



Kuşburnu Pulpunun Kızılötesi Işınım İle İnce Tabaka Kurutulması

İzzet TÜRKER¹ Hilal İŞLEROĞLU^{1*}

*Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, Tokat
* e-posta: hilal.isleroglu@gop.edu.tr

Alındığı tarih (Received): 23.11.2016

Kabul tarihi (Accepted): 03.02.2017

Online Baskı tarihi (Printed Online): 17.04.2017

Yazılı baskı tarihi (Printed): 02.05.2017

Öz: Bu çalışmada, kuşburnu meyvesinden üretilen pulpun kızılötesi ışınlama ile ince tabaka kurutulması işlemi gerçekleştirilmiş ve farklı matematiksel modeller kullanılarak kuruma davranışını en iyi ifade eden model belirlenmiştir. Farklı modellerin kuruma verilerine uygunluğu regresyon katsayısı (R^2), düzeltilmiş regresyon katsayısı (düz.- R^2), ortalama hata kareleri karekökü (RMSE) ve ki-kare (χ^2) değerleri hesaplanıp, deneysel verilerle modelden tahminlenen verilerin karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Ayrıca farklı sıcaklıklarda (50, 60, 70, 80 ve 90°C) kızılötesi ışınlama ile kurutulan kuşburnu pulpunun difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Uygulanan tüm sıcaklıklarda elde edilen deneysel verilere en yakın sonuçları veren modelin Midilli ve ark. modeli olduğu tespit edilmiştir. Difüzyon katsayısı değerlerinin $2.19 \times 10^{-10} - 1.46 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında değiştiği belirlenmiş ve aktivasyon enerjisi 47.91 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kızılötesi ışınlama, ince tabaka kurutma, difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi, kuşburnu

Thin Layer Infrared Drying of Rose Hip Pulp

Abstract: In this study, thin layer infrared drying of rose hip pulp was carried out and the best model defining the drying behavior was determined by using different mathematical models. The goodness of fit was investigated by determination of regression coefficient (R^2), adjusted regression coefficient (adj.- R^2), root mean square error (RMSE) and chi-square (χ^2), and by comparison of experimental and predicted values. Additionally, the diffusion coefficients at different temperatures (50, 60, 70, 80 and 90°C) and activation energy of dried rose hip pulp by infrared radiation were calculated. The model described by Midilli et al. was the best fitting model at all different temperatures. Diffusion coefficients were ranged between $2.19 \times 10^{-10} - 1.46 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and the activation energy was calculated as 47.91 kJ/mol.

Keywords: Infrared radiation, thin layer drying, diffusion coefficient, activation energy, rose hip

1. Giriş

Kurutma işlemi, ısı ve kütle transferinin eş zamanlı gerçekleştiği, gıdalar ve biyoaktif bileşenler gibi birçok materyalin korunması amacı ile kullanılan ve temel olarak korunması istenen materyalden nemin uzaklaştırılması prensibine dayanan bir işlemdir. Geçmişten günümüze halen kullanılmakta olan güneşte kurutma tekniğinin gıda endüstrisi için sürekli olmayışı ve arzu edilen son ürün kalitesinin sağlanamaması gibi nedenlerden dolayı endüstriyel kurutucuların kullanımı zorunlu hale gelmiştir (Miranda ve ark. 2009).

Kurutma teknolojisinin seçimi, gıdanın besleyici içeriğinin ve ürünün fiziksel özelliklerinin olabilecek en iyi şekilde korunması açısından oldukça önemli bir konudur. Gıda işleme tekniklerinin tasarımında kaliteli ürün elde edilmesinin dışında, zaman ve enerji tasarrufunun sağlanması da amaçlanmaktadır. Kızılötesi ışınlama (dalga boyu; 0.76-1000 μm), ısı enerjisini elektromanyetik dalga olarak transfer eden bir ısıtma tekniğidir (Özkoç 2010). Kızılötesi ışınlama, elektromanyetik spektrumda görünür ışık ile mikrodalga arasındaki bölgede bulunmaktadır ve dalga boyu açısından yakın (0.76-2 μm), orta (2-4 μm) ve uzak-kızılötesi (4-1000 μm) şeklinde

sınıflandırılır. Gıdaların ana bileşenleri olan organik materyaller ve su, kızılötesi ışınlarını genellikle 3 ve 6 µm dalga boylarında absorbe eder. Dolayısı ile %90 ve üzerinde su içeren gıdaların kurutulmasında orta ve uzak-kızılötesi dalga boyları kullanılır (Pawar ve Pratape 2015). Yakın-kızılötesi dalga boyları kalın katmanların kurutulmasında kullanılırken, ince tabaka kurutma işlemlerinde uzak-kızılötesi dalga boyları tercih edilmektedir (Riadh ve ark. 2015).

