısından da değerlidir. Fındık E vitamini, B₆ vitamini, demir, kalsiyum, potasyum ve çinko muhtevası bakımından çok zengindir. Ayrıca, iyi bir B₁ ve B₂ vitamini kaynağıdır (2).

Hasat döneminde harman yerine getirilen fındıklar 3-5 gün, 10-15 cm. kalınlıkta bir tabaka halinde serilir. Güneşli havalarda tahta kürek veya tırmık ile her gün karıştırılarak kurutulur. Belli bir miktar kuruyan bu fındıklar patoz denilen fındık ayıklama makinesine verilerek suretiyle zuruflarından ayrılırlar. Ayıklanan bu fındıklar toprak harmanlarda bez, beton harmanlarda ise bez kullanmadan 2-4 cm kalınlıkta serilirler. Bu şekilde 3-4 gün kuruyan fındıklar vantilatörden geçirilmek suretiyle toz, toprak, zuruf parçalarından ve boşlarından ayrılırlar. Kırık, kurt delikli fındıklar ile karışan diğer fındık çeşitleri içlerinden seçilir, çuvallara doldurulur ve ağızları dikilerek pazara götürülmek üzere hazırlanır. Harmanlama işlemi genellikle 15 Ağustos'da başlayıp Eylül ayı sonlarına kadar devam eder. Harmanlama sırasında fındığın iyice kurummasına ve nem oranının kabuklu fındıkta %12, iç fındıkta %6'yı geçmemesine dikkat edilmelidir (3).

Fındıktaki nem tayini iç fındığın sıcaklığı kontrol edilebilen bir etüvde (103 ± 2) °C'da, çevre basıncında 6 saat süre ile kurutulması sonunda meydana gelen kütle kaybına dayanarak rutubet muhtevasının belirlenmesidir (4).

Etüv, elektrikle ısıtılan sıcaklığı kontrol edilebilen hava dolaşımına haiz, sıcaklığı (103 ± 2)°C'da tutabilen bir cihaz olmalıdır. Desikatör ise; etkili bir nem çekici, örneğin; kalsiyum klorür ihtiva eden ve tartım kaplarının soğumalarını kolaylaştıran bir metal veya porselen plakaya haiz olmalıdır. Her biri yaklaşık 50 g olan 4 deney numunesinde rutubet muhtevası tayini yapılır. Boş kuru madde kapları ve kapakları 0,001 g yaklaşımla tartılır (M₀). Tartım kabına 50 g kadar deney numunesi 0,001 g duyarlılıkla tartılır. Numune kuru

madde kabının tabanı yüzeyine yayılır. Kabın kapağı bekletilmeden kapatılır ve kapla birlikte tartılır (M₁). Bu işlemler mümkün olduğu kadar çabuk yürütülmelidir. Tartım kapları, kapağı açık olarak, kapak kabın yanında olduğu halde etüve yerleştirilir. Etüvün kapağı kapatılır ve numune 6 saat süre ile kurumaya terk edilir. Bu sürenin sonunda etüvün kapağı açılarak 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 (M₂).

Numunenin rutubet muhtevası yüzde olarak, aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$\text{Rutubet muhtevası (\%)} = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_1 - M_0)} 100 \quad (1)$$

Yapılan dört tayinden elde edilen değerlerin ortalaması alınır.

Fındık kurutma sistemleri ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda Bıçakçı (1989), Doğu Karadeniz Bölgesinde havahı güneş kolektörleri ile prototip fındık kurutma sistemi tasarımı yapmıştır. Yapılan kolektör modellemesi sonucunda fındık kurutma ayları için en uygun kolektör eğimini 30° (Trabzon için) olarak bulmuştur. Havanın kolektöre girmeden önce, bağıl neminin düşürülmesinin kurutma zamanını kısalttığı ve daha çok ürün kurutulabileceği kanaatine varmıştır (5). Çetin (1994), fındığın dönel silindirden kurutulmasını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Nem oranı yüksek olan fındık deney düzeneğinde 40-50 °C seviyesindeki bir sıcaklıkta kurutulmuş. Deneysel kurutmada sıcaklıkların 10-15 °C daha yüksek olduğu durumda, kurutma süresinin daha da kısaldığı görülmüş, bununla birlikte fındığın tat ve yapısında bozulma olmadığı da gözlenmiştir (6). Demirbaş (2000), fındıkta kurutma sistemlerinin karşılaştırılmasını yapmıştır. Sera içerisinde kurutmanın en önemli üstünlüklerinin; kontrollü bir kurutma olması, yağmur gibi iklim faktörlerinin kurutulan ürünün kalitesini olumsuz etkilememesi olduğunu belirtmiştir. Sera içerisinde kurutma düzeni olarak raflı sistem kullanılarak birim alanda daha fazla ürün kurutulabileceği sonucuna varmıştır (7). Olgun ve Rzayev (2000), fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulmasını incelemiştir. Kabinet tipi, dolap tipi ve çadır tipi olmak üzere üç sistemde fındığı kurularak ve açık havada fındığın 82 saat civarında kuruduğu tespit edilerek; kabinet tipli kurutucuda ek ısıtıcı kullanılması durumunda 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığı durumda 50 saatte, çadır tipli kurutucuda 73 saatte, ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise 72-76 saat içerisinde fındığın kuruduğunu tespit etmişlerdir (1). Demirtaş (1996) laboratuvar şartlarında kurduğu deney düzeneğinde; kurutma havasının dört farklı bağıl neminde (%45-70), beş farklı sıcaklığında (25 °C – 50 °C) ve üç farklı hava hızında (0.2 m/s – 0.6 m/s) fındık kurutma deneyleri yapmıştır. En iyi kurutma havası sıcaklığını 35 °C – 40 °C olarak belirlemiştir (8). Demirtaş, Ayhan ve Kaygusuz (1998) fındığın kuruma davranışlarını sayısal yöntemlerle de

