



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Dilimlenmiş elma ve havucun ısı pompası tekniği ile kurutulması: performans analizi

Drying of sliced apple and carrot with heat pump technique: performance analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa AKTAŞ¹, Meltem KOŞAN², Cem ÇATALBAŞ³, Mert GÖK⁴

ORCID¹: 0000-0003-1187-5120

ORCID²: 0000-0001-7311-9342

ORCID³: 0000-0001-9504-5823

ORCID⁴: 0000-0001-5255-8282

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aktaş M., Koşan M., Çatalbaş C. ve Gök M., “Dilimlenmiş elma ve havucun ısı pompası tekniği ile kurutulması: performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 523-529, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.534443

Dilimlenmiş Elma ve Havucun Isı Pompası Tekniği ile Kurutulması: Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa AKTAŞ, Meltem KOŞAN*, Cem ÇATALBAŞ, Mert GÖK

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Bölümü, Ankara, Türkiye
(UMAS'17 Sempozyumunda sunulmuş ve genişletilmiş bildiridir.)

(Geliş/Received : 12.01.2017 ; Kabul/Accepted : 23.02.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, atık ısı kaynaklı ısı pompalı bir kurutucuda 2 mm kalınlıkta dilimlenmiş havuç ve elma dilimleri 40 °C sıcaklıkta ve 1,5 m/s kurutma havası hızında kurutulmuş, kurutma kinetikleri ve sistem performansları analiz edilmiştir. Kurutma sistemi; frekans invertörlü fan, ısı pompası sistemi ve yük hücreli kurutma odasından oluşmaktadır. Deneysel veriler ile elde edilen nem içeriğindeki değişim havuç için 7,19 g su/g kuru madde miktarından 0,098 g su/g kuru madde miktarına 9 saatte, elma için 4,55 g su/g kuru madde miktarından 0,13 g su/g kuru madde miktarına 11 saatte gerçekleşmiştir. Isı pompası tüm sistem performans katsayıları ise havuç için 3 - 3,44 arasında ve elma için 3,15 - 3,43 arasında değişiklik göstermiştir. Kurutma odasından çıkan atık havanın evaporatör yüzeyine gönderilmesiyle ısı pompasının performans katsayısının arttığı görülmüştür, evaporatör yüzeyine gönderilen bu havanın %70 i atık havadan %30 u ise ortam havasından oluşmaktadır. Performansı test edilen bu atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucu prototipinin özellikle düşük sıcaklıklarda sebze-meyve ve diğer kurutma uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, ısı pompası, havuç dilimi, elma dilimi.

Drying of Sliced Apple and Carrot with Heat Pump Technique: Performance Analysis

ABSTRACT

In this study, 2 mm thick sliced carrots and apple slices were dried at a temperature of 40 °C and a drying air velocity of 1.5 m/s in heat pump dryer which has a waste heat source, and drying kinetics and system performances were analyzed. Drying system consists of fan with frequency inverter, heat pump system and drying chamber with load cell. The change in moisture content obtained with the experimental data was from 7,19 g water/g the amount of dry matter to 0,098 g water/g the amount of dry matter for carrot at 9 hours, and from 4,55 g water/g the amount of dry matter to 0,13 g water/g the amount of dry matter for apple at 11 hours. Whole system heat pump performance coefficient values were varied between 3 and 3,44 for carrots and between 3,15 and 3,43 for apples. It is seen that the performance coefficient of the heat pump is increased by transferring the waste air from the drying chamber to the evaporator surface, and 70% of this air sent to the evaporator surface is composed of waste air and 30% is composed of ambient air. It has been observed that heat pump dryer prototype, which has been tested for performance, can be used successfully in vegetable-fruit and other drying applications, especially at low temperatures.

Keywords: Drying, heat pump, carrot slice, apple slice.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanların yaşamlarını sürdürebilmeleri için devamlı olarak enerji ihtiyaçlarını karşılamaları gerekmektedir. Bu sebeple enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek için bitkisel gıdaların kullanımına yönelmişlerdir ancak her mevsimde çeşitli gıdalara ulaşılamadığı için ürünlerin uzun süre muhafaza edilmesi gerektiği görülmüştür. Zamanla çeşitli muhafaza yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en ideal olanlarından birisi de kurutarak muhafaza yöntemidir. Gıda kurutması, gıdaların bozulmasına neden olan etkenlerin ortadan kaldırılması için gıdalardaki nemin farklı yollar ile uzaklaştırılması işlemidir. Gıda kurutma işleminde iki önemli unsur bulunmaktadır; bunlar, ürünün kalitesinde bozulmanın

önlenmesi ve kurutma için kullanılan enerjinin azaltılmasıdır. Günümüzde hala kullanılan ve en eski yöntem olan güneşte sergi yöntemiyle kurutma, kurutma kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Ancak teknolojiye bağlı olarak daha kaliteli kurutma metodları geliştirilmeye çalışılmaktadır [1,2].