Gıda endüstrisinde kızılötesi ışınım ile kurutma, çözündürme, pastörizasyon ve sterilizasyon gibi işlemlerde kullanılabilir. Kızılötesi ışınım ile kurutma, kolay uygulanabilen, kısa sürelerde ve dolayısı ile az miktarda enerji kullanımı ile gerçekleşen bir kurutma yöntemidir. Konvansiyonel kurutma yöntemleri ile karşılaştırıldığında ısı verimliliğinin fazla olması, ısının kurutulacak materyale penetrasyonunun daha hızlı olması ve ısıtma işleminde sıcaklıkların kolay ayarlanabilmesi gibi avantajları nedeniyle, kızılötesi ışınım ile kurutma işlemi gıda sektöründe popülerlik kazanan bir işlemdir (Özkoç 2010). Ayrıca kızılötesi ışınım ile kurutma işleminde gıdada bulunan aktif bileşenlerin kurutma sırasında korunabilmesi, kurulum ve işletme maliyetinin yüksek olmaması gibi nedenlerle kızılötesi ışınım ile kurutma işlemi kurutulacak gıdanın özelliklerine göre sıklıkla tercih edilebilen bir kurutma tekniğidir (Nozad ve ark. 2016).

Kızılötesi ışınım ile kurutma, her gıda için uygun olmayabilir. Hububatlar gibi sert dokuya sahip gıdalar sadece kızılötesi ışınım ile kurutulduğunda, ürün yüzeyinde çatlama ve kurutma işleminin homojenliğinin sağlanamaması gibi sorunlar ile karşılaşmıştır (Fasina ve ark. 1997, Das ve ark. 2004). Buna karşın, birçok meyve-sebzenin bütün halde veya ince tabaka kurutulmasında kızılötesi ışınım başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Mongpraneet ve ark. 2002, Nowak ve Lewicki 2005, Sawai ve ark. 2004, Sharma ve ark. 2005, Toğrul 2006).

İnce tabaka kurutma, kurutulacak örneklerin dilimlenerek veya bir yüzeye yayılarak tabaka halinde kurutulması olarak tanımlanabilir.

Karmaşık kurutma modellerinin çözülebilmesi için ampirik, teorik ve yarı teorik modeller geliştirilmiştir (Özdemir ve Devres 1999). Az sayıda veriye ihtiyaç duyulması, pratik olmaları ve uygulanan yöntemin koşullarına bağımlı olmaları gibi nedenlerle yarı teorik ve ampirik modeller ince tabaka kurutma çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Fortes ve Okos 1981, Kutlu ve ark. 2015). Gıdaların ince tabaka kurutulmasında kullanılabilen bazı matematiksel modeller Çizelge 1’de verilmiştir.

Kuşburnu, vadilerde, yol kenarlarında ve bahçe sınırlarında doğal olarak yetişebilen, yüksek C vitamini içeriğine (2122-3158 mg/100 g) sahip, ayrıca fosfor ve potasyum mineralleri açısından zengin olan, tadı ve sağlık açısından olumlu özellikleri nedeniyle tüketiciler tarafından tercih edilen çok yıllık çalı formu bir bitkidir (Yamankaradeniz 1983, Özdemir ve ark. 1997, Erenturk ve ark. 2004). Ülkemizde özellikle Orta Anadolu ve Karadeniz Bölgesinde (Tokat, Amasya, Gümüşhane, Sinop ve Samsun) yetişen kuşburnu, taze tüketime uygun bir meyve türü olmadığından meyvenin işlenerek tüketilmesi tercih edilmektedir (Güneş 2008). Antioksidan özellikleri açısından gıda endüstrisinde kullanıma potansiyeli fazla olmasına rağmen ülkemizde kuşburnu genellikle pulp, marmelat veya nektar olarak tüketilmektedir. Son yıllarda tüketicilerin atıştırmalık olarak tercih ettikleri meyve barları, meyve çipsleri veya özellikle ülkemizde de sıklıkla tüketilen pestil gibi ürünlerde