incelemişlerdir (9). Lopez ve arkadaşları (1998a) farklı sıcaklık (30 °C - 70 °C) ve farklı hızlardaki (0.5 m/s – 2 m/s) şartlandırılmış hava ile farklı yatak yüklerinde (50 kg/m² – 150 kg/m²) deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde, hava sıcaklığının kuruma süresine etkisinin fazla olduğu, buna karşılık hava hızının ve kurutma yatak yükünün etkisinin fazla olmadığı belirtilmiştir (10). Yine Lopez ve arkadaşları (1998b), kalın sergide fındık kurutma için bir matematik model de geliştirmeye çalışmışlardır (11). Aynı grup diğer çalışmalarında da (1997a, 1997b ve 1997c) farklı koşullarda kurutulmuş fındıkların kalite üzerindeki etkilerini yağ oksidasyonu, enzimatik faaliyet ve esmerleşme açısından incelemişlerdir (12,13,14).

3. SICAKLIK, NEM VE AĞIRLIK KONTROLLÜ NEM YOĞUŞTURMALI (KONDEZASYONLU) FINDIK KURUTMA FIRINI

Havanın ısıtılarak nemi alınacak ürünün üzerine salınması ve belirli bir nemlilik değerine gelmiş havadan nemin kontrollü olarak alınması, sıcaklık, nem ve ağırlık kontrollü nem yoğuşturmalı (kondenzasyonlu) kurutma sisteminin temelini oluşturmaktadır. Bu kurutma işleminde havanın sıcaklığı, bağıl nemi, kurutma havasının hızı ve kurutulacak madde içerisindeki nem miktarı dikkate alınır. Kurutmada dikkate alınan bu dört unsur kurutma hızını doğrudan etkileyeceği düşünülerek modelleme yapılmıştır.

Tarafımızdan tasarlanan sıcaklık, nem ve ağırlık kontrollü nem yoğuşturmalı (kondenzasyonlu) fındık kurutma fırını Şekil 1.'de görülmektedir. Sistem; kondenser (K), evaporatör (E), güneş kolektörlü evaporatör (Gke), kompresör (C), fan (F), kurutucu

filtre (D), kılcal boru (Kb1-Kb2), selonoid valf (Sv1-Sv2) ve ağırlık ölçer (Load-cell)'den oluşmaktadır. Isı pompası sistemi ısı atılan ve çekilen akışkan olarak havanın kullanıldığı "hava- hava ısı pompası sistemi" olarak adlandırılabilir.