Kurutma, kurutma sistemleri ve teknikleri, elma ve havucun kurutulması ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Özgen [3] konvektif tip bir kurutucu tasarlayarak elmanın kuruma özelliğini deneysel olarak araştırmıştır. 45 °C sabit kuruma havası sıcaklığı ve 0,5, 1 ve 1,5 m/s kurutma havası hızı için yaptığı deneylerde kurutma havası hızının kurutma süresi üzerinde önemli rol oynadığını görmüştür. Elmanın kuruma süresini 1,5 m/s için 150 dakika, 1 m/s için 225 dakika ve 0,5 m/s için 285 dakika olarak analiz etmiştir. Taze olarak kullanılan elmaları renkleri kararmadan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mlmkosan@gmail.com

başarılı bir şekilde kurutabilmiştir. Wang vd. [4] ince dilimlenmiş elmaları 75, 85, 95 ve 105 °C sıcaklıklarda ve 1.2 m/s hava hızında kurutmak için gerçekleştirdikleri bir çalışmada farklı matematiksel modeller incelemişlerdir ve nem transferinde logaritmik modelin daha iyi tahminler sunabildiğini göstermişlerdir. Zlatanovic vd. [5] ince tabaka elma küplerinin sıcaklık, bağıl nem, hız ve malzeme boyutlarının kuruma kinetiğine bağımlılığını deneysel olarak araştırmışlar ve Henderson & Pabis matematiksel model ile kıyaslamışlardır.

Demiray [6] sıcak hava ile kurutma, vakumlu kurutma, mikrodalga kurutma ve bunların çeşitli kombinasyonlarını kullanarak havuç ve kırmızıbiber kurutmuştur. Araştırmada kullanılan havuç ve kırmızı biber örneklerinin kuruma karakteristiklerini belirlemiş ve yarı teorik kurutma modellerinden Page ve Modifiye Page modellerinin deneysel nem oranı değişimini en iyi tanımlayan modeller olduğunu belirtmiştir. Mengeş ve Ertekin [7] 3, 6, 9 mm kalınlıkta halka şeklinde dilimlenmiş havuçları 55, 65, 75 °C sıcaklıkta ve 2 ve 3 m/s kurutma havası hızlarında kurutarak kurutma kinetiğini incelemişlerdir. Kurutma havası sıcaklığı ve hızı arttığında kuruma hızının ve efektif difüzyon katsayısının da arttığını, havuç dilimlerinin kalınlığı arttığında ise kuruma hızının azaldığını ve efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Erbay vd. [8] havuç dilimlerini dondurarak kurutarak renk ve rehidrasyon özellikleri üzerine farklı antioksidan çözeltilerin etkilerini araştırmışlardır.

Phani vd. [9] kapalı çevrimli sürekli akışlı ısı pompası destekli bir kurutma sistemi tasarlamışlar ve deneysel olarak analiz etmişlerdir, araştırmacılar ürün kalitesi optimizasyonu için düşük sıcaklıklarda (30-35 °C) bazı özel bitkileri kurutmuşlardır, çeşitli mahsüller için özgül nem çekme oranını (SMER) 0,06-0,61 kg/kWh aralığında hesaplamışlardır. Isı pompalı kurutucunun elektrikli tel ısıtıcı konvansiyonel sisteme kıyasla %22 enerji tasarrufu sağladığını ve kuruma süresinin %65 azaldığını tespit etmişlerdir. Atalay [10] güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemi ile kurutma sistemi geliştirmiştir. Güneş enerjili kurutucuda performans etki eden faktörleri deneysel olarak belirlemiştir. Isı depolama sistemi olarak izolasyonlu çakıl taşı yataklı bir sistem tasarlanarak imalatını gerçekleştirmiştir. Bu sistemde 5-10 mm kalınlığındaki elma dilimlerinin kuruma davranışlarını incelemiştir. Yapılan kurutma sistemini düşük nem ve sıcaklık değerlerinde kurutulan ürün kalitesi için olumlu bir etki yarattığını belirtmiştir.

Havuç ve elma yaklaşık %88 oranında su içermektedir. Bu ürünlerin kurutulması sonucunda yaklaşık 10 kg yaş üründen 1 kg kuru ürün elde edilmektedir. Kurutma esnasında üründeki su buharlaşır ve ürünün öz kısmı kalır. Kurutma yapıldıktan sonra üründeki besin değerleri özellikle karbonhidrat, vitamin, protein oranları çok yükselmiş olur. Havuç ve elmanın kurusunun dünya sebze-meyve pazarındaki ticari öneminin büyük olması ve Türkiye’de bol miktarda havuç ve elmanın bulunması

sebebiyle bu çalışmada ürün olarak elma ve havuç seçilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında sonucunda düşük sıcaklıkta kurutma yapılması ile besin değerlerinin korunduğu görülmüştür. Bu çalışmada, ısı pompalı kurutucu prototipinde elma ve havuç kurutularak sistem test edilmiş ve termodinamik analiz yapılmıştır. Bu prototipi diğer ısı pompalı sistemlerden ayıran en önemli unsur, kurutma odasından çıkan atık havanın dış hava ile karıştırılarak evaporatör yüzeyine gönderilmesidir.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Isı pompası çevriminde temek olarak kompresör, kondenser, genleşme vanası ve evaporatör bulunur. Isı pompaları hava, su ve toprak kaynaklı olmak üzere 3 gruba ayrılır. Yapılan bu çalışmada hava kaynaklı bir ısı pompası sistemi kullanılarak elma ve havuç dilimleri kurutulmuştur. Kurutma için gerekli olan ısı sistemin kondenserinden sağlanmaktadır. Kondenserden sağlanan ısı [11]:

$$\dot{Q}_{kon} = \dot{m}_{gh}(h_{ch} - h_{gh}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{gh} = \rho_{gh} \cdot \dot{V}_{gh} \quad (2)$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada \dot{Q}_{kon} kondenserden atılan ısıyı, \dot{m}_{gh} kondensere giren havanın kütleli debisini, h_{gh} kondensere giren havanın entalpisini, h_{ch} kondenserden çıkan havanın entalpisini, ρ_{gh} kondensere giren havanın yoğunluğunu, \dot{V}_{gh} kondensere giren havanın hacimsel debisini ifade etmektedir.

İdeal bir soğutma çevrimi için maksimum ısıtma tesir katsayısı $COP_{c,h}$ Carnot çevrimi ile hesaplanır, burada T_K kondenserin bulunduğu ortam sıcaklığını, T_E evaporatörün bulunduğu ortam sıcaklığını ifade etmektedir [12]:

$$COP_{c,h} = \frac{T_K}{T_K - T_E} \quad (3)$$

Uygulamada ısı pompasının kompresöründe elektrik enerjisi tüketimi meydana gelmektedir. Sistemde bulunan diğer ekipmanlarda enerji tüketebilir, örneğin fan, pompa v.b. Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı COP_{IP} aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır, burada \dot{W}_c kompresör gücünü, U şebeke gerilimini, I_c ise kompresörün şebekeden çektiği akımı ifade etmektedir [13]:

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{kon}}{\dot{W}_c} \quad (4)$$

$$\dot{W}_c = U \cdot I_c \quad (5)$$

Tüm sistem için ısıtma tesir katsayısı COP_{sistem} ’in hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılır, burada t sistemin çalışma süresini, $E_{tüketim}$ çalışma süresi boyunca tüketilen elektrik enerjisini, \dot{W}_f fan gücünü ifade etmektedir:

$$COP_{sistem} = \frac{\dot{Q}_{kon} \cdot t}{E_{tüketim}} \quad (6)$$

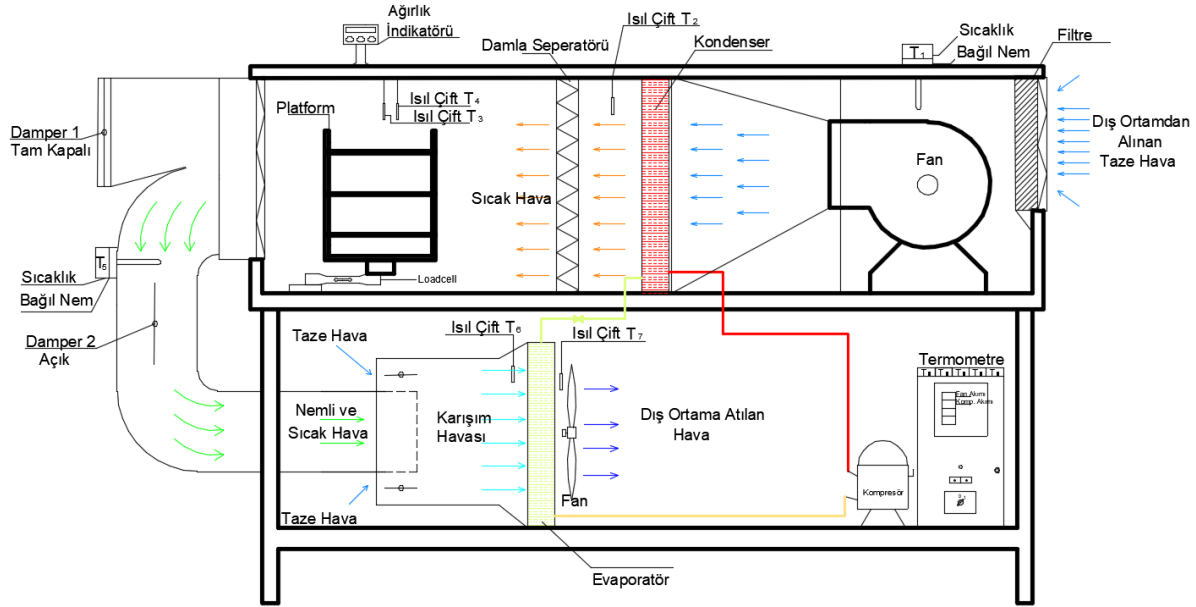
$$E_{tüketim} = (\dot{W}_c + \dot{W}_f) \cdot t \quad (7)$$

Elma ve havuçlardaki kuru baza göre nem içeriği MC_{KA} 'nın hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır, burada YA yaş ürün ağırlığını, KA kuru ürün ağırlığını ifade etmektedir:

$$MC_{KA} = \frac{YA-KA}{KA} \quad (8)$$

Elma ve havuçlardaki yaş baza göre nem içeriği

ısıtılması, yaş ürünündeki nemin buharlaştırılması ve toplam ısı kayıplarından oluşur. Şekil 1'de verilen atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucu prototipi ısı pompası sistemi, frekans invertörlü fan ve yük hücresi üzerinde ürünlerin asılarak kurutulabileceği bir platforma sahip kurutma odasından oluşmaktadır. Atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucu prototipinde kurutma havası sıcaklık



Şekil 1. Atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucu prototipi (Waste heat source heat pump dryer prototype)

MC_{YA} 'nın hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$MC_{YA} = \frac{YA-KA}{YA} \quad (9)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır [14].