kuşburnunun kullanılması, meyvenin sağlık açısından oldukça faydalı içeriği göz önünde bulundurulduğunda, alternatif yeni bir ürün ihtiyacını karşılayabilecektir. Meyve barları, enerji, mineral, antioksidan ve lif bakımından yüksek besleyici değere sahip, meyve pürelere ve bazı farklı bileşenlerin (şeker, pektin, renk ve aroma maddeleri gibi) şekil verildikten sonra kurutulması ile elde edilen, sağlıklı, doğal, atıştırmalık ürünlerdir (Orrego ve ark. 2014). Ülkemizde geleneksel olarak sıklıkla tüketilen pestil benzeri ürünler ise meyve püresinin çok ince bir tabaka halinde kurutulması ile elde edilen sakızimsı dokuya sahip ürünlerdir (Azeredo ve ark. 2006).

Çizelge 1. Gıdaların ince tabaka kurutulmasında kullanılan matematiksel modeller
Table 1. Mathematical models used for thin layer drying of food materials

Eşitlik	Modelin adı	Kaynak
$M_R = a \exp(-kt)$	Henderson ve Pabis	Wang ve ark. (2007)
$M_R = \exp(-kt)$	Lewis	Avhad ve ark. (2016)
$M_R = a \exp(-kt) + c$	Logaritmik	Goyal ve ark. (2007)
$M_R = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli ve ark.	Midilli ve ark. (2002)
$M_R = \exp(-kt^n)$	Page	Zhu ve Xinqi (2014)
$M_R = a + bt + ct^2$	Parabolik	Sharma ve Prasad (2004)
$M_R = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	İki terimli	Madamba ve ark. (1996)
$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	İki terimli eksponansiyel	Sharaf-Eldeen ve ark. (1980)
$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-bt)$	Verma	Verma ve ark. (1985)
$M_R = 1 + at + bt^2$	Wang ve Singh	Wang ve Singh (1978)

Bu çalışmanın amacı, meyve barları ve pestil gibi atıştırılabilir ürünlerde kullanım potansiyeli bulunan kuşburnu pulunun kızılötesi ışınlama ile kurutulması işleminde kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi ve elde edilen kuruma verilerinin farklı ince tabaka modellerine uygulanarak kuruma davranışını en iyi ifade eden modelin tespit edilmesidir.

2. Materyal ve Metot

Kurutma işlemlerinde ticari olarak üretilen kuşburnu pulpu (12-13 Briks) kullanılmıştır.

Oda sıcaklığındaki kuşburnu pulpu kızılötesi ışınlama ile kurutulmak üzere 3 mm kalınlıkta ince bir tabaka halinde kurutma kabına (çap: 100 mm, yükseklik: 70 mm) yayılmıştır. Kurutma işlemleri kızılötesi nem tayin cihazı (Shimadzu, MOC63u) kullanılarak 5 farklı sıcaklıkta (50, 60, 70, 80 ve 90°C) ağırlık değişimi %0.01'den küçük oluncaya kadar gerçekleştirilmiş ve bu şekilde ulaşılan sonuç nem içerikleri her bir sıcaklık için denge nem içeriği olarak kabul edilmiştir. Örneklerin başlangıç nem içeriği yaş temelinde %83.68±0.49 olarak belirlenmiştir. Tüm kurutma işlemleri iki tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Matematiksel modelleme

Her bir kurutma sıcaklığı için, 15 dakikalık periyotlarda örneğin nem içeriği (%), yaş temel kaydedilerek, boyutsuz nem oranı (MR) değerleri Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Burada, M değeri ürünün herhangi bir anda ölçülen nem içeriğini, M₀ ürünün başlangıç nem içeriğini ve M_e ürünün denge nem içeriğini ifade etmektedir.