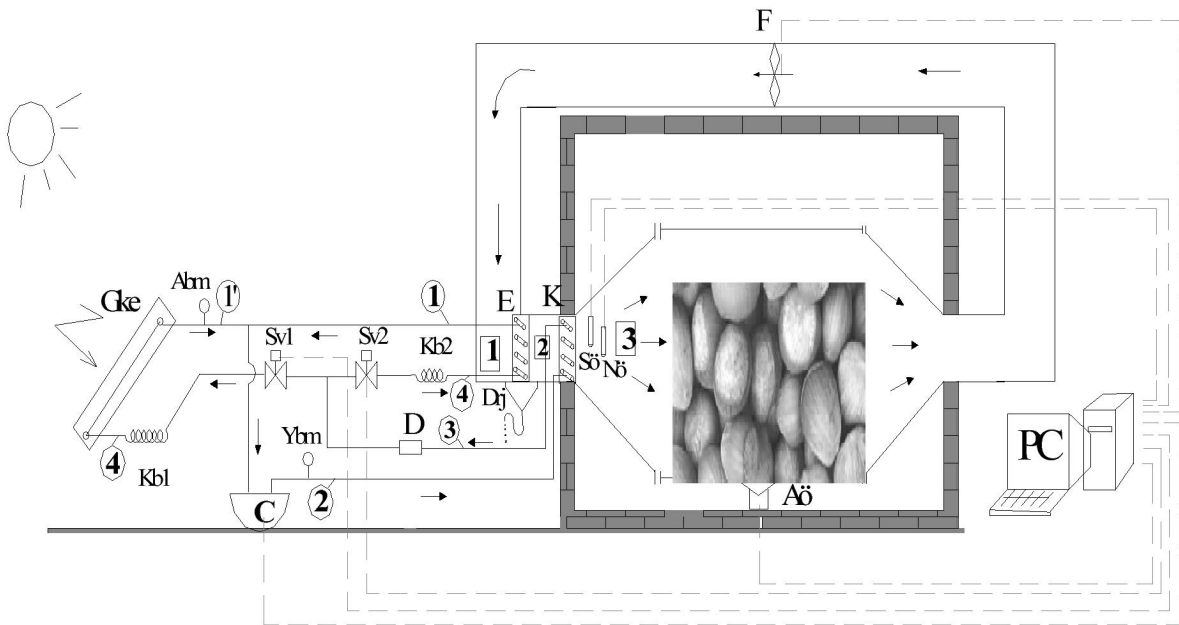
Yapılan tariflere göre bütün soğutma sistemleri aslında bir ısı pompasıdır. Çünkü düşük sıcaklıktaki bir ortamdan ısı çekerler ve bunu yüksek sıcaklıktaki bir ortama atarlar. Bu çevrim ısı pompasının tanımı olarak da bilinir. Tarafımızdan tasarlanan bu sistemde soğutma sistemlerindeki kondenserlerden atmosfere atılan ısı değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Burada, bu her ne kadar kaçınılmaz görülse de faydalı ısı çekimi (evaporatörden) ve ısı kazanımı (kondenserden) aynı anda gerçekleştirilir.

Termodinamiğin I. Kanunu enerjinin korunumu ilkesine göre; kondenserden atılan ısıya paralel olarak evaporatörden çekilen ısı da artacaktır. Bu ifadeye göre termodinamiğin I. kanunu ısı pompasının enerji denklemi olarak evaporatörden sisteme alınan ısı (Q_{Evap}) ile kompresörde harcanan enerji (W_{Komp}) toplamı kondenserden kurutma havasına atılan ısıya (Q_{Kond}) eşittir. Bu nedenle kondenserden kurutma havasına aktarılan ısı;

$$Q_{Kond} = Q_{Evap} + Q_{Komp} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu sistemde kondenserdeki ısı atımını artıracak herhangi bir değişiklik evaporatörde de ısı çekimini artırır ve bunun tersi de mümkündür. Evaporatördeki ısı çekiminin artması, kondenserdeki ısı atımının artmasını da sağlayacaktır.



F: Fan Drj: Yoğuşan su haznesi K: Kondenser E: Evaporatör Gke: Güneş kolektörlü evaporatör D: Kurutucu Filtre Ybm: Yüksek basınç manometresi Abm: Alçak basınç manometresi Sö: Sıcaklık transmitteri Nö: Nem sensörü C: Kompresör Aö: Ağırlık ölçer (Load Cell) Sv1- Sv2: Selonoid valf Kb1-Kb2: Kılcal boru