Kurutma sırasında elma ve havuçlardaki nem oranı MR 'nin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılabilir:

$$MR = \frac{MC_{KA(t)} - MC_e}{MC_{KA(0)} - MC_e} \quad (10)$$

Burada $MC_{KA(t)}$, t anındaki kuru baza göre nem içeriğini, MC_e , kuru baza göre denge nemi içeriği ve $MC_{KA(0)}$, başlangıçtaki nem içeriğidir. Ancak, taze meyvelerin yüksek nem içeriği nedeniyle, formül aşağıdaki gibi yazılabilir [15]:

$$MR = \frac{MC_{KA(t)}}{MC_{KA(0)}} \quad (10a)$$

elma ve havuçlardaki nem oranı eşitlik (10a) kullanılarak hesaplanmıştır.

Kurutma sırasında birim zamanda uzaklaştırılan nemin kütlesi nem alma hızı (MER) olarak adlandırılmaktadır ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [16]:

$$MER = \left(\frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{kuruma süresi}} \right) \quad (11)$$

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bir kurutma prosesinde gerekli ısı yükü; kurutulacak ürünün ısıtılması, kurutma odasının iç kısmındaki materyallerin ısıtılması, kurutma için gerekli havanın

değeri set edilerek, kurutma odasının sıcaklığı kontrol altında tutulmuştur. Bu prototipte kurutma için gerekli ısı yükü hesaplanarak evaporatör, kondenser, kompresör güç değerleri belirlenmiştir.

Isı pompalı kurutma proseslerinde genel olarak atmosferden alınan dış hava, ısı pompası sisteminin kondenserinden aldığı ısıyla birlikte ürün yüzeyine gönderilir. Kondenserden aldığı ısıyla ürünündeki nemi buharlaştıran hava ürünündeki nemi bünyesine alarak dış ortama atılır. Isı pompaları için en önemli husus kondenserden sağlanan ısının sürekliliği için evaporatördeki soğutucu akışkanın tamamen buharlaşmasıdır. Bu nedenle atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucu prototipinde dış ortamdan ortalama 21 °C sıcaklıkta ve %38 bağıl nemde fan yardımıyla alınan hava, kondenser yüzeyinden geçirilerek ısıtılmaktadır, 40 °C sıcaklıktaki hava kurutma odasında ürün yüzeyine gönderilerek ürünün ihtiva ettiği nemi bünyesine almaktadır. Kurutma odası çıkışında hava ortalama 35 °C sıcaklığa %21 bağıl neme sahiptir. Bu nemli ve sıcak hava, dış ortamdan alınan taze hava ile belirli bir oranda karıştırılarak evaporatör yüzeyine ısı pompasının ısıl dengesini sağlamak için gönderilmektedir. Son olarak evaporatörden çıkan hava atmosfere atılmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda evaporatör yüzeyinden geçen karışım havasının %30'unu ortam havası %70'ini ise atık hava oluşturmuştur. Prototipte ısı pompasının ısıtma kapasitesi 3.7 kW olup, soğutucu akışkan olarak R410A gazı kullanılmıştır.

Tepsili sistem kurutucularda, sıcak ve kuru hava ürünün tamamına temas etmediği için ürünün homojen olarak kurutulmadığı bilinmektedir. Bu çalışma ile Şekil 1’de tasarımı yapılan atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucu prototipinde, kurutma odasına dilimlenmiş yaş maddeler homojen olarak asılarak, havanın kurutulacak yaş maddeye daha fazla temas etmesi sağlanmıştır. Böylece hem ısı-kütle transferi artırılmış hem de ürünler homojen olarak kurutulmuştur.

3.1. Kuru Madde Miktarının Belirlenmesi (Determination of Dry Matter Quantity)

Deneylere başlanmadan önce temin edilen havuç ve elmaların kuru madde miktarının belirlenmesi için ön hazırlık işlemleri yapılmıştır. Kuru madde miktarının belirlenmesindeki prensip havuçların ve elmaların sıcaklığını kontrol altında tutulabildiği bir fırında 105 °C’de son iki ölçüm arasındaki ağırlık değişimi %1’ in altına düşene kadar kurutulmasıdır. Burada meydana gelen kütle kaybıyla ürünlerdeki nem miktarı belirlenmiştir.