Literatürde yer alan ve ince tabaka kurutma modellerinde sıklıkla kullanılan on farklı matematiksel model (Çizelge 1), elde edilen kurutma verilerine uygulanmıştır. Matematiksel ifadelerin tümü kurutma verileri ile birlikte 'MATLAB 9.1.0 Curve Fitting Toolbox'(MathWorks Inc., ABD) kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm modellerde bulunan katsayılar (a, b, c, k, k₀, k₁, n) farklı sıcaklıklardaki kurutma işlemleri için hesaplanmıştır. Kurutma işlemini en iyi tanımlayan modelden elde edilen veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Farklı matematiksel modellerin uygunluğunun belirlenmesinde regresyon katsayısı (R²) (Eşitlik 2), düzeltilmiş regresyon katsayısı (düz.-R²) (Eşitlik 3), ortalama hata kareleri karekökü (RMSE) (Eşitlik 4) ve ki-kare (χ²) (Eşitlik 5) değerleri kullanılmıştır.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{t,i}) \cdot (MR_i - MR_{d,i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{t,i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{d,i})^2 \right]}} \quad (2)$$

$$\text{düz. } -R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N - 1}{N - m - 1} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{d,i} - MR_{t,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{d,i} - MR_{t,i})^2}{N - n} \quad (5)$$

Eşitliklerde kullanılan MR_t değerleri modelden tahminlenen boyutsuz nem oranını, MR_d değerleri kurutma işlemleri sonucunda elde edilen deneysel boyutsuz nem oranını, N veri sayısını, m regresyon parametrelerinin sayısını ve n ise modelde kullanılan sabitlerin sayısını ifade etmektedir.

En yüksek R^2 ve düz.- R^2 değerleri ile en düşük $RMSE$ ve χ^2 değerlerine sahip matematiksel model kuruma işlemini açıklayan en uygun model olarak tanımlanmıştır.

Efektif nem difüzyon katsayısının (D_{eff} , m^2/s) hesaplanması

Kurutma işleminde, gıdadan nemin difüzyonu ‘Fick Difüzyon Yasası’ kullanılarak ürün dokusunun bozulmadığı ve nemin yalnızca difüzyon ile ortamdan uzaklaştığı varsayımlarıyla sonsuz plaka geometrisi için Eşitlik (6) ile ifade edilmektedir (Crank 1979).

$$MR = \frac{M - M_g}{M_0 - M_g} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\pi^2 (2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2} \right] \quad (6)$$

Burada D_{eff} efektif difüzyon katsayısını (m^2/s), L ürünün yarı dilim kalınlığını ifade etmektedir. Çalışmada uygulanan kızılötesi ışıma ile kurutma işlemlerinde difüzyon tek yönlü olarak gerçekleşmiştir.

Uzun kurutma süreleri için efektif difüzyon katsayısının belirlenmesinde Eşitlik (6)’nın ilk terimi kullanılmış ve yeniden düzenlenerek boyutsuz nem oranı Eşitlik (7) ile ifade edilmiştir:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2} \quad (7)$$

Elde edilen doğal logaritmik boyutsuz nem oranı değerleri kurutma süresine karşılık grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğiminden D_{eff} değerleri her sıcaklık için hesaplanmıştır.

Aktivasyon enerjisinin (E_A , kJ/mol) hesaplanması

Efektif difüzyon katsayısının sıcaklığa bağımlılığı Arrhenius eşitliği (Eşitlik 8) ile ifade edilir (Karel ve Saguy 1991).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(-\frac{E_A}{RT} \right) \quad (8)$$

Burada D_0 sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısına eşdeğer sabit (m^2/s), R evrensel gaz sabiti ($kJ/mol K$), E_A aktivasyon enerjisi (kJ/mol) ve T kurutma sıcaklığıdır (K). Aktivasyon enerjisi, $\ln(D_{eff})$ değerlerine karşılık $1/T$ değerleri ile oluşturulan grafiğin eğiminden hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Kurutma verilerinin farklı ince tabaka kurutma modellerine uygulanması sonucunda elde edilen R^2 , düz.- R^2 , $RMSE$ ve χ^2 değerleri her bir sıcaklık için Çizelge 2’de gösterilmiştir. R^2 ve düz.- R^2 katsayılarının ‘1’ e en yakın, uygulanan modelin kısa vadedeki performansını belirlemede kullanılan bir parametre olan $RMSE$ değerinin ve model etkinliğinin ifadesinde kullanılan χ^2 değerinin ‘0’ a yakın olması istenir (Alibaş 2012). En yüksek R^2 ve düz.- R^2 ile en düşük $RMSE$ ve χ^2 değerlerine sahip model, kurutma işlemini en iyi tanımlayan model olarak seçilmiştir.