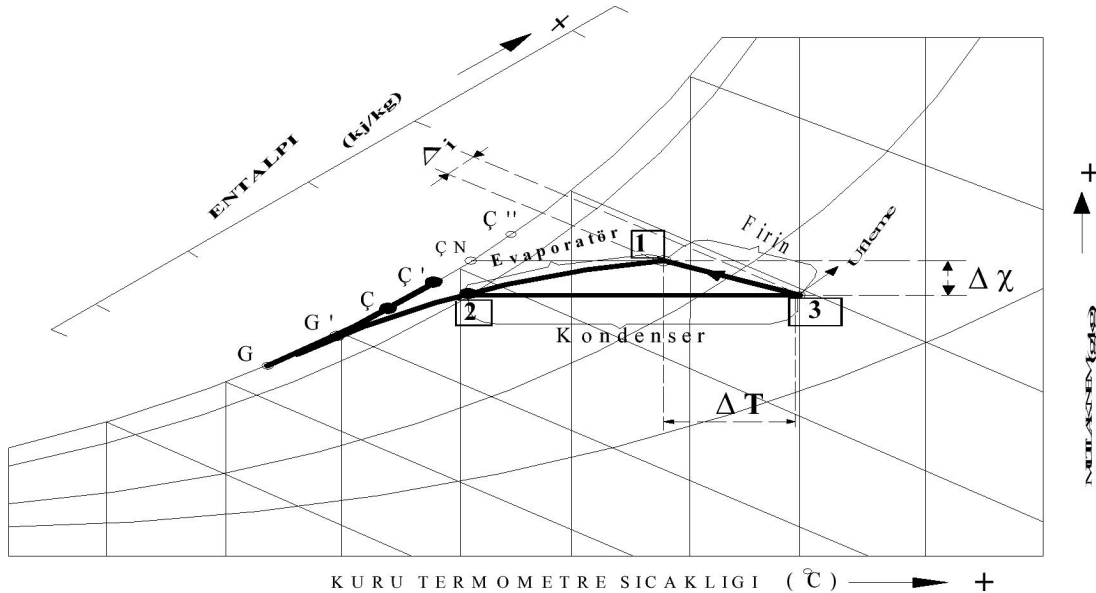
Şekil 1. Sıcaklık, Nem ve Ağırlık Kontrollü, Nem Yoğuşturmalı (Kondenzasyonlu) Fındık Kurutma Fırını

Sistemde kompresör soğutucu akışkanı kondensere basar, yüksek basınçlı soğutucu akışkan burada yoğunlaşma gizli ısıyı kurutma havasına verir, yoğunlaşarak sıvı hale geçen soğutucu akışkan kurutucu filtreden geçer. Kurutma havasının ısıtılması durumunda selonoid valflerden “Sv1” açık “Sv2” kapalı konumda olacaktır. Bu durumda soğutucu akışkan kurutucu filtreden, selonoid valf “Sv1” ’den geçerek kılcal boruya “Kb1” ’e gelir. Güneş kolektörlü evaporatör de “Gke”, kondenserde, kurutma havasına verdiği yoğunlaşma gizli ısıyı güneş ışınımından ve dış havadan buharlaşma gizli ısıyı olarak alır.

Sistemin güneş kolektörlü evaporatöründen güneşli günlerde daha fazla ısı çekilerek kondenserde kurutma havasına verilecektir. Dolayısı ile kurutma havası sıcaklığı güneş ışınımı günlerde daha kısa sürede istenilen değere getirilecek ve kompresör çalışma süresi kısalmaktadır. Diğer günlerde ise; kurutma işlemi aralıksız sürdürülebilir. Sistem güneş kolektör özelliği ile güneş ışınımı günlerde daha az enerji sarfiyatında bulunacak, diğer günlerde ise ısı pompası özelliği ile kurutma işleminin devamını sağlayabilecektir. Kurutma havası neminin hazırlanan kurutma programı dahilinde alınması gerektiği zaman selonoid valf “Sv1” kapanacak ve selonoid valf “Sv2” açılarak soğutucu akışkanın kılcal boru “Kb2” ’den geçmesini sağlayacaktır. Bu şekilde soğutucu akışkan fırın içerisindeki evaporatörde (E) kurutma havasının ısıyı çekerek buharlaşacaktır. Hava çiy noktası sıcaklığı altındaki bir yüzeye temas geçeceğinden içerisindeki nemini bu yüzeye bırakarak soğutma ve nem alma olayı meydana gelecektir. Evaporatörden geçerek soğumuş ve

edecektir. Uygun olan nem değeri sağlandığında selonoid valf “Sv2” ’nin kapanması ve selonoid valf “Sv1” ’in açılması ile soğutma ve nem alma olayı durdurulmuş olacaktır. Selonoid valf “Sv1” ’in ve selonoid valf “Sv2” ’nin açılıp kapanması kurutma havasının nem değerine göre, kompresörün çalışıp durması ise kurutma havasının sıcaklığına göre gerçekleşecektir.