Kuru madde miktarının belirlenmesi sırasında aşağıdaki işlemler sırasıyla takip edilmiştir:

- Deneylerden önce havuç ve elmalar 2 mm kalınlığında dilimlenmiştir.
- Havuçlar ve elmalar 105 °C sıcaklık değerinde kurutma fırınında kurutulmaya başlanmıştır.
- Ağırlık değişimi saatte bir takip edilerek son iki ölçüm arasındaki fark %1’ den az oluncaya kadar kurutma işlemine devam edilmiştir ve fark %1 in altına düştüğünde ürünler kuru kabul edilmiştir. Saatte bir alınan ağırlık ölçümleri dijital ortamda kaydedilmiştir. Ağırlık ölçümlerinde RADWAG marka PS 510.R1 model tartı kullanılmıştır. Ürünlerin kuru baza göre başlangıç nem miktarı Eşitlik (8) kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2. Ürünlerin Kurutulması (Drying of Products)

Başlangıç nem miktarları belirlendikten sonra 500 gram yaş ürün (ilk deney havuç sonra elma) hava ile temas yüzey alanının artırılması amacıyla 2 mm kalınlıkta dilimlenerek iplere asılmış ve hava akışına dik

pozisyonda kurutucudaki platforma yerleştirilerek kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Kurutma odasında ürün bulunmayan yan bölgeler kapatılarak havanın tamamen ürüne nüfuz etmesi sağlanmıştır. Ürüne temas eden havanın hızı 1,5 m/s olarak ölçülmüştür. Kurutma sisteminde havuç ve elma için kurutma havası sıcaklık değeri 40 °C olarak belirlenmiştir. Kurutma havası sıcaklığı proses kontrol cihazından set edilerek kurutma işlemine başlanmıştır.

3.3. Kurutma İşleminin Sonlandırılması (Completed of Drying Process)

Ürünlerdeki son nem miktarı ve yapılan duyu analizi sonucunda kurutma işlemi sonlandırılmıştır.

3.4. Belirsizlik Analizi (Uncertainty analysis)

Yapılan deneylerde ölçülen değerlerin doğruluğunu etkileyen en önemli parametre, deneyler sırasında farklı nedenlerden dolayı oluşabilecek ölçüm hatalarıdır. Kullanılan cihazların özelliklerine bağlı olarak ölçüm hataları farklılık gösterebilir. Bu hatalar için belirsizlik analizi adı verilen hassas bir yöntem kullanılmaktadır. Belirsizlik analizi için bir değer ölçülmesinde olabilecek hatalar dikkate alınarak toplam hata hesabı eşitlik (12)’de verilen denkleme göre yapılabilir [17].

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

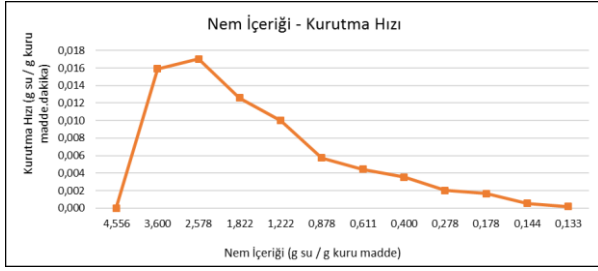
Burada w_1, w_2, \dots, w_n her bir bağımsız değişkene ait hata oranları, R, x_1, x_2, \dots, x_n ise bağımsız değişkenlerdir. Bu çalışmada kullanılan cihazların teknik özellikleri ve hata oranları Çizelge 1’de verilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada Türkiye’de çok miktarda yetiştirilen elma ve havuç, uygulanan kurutma yöntemi ile atık ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucuda homojen olarak kurutulmuştur. Elma için yapılan deneyde nem içeriği-kurutma hızı değişimi Şekil 2’de verilmiştir.

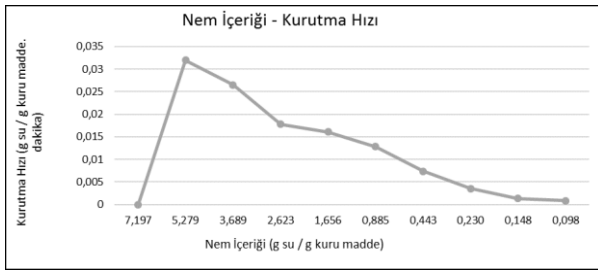
Çizelge 1. Cihazların teknik özellikleri (Technical properties of equipments)

Kullanılan Cihaz	Teknik Özellikleri	Hata Analizi
Isıl çift	Sıcaklık 0-1200 °C, ±0,1 °C	±0,11 °C
Bağıl nem ve sıcaklık transmitteri	%0-100 bağıl nem için ±%2 ölçüm hassasiyeti, çalışma sıcaklığı -40+120 °C sıcaklıkta ±1 °C ölçüm hassasiyeti, çalışma sıcaklığı -10+60 °C	±%2,23 RH ±1,118 °C
Hava hızı ve sıcaklık ölçüm cihazı	Sıcaklık -20,+70 °C, hız 0-20 m/s ölçüm hassasiyeti ±0,01 m/s, ±0,1 °C, NTC sensör	±0,0141 m/s ±0,15 °C
Ağırlık ölçer (Loadcell)	5 kg kapasite, 40-80 °C, 5-12 (DC), hassasiyeti ±%0,02	±%0,025
Dijital Tartı	Kapasite 6100 g, ölçüm hassasiyeti ±0,01g	±%0,2601