Tüm sıcaklık değerlerinde, Midilli ve ark. (2002)’nin geliştirmiş olduğu matematiksel model en uygun model olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Çakmak ve ark. (2013) tarafından yapılan defne yaprağının konvansiyonel ve mikrodalga fırında ince tabaka kurutulması işleminde, kurutma işlemini en iyi tanımlayan modelin Midilli ve ark. (2002)’nin geliştirdiği model olduğu belirlenmiştir. Literatürde nane yaprağının mikrodalga ile kurutulması (Özbek ve Dadalı 2007), havuç dilimlerinin kızılötesi ışıma ile kurutulması (Toğrul 2006) ve safranın kızılötesi ışıma ile kurutulması (Akhondi ve ark. 2011) gibi

ince tabaka kurutma işlemlerinde Midilli ve ark. (2002)'nin geliştirdiği modelin daha yüksek düz.- R^2 değerine ve daha düşük $RMSE$ ve χ^2 değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Kızılötesi ışınım ile kurutulan kuşburnu pulpunun farklı sıcaklıklarda (50, 60, 70, 80,

90°C) elde edilen deneysel ve işlemi en iyi ifade eden modelden tahminlenen boyutsuz nem oranı değerlerinin zamana göre değişimi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Kurutma işlemleri sonucunda elde edilen istatistiksel veriler ve model parametreleri

Table 2. Statistical results and model parameters of drying

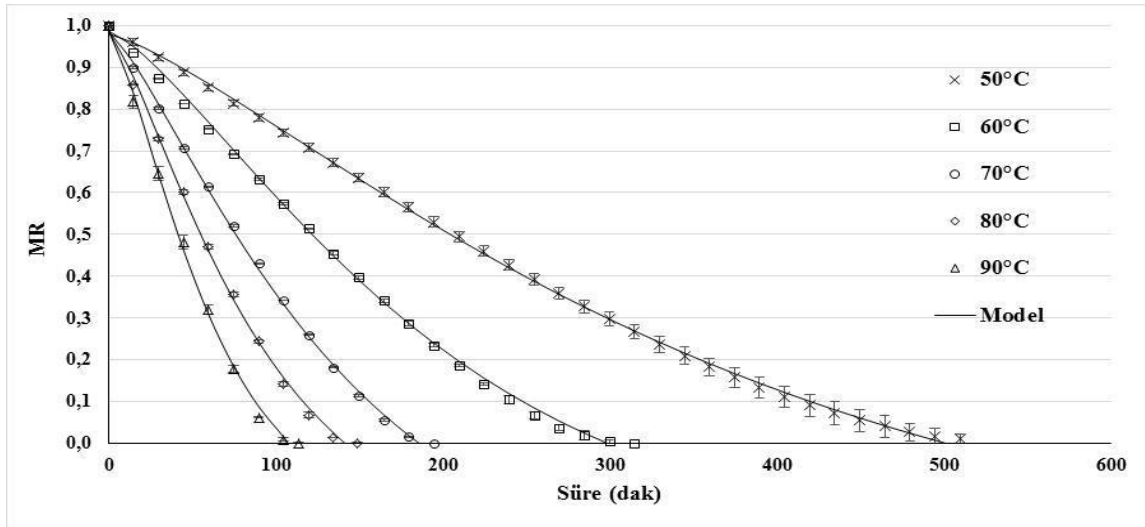
Model adı	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri	R^2	Düz.- R^2	RMSE	Ki-kare (χ^2)
Henderson ve Pabis	50	$a= 1.109$ $k= 0.004482$	0.9582	0.9570	0.0652	0.00426
	60	$a= 1.108$ $k= 0.007685$	0.9534	0.9510	0.0732	0.00535
	70	$a= 1.092$ $k= 0.01119$	0.9530	0.9491	0.0766	0.00586
	80	$a= 1.081$ $k= 0.01631$	0.9567	0.9519	0.0771	0.00591
	90	$a= 1.075$ $k= 0.02174$	0.9549	0.9484	0.0836	0.00672
Lewis	50	$k= 0.004025$	0.9429	0.9429	0.0752	0.00565
	60	$k= 0.006942$	0.9390	0.9390	0.0817	0.00667
	70	$k= 0.01089$	0.9414	0.9414	0.0822	0.00675
	80	$k= 0.01514$	0.9478	0.9478	0.0803	0.00641
	90	$k= 0.02037$	0.9474	0.9474	0.0844	0.00686
Logaritmik	50	$a= 1.899$ $c= -0.8788$ $k= 0.001571$	0.9982	0.9980	0.0139	0.00019
	60	$a= 1.796$ $c= -0.7719$ $k= 0.002884$	0.9966	0.9963	0.0202	0.00041
	70	$a= 1.903$ $c= -0.8852$ $k= 0.004151$	0.9974	0.9970	0.0186	0.00035
	80	$a= 1.652$ $c= -0.6332$ $k= 0.006882$	0.9965	0.9956	0.0234	0.00043
	90	$a= 1.594$ $c= -0.5747$ $k= 0.009541$	0.9953	0.9937	0.0292	0.00104
Midilli	50	$a= 0.9805$ $b= -0.0003216$ $k= 0.0004711$ $n= 1.327$	0.9994	0.9993	0.0082	0.00007
	60	$a= 0.9786$ $b= -0.0004501$ $k= 0.0007471$ $n= 1.384$	0.9986	0.9984	0.0131	0.00021
	70	$a= 0.9873$ $b= -0.0009008$ $k= 0.001886$ $n= 1.31$	0.9988	0.9984	0.0134	0.00019
	80	$a= 0.9885$ $b= -0.0009066$ $k= 0.002896$ $n= 1.323$	0.9984	0.9977	0.0170	0.00031
	90	$a= 0.9904$ $b= -0.0009908$ $k= 0.003713$ $n= 1.364$	0.9980	0.9967	0.0211	0.00070