Sistem havasının psikrometrik izahı Şekil 2.’de görülmektedir. Sistem de evaporatörden (E) geçen soğutucu akışkan vasıtasıyla kurutma havasının nemi alınacaktır. Soğutucu akışkanın evaporatöre (E) girişi ve çıkışı noktalarını G ve Ç olarak gösterir ve bu noktalara tekabül eden yüzey sıcaklıklarını da G’ ve Ç’ olarak tanımlarsak; soğuk yüzeyde yoğunlaşmanın meydana gelebilmesi için Ç’ noktasının havanın çiy noktası sıcaklığının (ÇN) altında bulunması gerekecektir. Yüzey sıcaklığının çiy noktasının üzerinde (Ç’’) olduğu serpantin kısımlarında yoğunlaşma olmadığından bu kısımlar kuru kalır. Havanın ilerlemesi durumunda yüzey sıcaklığı devamlı düştüğünden yüzey sıcaklığının çiy noktası sıcaklığının altına düştüğü noktaya gelinir ve bu noktadan itibaren yoğunlaşma yani havadan nem çekme olayı başlar. Havanın evaporatörden (E) geçerken değişim eğrisi 1-2 arası, kondenserdeki değişim eğrisi 2-3 noktası ve fırındaki değişim eğrisi ise 3-1 noktası teşkil eder ve kuru termometre sıcaklığı ΔT kadar kurutma odasında azalır. Kurutma odasında nemi yükselterek hava 1 şartına gelir. Burada 1-3 eğrisi kurutma odasının ısı kayıpları ihmal edildiğinde entalpi eğrilerine paralel olacaktır. Uygulamada bu eğri ısı kayıplarıyla Δi kadar entalpi eğrisi altında kalacaktır. 2 noktası ısı pompası sisteminin soğutma kapasitesine bağlı olan



Şekil 2. Sistem Havasının Psikrometrik İzahı

nemini bırakmış olan havanın kondenserden (K) geçerek, sıcaklığı yükselecek ve bağıl nemi düşecektir. Bu işlem havanın nemi uygun değere düşene kadar devam

evaporatör kapasitesine (E), 3 noktası da yine ısı pompasının ısıtma kapasitesine bağlı olan kondenser (K) kapasitesine göre değişecektir. Kurutulan fındıklardaki

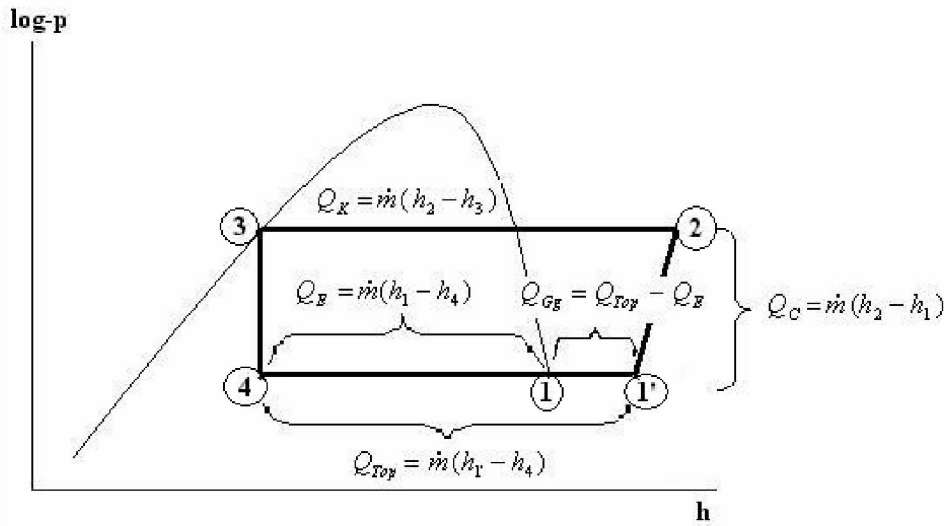
ağırlık değişimi ağırlık ölçer (Aö) (load-cell) vasıtası ile takip edilirken kurutulan fındıklar istenilen nem değerine ulaştığında (%5) kurutma işlemi tamamlanmış olacaktır. Şekil 2.'deki psikrometrik diyagramda gösterilen noktalar Şekil 1.'deki fırın üzerinde de gösterilmiştir.

4. TASARLANAN FIRININ ENERJİ ANALİZİ

Kurutma odasında fındıkların kurutulması için gerekli olan toplam ısı miktarı;

$$Q_{V\text{TOP}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (3)$$

olarak, fırında harcanan yada kaybolan ısılardan toplanması ile bulunur ve kaybolan yada harcanan bu ısılardan aşağıda sırası ile verilmiştir.



Şekil 3. Isı Pompası Sisteminin Log P-h Diyagramı

Fırın duvarlarının ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta T \quad (4)$$

Fırın havasının ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_2 = v \cdot c_2 \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (5)$$

Fındıkların ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_3 = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T$$

Fındıktaki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji:

$$q_4 = S_a \cdot q_{4a} \quad (7)$$

$$q_{4a} = [h''_{ss} - h'_s] \quad (8)$$

“8” nolu eşitlikten kg başına verilen ısı bulunarak “7” nolu eşitlikten de gerekli olan enerji bulunabilir.