Şekil 2. Elma deneyinde nem içeriği-kurutma hızı değişimi (Moisture content-drying rate change for apple experiment)

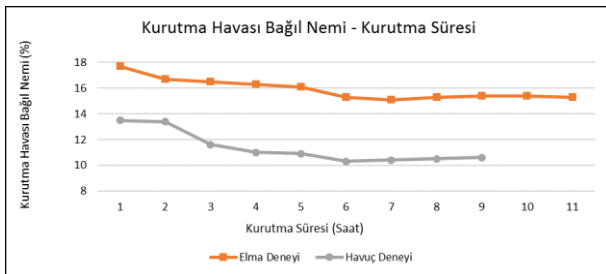
Havuç için yapılan deneyde nem içeriği kurutma hızı değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Havuç deneyinde nem içeriği-kurutma hızı değişimi (Moisture content-drying rate change for carrot experiment)

Kurutma hızı her iki deneyde de başlangıçta yükselmiş ve daha sonra azalan bir eğim göstermiştir. Yüksek kuruma hızlarında elmadaki nem daha hızlı uzaklaşmaktadır.

Deneylerde elma ve havuç kurutulması esnasında kurutma havasının bağıl neminin değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi bağıl nem elma için 15,9, havuç için 11,3 aralığındadır.

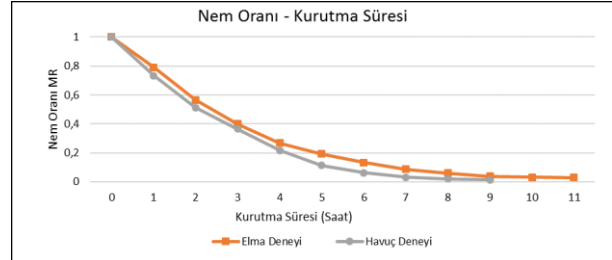


Şekil 4. Kurutma süresince kurutma havasının bağıl nem değişimi (Change of relative humidity of drying air during drying)

Elma dilimleri 40 °C kuru termometre sıcaklığında ortalama %15,9 bağıl nemde ve 1,5 m/s hava hızına sahip kurutma havası ile kuru baza göre 4,55 g su/g kuru madde miktarından 0,13 g su/g kuru madde miktarına 11 saatte düşürülmüştür. Dilimlenmiş havuçlar ise 40 °C kuru termometre sıcaklığında ortalama %11,3 bağıl nemde ve 1,5 m/s hava hızına sahip kurutma havası ile kuru baza

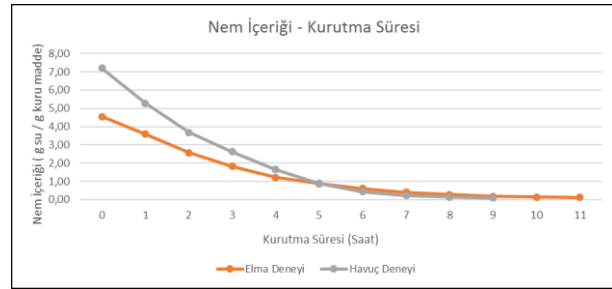
göre 7,19 g su/g kuru madde miktarından 0,098 g su/g kuru madde miktarına 9 saatte düşürülmüştür.

Kurutma süresi boyunca elma ve havuç için nem oranının değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi zamana bağlı olarak nem oranı oldukça dengeli şekilde azalan eğim göstermiştir.



Şekil 5. Nem oranı-kurutma süresi değişimi (Moisture rate-drying time change)

Kurutma süresi boyunca elma ve havuç için nem içeriğinin değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Nem içeriği-kurutma süresi değişimi (Moisture content-drying time change)

Şekil 6'da görüldüğü gibi elma dilimleri kuru baza göre 4,55 g su/g kuru madde miktarından 0,13 g su/g kuru madde miktarına 11 saatte düşürülmüştür. Havuç dilimleri ise kuru baza göre 7,19 g su/g kuru madde miktarından 0,098 g su/g kuru madde miktarına 9 saatte düşürülmüştür.

Sonuç olarak tarım ürünlerinin taze bir şekilde, yetiştirildiği bölgeden diğer bölgelere aktarılması gerekmektedir. Ancak bu aktarım sırasında ürün özelliklerinin bozulmaması, besin değerlerini kaybetmemesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle ürün özelliklerinde herhangi bir bozulma olmadan aktarım şartlarının kolaylaştırılması ve birim hacimde daha fazla ürün aktarılabilmesi için ürünün ihtiva ettiği nemin üründen uzaklaştırması yani kurutulması gerekir.

Türkiye'de 2016 yılında 2925828 ton elma, 554736 ton havuç üretilmiştir. Bu üretimlerden 132232 ton elma ve 69944 ton havuç ihracatı yapılmıştır. Bu veriler ele alındığında üretilen elma ve havucun bir kısmının kurutulması ile bu ürünlerden her mevsim faydalanılabilir ve kuru ürünlerin de ihracatı yapılarak ülke ekonomisine katkıda bulunulması mümkündür [18,19].