Çizelge 2. Kurutma işlemleri sonucunda elde edilen istatistiksel veriler ve model parametreleri (Devam)
Table 2. Statistical results and model parameters of drying (continued)

Model adı	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri	R ²	Düz.-R ²	RMSE	Ki-kare(χ^2)
Page	50	k= 0.0002218 n= 1.52	0.9920	0.9918	0.0285	0.00081
	60	k= 0.0003958 n= 1.566	0.9910	0.9906	0.0321	0.00103
	70	k= 0.0008288 n= 1.559	0.9906	0.9898	0.0343	0.00118
	80	k= 0.00148 n= 1.539	0.9918	0.9908	0.0336	0.00112
	90	k= 0.00197 n= 1.576	0.9922	0.9911	0.0347	0.00114
Parabolik	50	a= 1.018 b= -0.002887 c= 1.677*10 ⁻⁶	0.9987	0.9987	0.0115	0.00013
	60	a= 1.023 b= -0.004992 c= 5.174*10 ⁻⁶	0.9977	0.9974	0.0168	0.00028
	70	a= 1.017 b= -0.007661 c= 1.177*10 ⁻⁵	0.9982	0.9979	0.0157	0.00025
	80	a= 1.017 b= -0.01082 c= 2.556*10 ⁻⁵	0.9978	0.9973	0.0183	0.00036
	90	a= 1.019 b= -0.01448 c= 4.669*10 ⁻⁵	0.9971	0.9961	0.0230	0.00079
İki Terimli	50	a= 1.304 b= -0.2009 k ₀ = 0.004474 k _j = 0.00456	0.9582	0.9542	0.0673	0.00453
	60	a= -0.224 b= 1.325 k ₀ = 0.007735 k _j = 0.007656	0.9533	0.9455	0.0772	0.00596
	70	a= 0.2193 b= 0.8676 k ₀ = 0.0119 k _j = 0.01182	0.9530	0.9388	0.0839	0.00704
	80	a= 0.478 b= 0.5986 k ₀ = 0.01629 k _j = 0.01619	0.9567	0.9381	0.0874	0.00760
	90	a= -0.1007 b= 1.17 k ₀ = 0.02204 k _j = 0.02166	0.9548	0.9277	0.0989	0.00941
İki Terimli Ekspansiyel	50	a= 1.968 k= 0.006277	0.9856	0.9852	0.0383	0.00146
	60	a= 1.99 k= 0.01083	0.9830	0.9822	0.0441	0.00195
	70	a= 1.986 k= 0.01698	0.9830	0.9816	0.0461	0.00269
	80	a= 1.98 k= 0.02331	0.9851	0.9834	0.0452	0.00203
	90	a= 2.009 k= 0.03147	0.9850	0.9828	0.0482	0.00220