Fırından çevre havasına olan ısı kayıplarını karşılamak için harcanan enerji:

$$q_5 = K \cdot A \cdot \left[\frac{(t_k + t_{ic})}{2} - t_d \right] Z \quad (9)$$

“9” nolu eşitlikteki ısı geçirgenlik katsayısı:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{ic}} + \frac{1}{\alpha_{du}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (10)$$

eşitliği ile bulunur (15).

“3” numaralı eşitlikteki gerekli toplam ısı miktarını ısı pompasının kondenseri sağlamalıdır. Gerekli kondenser, evaporatör ve kompresör kapasiteleri çalışma sıcaklık aralıkları belirlenerek kullanılan soğutucu akışkanın log P-h diyagramından yararlanılarak hesaplanabileceğinden çevrimin logP-h diyagramı Şekil 3’de gösterilmiştir.

Kullanılan soğutucu akışkanın log P-h diyagramında:

h_1-h_2 : Kompresör giriş çıkış,

h_2-h_3 : Kondenser giriş-çıkış,

$h_3=h_4$: Kılcal boru giriş-çıkış.

entalpi değerleridir ve kondenser kapasitesi “3” numaralı eşitlikteki gerekli toplam ısının kompresörün dinlenmesi için %25 fazlası kadar alınarak, sistemde kullanılacak soğutucu akışkan debisi;

$$Q_K = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad (11)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. Şekil 3’deki diyagramda gösterilen noktalar Şekil 1.’deki fırın üzerinde de gösterilmiştir.

Kondenserin kurutma havasına verdiği ısı;

$$Q_{ve} = Q_k \cdot F_h \quad (12)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanır. Fırın çalıştığı sürece ısı pompası sistemi de devrede kalacağından, fırın çalışma

süresi (F_h), aynı zamanda ısı pompası çalışma süresidir.

“3” numaralı eşitlikteki gerekli toplam ısı miktarı kondenser kapasitesi kabul edilerek soğutucu akışkan debisi bulunan sistemde, kompresör gücü için de;

$$Q_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (13)$$

eşitliğinden faydalanılır.

Sistemdeki evaporatör kapasitesi ise;

$$Q_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (14)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Isı pompası sistemindeki evaporatörün (Gke), güneş kolektörü şeklinde tasarlanması ile sisteme fazladan bir enerji kazandırılması düşünülmüştür. Güneş kolektörlü evaporatörde (Gke) yapılacak aşırı kızdırma miktarı evaporatör (Gke) çıkışına konulacak bir manometre (Abm) yardımı ile ölçülebilecektir. Güneş ışınları günlerde evaporatörün çektiği ısı;

$$Q_{Top} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (15)$$

eşitliği ile hesaplanacaktır. Eşitlikteki h_4 noktası başlangıçtaki düzen şartında olup h_1 noktası için manometreden (Abm) faydalanılır. Kondenser ve kompresör kapasitesi bilinen sistemin normal evaporatör kapasitesi için Eşitlik 2 kullanılır. Eşitlik 2’den normal evaporatör kapasitesi bulunan sistemin güneş ışınından (Gg) fazladan kazandığı enerji;

$$Q_{Gg} = Q_{Top} - Q_E \quad (16)$$

eşitliği ile bulunacaktır.

Isı pompası sisteminin güneş kolektörlü evaporatörünün (Gke) verimi için;

$$\eta_{KV} = \frac{Q_{Gg}}{I_{TOP}} 100 \quad (17)$$

eşitliğinden faydalanılır. Bunun için kolektör yüzeyine gelen enerjinin (I_{TOP}) hesaplanması gerekmektedir.

Toplam güneş ışınından elde edilen enerjiyi bulmak için;

$$I_{TOP} = [I_{DIR} \cdot R] + I_{DIF} \left[\frac{1 + \cos\beta}{2} \right] + [I_{DIR} + I_{DIF}] r_a \left[\frac{1 - \cos\beta}{2} \right] \quad (18)$$

eşitliğinden yararlanılmıştır (16,17).

Eşitlik “18” de bilinmeyen değerler aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir.

Direkt radyasyon değeri:

$$I_{DIR} = \varphi - I_{DIF} \quad (19)$$

Difüz radyasyon değeri:

$$I_{DIF} = [1 - (1,097 \cdot \varepsilon)] \varphi \quad (20)$$

Bulanıklık faktörü:

$$\varepsilon = \frac{\varphi}{v} \quad (21)$$

$$R = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_2} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \cos\theta = & [\sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta] - [\sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma] + \\ & [\cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega] + [\cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega] + \\ & [\cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\cos\theta_2 = [\sin\phi \cdot \sin\delta] + [\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega] \quad (24)$$

Deklasyon açısı (18):

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right] \quad (25)$$

Eşitlikte “23” ve “24” de kullanılan “ ϕ ” Enlem derecesi olup, “ ω ” saat açısı olup 12:00 ‘den itibaren her saat için 15° , ve “ γ ” azimut açısı olup, kolektör güney yönüne bakacağı için 0° alınarak çözüm yapılabilir. Ayrıca Eşitlik “18” de r_a değeri; eğik düzlem çevresinin toplam güneş radyasyonu için yansıtma katsayısı $\approx 0,2$ dir (19).