Çizelge 2. Isı pompası uygulaması ile ilgili önceki bazı çalışmalar (Some previous work on heat pump application)

	Soğutucu Akışkan	COP _{Sistem}	COP _{Isı Pompası}
Sivasakthivel ve ark. [20]	R22	3,1-2,8	3,3-3,5
Zhang ve ark. [21]	R134a	1,95- 4,35	3,36-5,94
Aktaş ve ark. [22]	R134a	2,4-3,2	2,8-3,7
Queiroz ve ark. [23]	-	2,14-2,20	2.56–2.68
Hepbasli ve ark. [24]	R22	1,339	1,656
Kuang ve Wang [25]	R22	2,1-2,7	2,6-3,3
Esen ve ark. [26]	R22	2,68-2,82	3,13-3,42
Aktaş ve ark. [27]	R410a	2,62	4,06
Bu çalışma havuç deneyi	R410a	3-3,44	3,47-4
Bu çalışma elma deneyi	R410a	3,15-3,43	3,63-4

Bu çalışmada kurutma öncesinde, sırasında ve sonrasında nem miktarının ölçümleri yapılmış kurutma havası sıcaklığı ve hızı kontrol edilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, daha önce yapılmış benzer çalışmalar ile Çizelge 2’de soğutucu akışkan ve performans katsayısı değerlerine göre kıyaslanmıştır. Sonuç olarak elde edilen COP değerlerinin daha önceki birçok çalışmanın üstünde olduğu görülmüştür. Ayrıca hesaplanan nem alma hızları, elma deneyinde 0,036 kg su/ h havuç deneyinde 0,048 kg su /h olarak bulunmuştur.

Deney sonuçlarına göre ısı pompasının performans katsayıları ve nem alma hızları hesaplanmıştır. Kurutma işleminde enerji verimliliği de dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardan biridir. Verimli kurutma işlemlerinin yapılabilmesi ve en iyi tasarlanabilmesi için literatürde farklı metotlar ve sistemler denenmektedir. Havuç deneylerinde tüm sistemin performans katsayısı 3 - 3,44 arasında, ısı pompasının ise performans katsayısı 3,47 - 4 arasında hesaplanmıştır, elma deneylerinde ise tüm sistemin performans katsayısı 3,15 - 3,43 arasında, ısı pompasının performans katsayısı ise 3,63 - 4 arasında değişiklik göstermiştir.

Şekil 7’de elma ve havuç dilimlerinin kurutma öncesi ve Şekil 8’de de kurutma sonrası elma ve havuç dilimleri görülmektedir.

**Şekil 7.** Kurutma öncesi dilimlenmiş elma ve havuç (Sliced pieces of apple and carrot before drying)**Şekil 8.** Kurutma sonrası dilimlenmiş elma ve havuç (Sliced pieces of apple and carrot after drying)

Şekilde görülen kurutulmuş ürünlerden alınan numuneler duyu analize tabi tutulmuş, ürünlerde herhangi bir renk veya tat bozulmasına rastlanmamıştır, bu nedenlerden ötürü ısı pompalı kurutucu prototipinin özellikle düşük sıcaklıklarda bulunduğu ortamın şartlarına bağlı olmadan sebze-meyve ve endüstriyel kurutma uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Tasarlanan sistem güneş enerjili sistemler ile entegre edilebilir.

SİMGE ve KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

\dot{Q}_{kon}	Kondenserden sağlanan ısı güç (kW)
\dot{m}_{gh}	Sistem giriş havasının kütleli debisi (kg/s)
ρ_{gh}	Sistem giriş havasının yoğunluğu (kg/m ³)
\dot{V}_{gh}	Sistem giriş havasının hacimsel debisi (m ³ /s)
h_{gh}	Kondenser giriş havasının entalpisi (kJ/kg)
$h_{çh}$	Kondenser çıkış havasının entalpisi (kJ/kg)
$COP_{c,h}$	İdeal soğutma çevrimi için maksimum ısıtma tesir katsayısı
T_K	Kondenserin bulunduğu ortam sıcaklığı (°C)
T_E	Evaporatörün bulunduğu ortam sıcaklığı (°C)
COP_{IP}	Isı pompası ısıtma tesir katsayısı
$COP_{SİS}$	Sistemin ısıtma tesir katsayısı
\dot{W}_c	Kompresörün güç girişi (kW)
U	Faz-nötr şebeke gerilimi (V)
I_c	Kompresörün şebekeden çektiği akım (A)