Çizelge 2. Kurutma işlemleri sonucunda elde edilen istatistiksel veriler ve model parametreleri (Devam)
Table 2. Statistical results and model parameters of drying (continued)

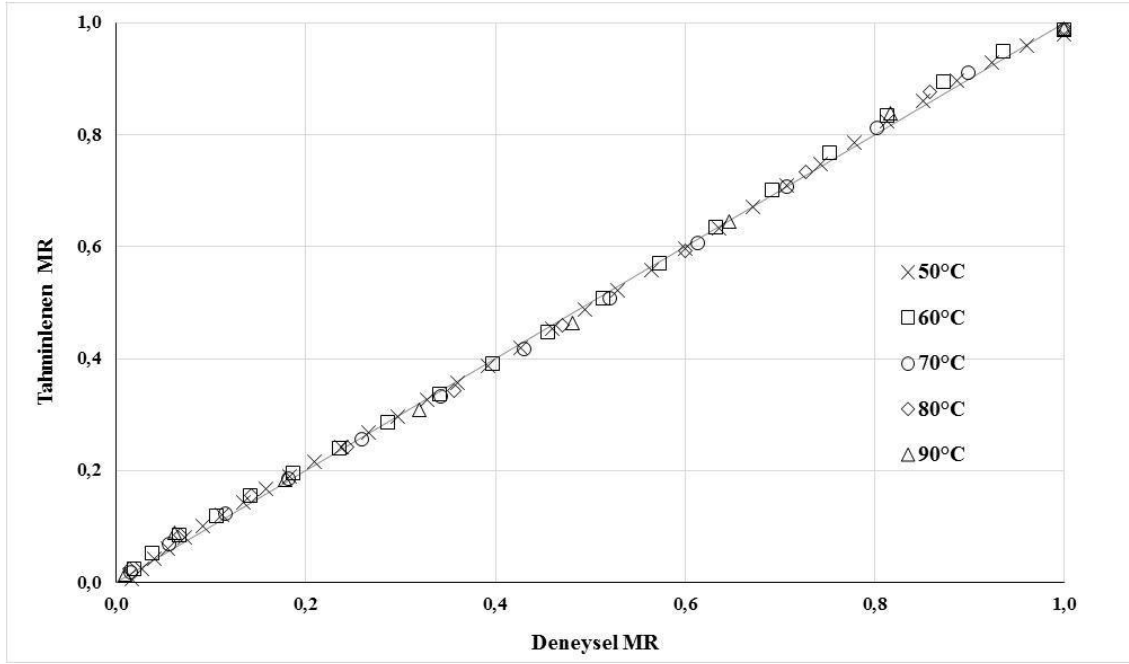
Model adı	Sıcaklık (°C)	Model sabitleri	R ²	Düz.-R ²	RMSE	Ki-kare(χ ²)
Verma	50	a= -3.895 b= 0.0009882 k= 0.0005218	0.9978	0.9977	0.0152	0.00023
	60	a= -4.22 b= 0.001689 k= 0.0009594	0.9961	0.9957	0.0216	0.00047
	70	a= -2.807 b= 0.002818 k= 0.001162	0.9972	0.9967	0.0195	0.00038
	80	a= -3.407 b= 0.0044 k= 0.002557	0.9963	0.9954	0.0239	0.00062
	90	a= -3.199 b= 0.006077 k= 0.003527	0.9951	0.9935	0.0297	0.00144
Wang ve Singh	50	a= -0.002746 b= 1.449*10 ⁻⁶	0.9983	0.9983	0.0131	0.00017
	60	a= -0.004708 b= 4.442*10 ⁻⁶	0.9970	0.9969	0.0185	0.00034
	70	a= -0.007335 b= 1.043*10 ⁻⁵	0.9978	0.9976	0.0165	0.00027
	80	a= -0.01038 b= 2.327*10 ⁻⁵	0.9974	0.9971	0.0188	0.00038
	90	a= -0.01387 b= 4.252*10 ⁻⁵	0.9966	0.9961	0.0230	0.00081



Şekil 1. Farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri
Figure 1. The drying curves at different temperatures

Kızılötesi ışınım ile kurutma işleminde kullanılan sıcaklık artırıldıkça kurutma süresinin kısaldığı görülmüştür. 50°C'ta kurutma işlemi 510 dakika sürerken, 90°C'ta bu süre yaklaşık 4.5 kat azalarak 114 dakikaya kadar gerilemiştir. Midilli ve ark. (2002)'nin geliştirmiş olduğu

matematiksel modelden tahminlenen verilerin deneysel kurutma verileri ile karşılaştırılması ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi deneysel veriler ve tahminlenen değerler arasında oldukça yüksek bir korelasyon bulunmaktadır.