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Fındık kurutulması için, kurutma uygulamalarını kurutma sistemlerini ve kurutma işlemi için yapılan hazırlık işlemlerini bilmeyen teknik elemanların yapmasının ve üreticilerin bildikleri ilkel yöntem olan duyuşal muayene ile bu işlemi gerçekleştirmesinin son derece yanlış olduğu kaçınılmaz bir gerçektir. Fındıktaki biyolojik ve fiziksel değişimleri kurutma sırasında ve sonrasında takip edebilecek bir uzman ve kurutma işlemi bilen teknik elemanlar ile birlikte yapılacak çalışma, daha kaliteli ürün eldesi olarak kendini gösterecektir.

Yapılan bu çalışmada, kurutma sırasında ve sonrasında fındıkta oluşabilecek kurutma kusurları araştırılmış ve bu kurutma kusurlarını ortadan kaldıracak sıcaklık, nem ve ağırlık kontrollü (kondenzasyonlu) bir kurutma fırınının modellenmesi yapılmıştır. Yapılan modelleme ile sistemde kullanılan cihazların kapasite tayini yapılabilecek ve kurutma sırasında gerçekleşen enerji değişimi analiz edilebilecektir. Tasarlanan ve enerji analizi ayrıntılı olarak yapılan sistemde ısı pompası içerisinde güneş enerjisinden faydalanılması ile kurutma işleminde enerji tasarrufu sağlanabilecektir. Böylece Türkiye’de üretilen ve büyük bir pazar payına sahip olan fındık, daha az enerji sarfiyatı ile kontrollü olarak yapılan kurutma işlemi sonucunda daha erken ve daha kaliteli olarak iç ve dış piyasaya sunulabilecektir.

6. KAYNAKLAR

1. Olgun, H., Rzyayev P., 2000, "Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması" Tr J Engin Environ Sci, Tübitak, 24, 1-14.
2. Özdemir, M., 1998, "Factors influencing shelf life of hazelnut", Gıda Teknolojisi, p 66-71, www.okyanusbilgiambari.com.
3. Ruşen, M., Turan A., 2003, "Organik Fındık Yetiştiriciliği", Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü, Fındık Araştırma Enstitüsü, Giresun.
4. TSE-3075, "İç Fındık", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s. 6.
5. Bıçakçı, M., 1989, "Doğu Karadeniz Bölgesinde Havalı Güneş Kolektörleri İle Prototip Fındık Kurutma Tesisatı Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
6. Çetin, M., 1994, "Fındığın Dönel Silindirde Kurutulmasının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
7. Demirbaş, M., 2000, "Fındıkta Kurutma Sistemlerinin Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
8. Demirtaş, C., 1996, "Fındık Kurutma Şartlarının Belirlenmesi", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
9. Demirtaş, C., Ayhan, T., Kaygusuz, K., 1998, "Drying Behaviour of Hazelnut", Journal Science of Agriculture, 76, 559-564.
10. Lopez, A., Pique, M., T., Boatella, J., Ferran, A., Garcia, J., Romero, A., 1998a, "Drying characteristics of the hazelnut", Drying Technology, 16, 3-5, 627-649.
11. Lopez, A., Pique, M., T., Romero, A., 1998b, "Simulation of deep bed drying of hazelnut", Drying Technology, 16, 3-5, 651-665.
12. Lopez, A., Pique, M., T., Boatella, J., Romero, A., Ferran, A., Garcia, J., 1997a, "Influence of drying conditions on the hazelnut quality, I. Lipid Oxidation", Drying Technology, 15, 3-4, 965-977.
13. Lopez, A., Pique, M., T., Ferran, A., Romero, A., Boatella, J., Garcia, J., 1997b, "Influence of drying conditions on the hazelnut quality, II. Enzymatic Activity", Drying Technology, 15, 3-4, 979-988.
14. Lopez, A., Pique, M., T., Boatella, J., Romero, A., Ferran, A., Garcia, J., 1997c "Influence of drying conditions on the hazelnut quality, III. Browning", Drying Technology, 15, 3-4, 989-1002.
15. TSE-1501, "Kereste Kurutma Odaları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.1-11.
16. Reddy, T., A., 1987, "The Design and Sizing of Active Solar Thermal Systems", Oxford University Press, New York, pp 4-10.
17. Bayram, A., 2001, "Farklı Yapım Özelliklerine Sahip Doğal Dolaşımli Güneşli Su Isıtma Sistemlerinin Deneysel

Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s, 8-20.