t	Kurutma sisteminin çalışma süresi (h)
$E_{tüketim}$	Çalışma süresi boyunca tüketilen enerji (kWh)
W_f	Çalışma süresi boyunca fanın tükettiği enerji (kWh)
MC_{KA}	Üründeki kuru baza göre nem içeriği (g su/g kuru madde)
MC_{YA}	Üründeki yaş baza göre nem içeriği (g su/g yaş madde)
KA	Ürünün kuru ağırlığı (g)
YA	Ürünün yaş ağırlığı (g)
MR	Nem oranı
MC_e	Üründeki kuru baza göre denge nem içeriği (g su/g kuru madde)
MER	Birim zamanda uzaklaştırılan nem (kg su/h)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gül D., "Aromatik Bitkilerin Kurutulması İçin Isı Pompası Destekli Vakumlu Kurutma Fırını Tasarımı", *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- [2] Aktaş M., Ceylan İ. and Doğan H., "Isı Pompalı Endüstriyel Fındık Kurutma Fırınının Modellenmesi", *Politeknik Dergisi*, 8: 329-336, (2005).
- [3] Özgen, F., "Elma Kurutulmasında Kullanılan Konvektif Tip Bir Kurutma Sisteminin Tasarımı," *Mühendis ve Makina*, 55: 42-49, (2014).
- [4] Wang Z., Sun J., Liao X., Chen F., Zhao G., Wu, J. and Hu X., "Mathematical Modeling on Hot Air Drying of Thin Layer Apple Pomace," *Food Research International*, 40: 39-46, (2007).
- [5] Zlatanovic I., Komatina M. and Antonijevic D., "Low Temperature Convective Drying of Apple Cubes," *Applied Thermal Engineering*, 53: 114-123, (2013).
- [6] Demiray E., "Havuç ve kırmızıbiberin farklı kurutma yöntemleri ile kurutulması, kuruma karakteristiklerinin ve bazı kalite özelliklerindeki değişimin modellenmesi", *Doktora tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [7] Mengeş H.O. and Ertekin C., "Havucun ince tabaka kuruma karakteristiklerinin incelenmesi", *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2: 353-362, (2006).
- [8] Erbay B., Kıvrak E., Orhan H. and Küçüköner E., "Dondurarak kurutulmuş havuç dilimlerinin renk, rehidrasyon özellikleri ve bazı duyuşsal özellikleri üzerine farklı antioksidan çözeltilerin etkisi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13: 229-236, (2009).
- [9] Phani K.A. and Greg J.S., "Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis", *International Journal of Energy Research*, 29: 961-972, (2005).
- [10] Atalay H., "Güneş enerjisi destekli enerji depolama sistemli kurutma sisteminde elma kurutulmasının incelenmesi", *Doktora tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- [11] Aktas M., Khanlari A., Amini A. and Şevik S., "Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology", *Energy Conversion and Management*, 132: 327-338, (2017).
- [12] Şevik S., "Design, experimental investigation and analysis of a solar drying system" *Energy Conversion and Management*, 68: 227-34, (2013).
- [13] Alves O., "Heat Pump Dryers", CRC Press, Boca Raton, 15-25, (2016).
- [14] Ceylan İ. and Aktaş M., "Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23: 215-222, (2008).
- [15] Ghasemkhani H., Keyhani A., Aghbashlo M., Rafiee S. and A.S. Mujumdar, "Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, 94:13-23, (2016).
- [16] Gürlek G., Akdemir Ö. and Güngör A., "Gıda kurutulmasında ısı pompalı kurutucuların kullanımı ve elma kurutmada uygulanması", *Pamukkale Üniv. Müh. Bilim Dergisi*, 21(9): 398-403, (2015).
- [17] Akpınar E.K., "Deneysel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: Kurutma deneylerindeki hata analizi", *Mühendis ve Makina Dergisi*, 46(540): 41-48, (2005).
- [18] İnternet : Türkiye İstatistik Kurumu "Yıllara Göre Havuç Üretimi İstatistikleri", <https://biruni.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul> (2017).
- [19] İnternet : Türkiye İstatistik Kurumu "Yıllara Göre Elma Üretimi İstatistikleri", <https://biruni.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul> (2017).
- [20] Sivasakthivel T., Murugesan K., Kumar S., Hu P. and Kobiga P., "Experimental study of thermal performance of a ground source heat pump system installed in a Himalayan city of India for composite climatic conditions", *Energy and Buildings*, 131:193-206, (2016).
- [21] Zhang S., Zhang L., Wei H., Jing J., Zhou X. and Zhang X., "Field testing and performance analyses of ground source heat pump", *Energy and Buildings*, 133:615-627, (2016).
- [22] Aktaş M, Şevik S., Özdemir M.B. and Gönen E., "Performance analysis and modeling of a closed-loop heat pump dryer for bay leaves using artificial neural network", *Applied Thermal Engineering*, 87:714-723, (2015).
- [23] Queiroz R., Gabas A.L. and Telis V.R.N., "Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers", *Drying Technology*, 22: 1603-1620, (2004).
- [24] Hepbasli A., Akdemir O. and Hancioglu E., "Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system", *Energy Conversion and Management*, 44:527-548, (2003).
- [25] Kuang Y.H. and Wang R.Z., "Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system", *Solar Energy*, 80:795-803, (2006).
- [26] Esen H., İnalli M. and Esen M., "Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey", *Energy Conversion and Management*, 47:1281-1297, (2006).
- [27] Aktas M., Khanlari A., Aktekel B. and Amini A., "Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 18034-18044, (2017).