18. Uyarel, A. Y., Öz, E. S., 1987, "Güneş Enerjisi ve Uygulamaları", Emel Matbaacılık, Ankara, s, 66.
19. Aktaş, M., 2003, "Güneş Enerjili Tabii Sirkülayonlu Dolaylı Sıcak Su Hazırlama Sistemlerinde Kanatçık Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s, 10-50.

SEMBOLLER

A	Toplam fırın duvar yüzey alanı (m^2)
c_1	Duvar malzemelerinin özgül ısısı ($kJ/kg K$)
c_2	Havanın özgül ısısı ($kJ/kg K$)
d	Duvarları oluşturan her bir katmanın kalınlığı (m)
F_h	Fırın çalışma süresi (saat)
h	Soğutucu akışkanın entalpisi (kJ/kg)
h'_s	Suyun ısı miktarı (Entalpi) (kJ/kg)
h''_{ss}	Suyun doymuş buhar halindeyken ısı miktarı (Entalpi) (kJ/kg)
K	Fırın duvarlarının ısı geçirgenlik katsayısı ($W/m^2 K$)
\dot{m}	Soğutucu akışkan debisi (kg/h)
m_1	Duvar malzemelerinin toplam kütlesi (kg)
m_f	Kurutulacak fındıkların kütlesi (kg)
c_f	Fındığın özgül ısısı (kJ/kgK)
Q_{VTOP}	Kurutma işlemi için gerekli toplam enerji miktarı (kJ)
Q_{Gg}	Güneş kolektörlü evaporatörde fazladan kazanılan enerji (kJ)
Q_K	Kondenser kapasitesi (kJ)
Q_C	Kompresör gücü (kJ)
Q_E	Evaporatör kapasitesi (kJ)
Q_{ve}	Kondenserin kurutma havasına verdiği ısı (kJ)
Q_{Top}	Güneş ışınli günlerde evaporatörün (Gke) çektiği toplam ısı (kJ)
q_1	Duvarların ısıtılması için gerekli enerji miktarı (kJ)
q_2	Fırın havasının ısıtılması için gerekli enerji miktarı (kJ)
q_3	Fındıkların ısıtılması için gerekli enerji (kJ)
q_4	Fındıklardaki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji (kJ)
q_{4a}	Fındık içerisindeki suyun buharlaştırılması için kg başına verilmesi gerekli enerji (kJ/kg)
q_5	Fırından çevre havasına olan ısı kayıpları (kJ)
S_a	Fındık içerisindeki toplam su miktarı (kg)

M_1	Kurutmadan önce numune kütlesi, g	Z	Isıtma süresi (saat)
M_2	Kurutmadan sonra numune kütlesi, g	I_{DIR}	Direkt radyasyon, (W/m ² gün)
M_0	Kuru madde kabının darası kütlesi, g	I_{DIF}	Difüz radyasyon, (W/m ² gün)
t_k	Kurutma fırınının işletme sıcaklığı (°C)	E	<i>Bulanıklık faktörü</i>
$t_{iç}$	Kurutmaya başlamadan önceki iç hava sıcaklığı (°C)	Φ	Ortalama yatay yüzey radyasyon değeri, (W/m ² gün)
t_d	Dış hava sıcaklığı (°C)	N	Ortalama atmosfer öncesi radyasyon değeri, (W/m ² gün)
v	Fırın hacmi içerisindeki toplam hava miktarı (m ³)	r_a	Eğik düzlem çevresinin toplam güneş radyasyonu için yansıtma katsayısı $\approx 0,2$ 'dir.
$\alpha_{iç}$	İç yüzey ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)	β	Güneş kolektörünün yatayla yaptığı açı
α_{dis}	Dış yüzey ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)	δ	Deklinasyon açısı
λ	Duvarları oluşturan her bir katmanın ısı iletim katsayısı (W/mK)	ϕ	Enlem derecesi
ΔT_k	Fırın işletme sıcaklığı ile fındık sıcaklığı arasındaki fark (°C)	γ	Azimut açısı
ΔT	Fırın işletme sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığı arasındaki fark (°C)	ω	Saat açısı
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)	n	Hesabı yapılan gün, (takvimde 1 Ocak'tan itibaren kaçınıcı gün ise...)
		I_{TOP}	Kolektör yüzeyine gelen toplam güneş ışınımından elde edilen enerji, (kJ/gün)