Şekil 2. Deneysel ve tahminlenen nem oranlarının karşılaştırılması

Figure 2. Comparison of the experimental and predicted moisture ratios

Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen kızılötesi ışınlama ile kurutma işlemi sonucunda efektif difüzyon katsayısının hesaplanabilmesi için, doğal logaritmik boyutsuz nem oranı değerlerinin kurutma süresine karşılık çizilmesiyle oluşturulan grafikte her sıcaklık için elde edilen doğrunun eğiminden Eşitlik (7) kullanılarak D_{eff} değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3'te verilmiştir. Kuşburnu pulpunun kızılötesi ışınlama ile kurutulmasında farklı sıcaklıklarda elde edilen D_{eff} değerlerinin 2.19×10^{-10} – 1.46×10^{-9} m²/s aralığında değiştiği belirlenmiştir.

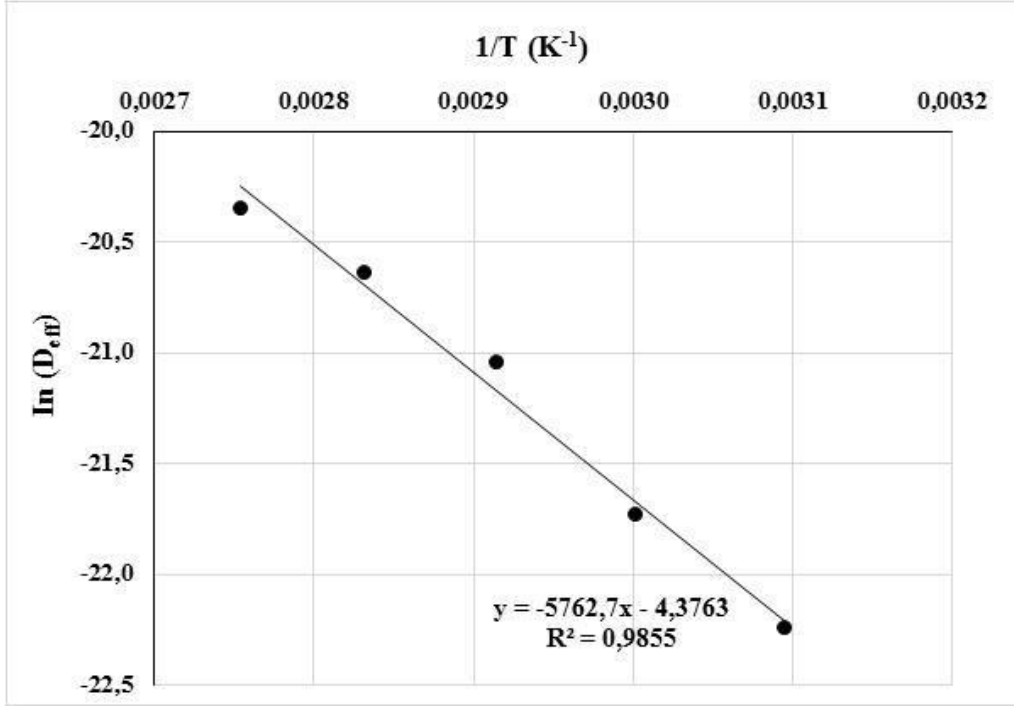
Hesaplanan D_{eff} değerlerinin literatürde yer alan bazı çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür (Sun ve ark. 2007, Wang ve ark. 2007, Celma ve ark. 2008). Ayrıca literatürde kızılötesi ışınlama ile gerçekleştirilen ince tabaka kurutma işlemlerinde D_{eff} değerlerinin 10^{-10} - 10^{-9} m²/s arasında değiştiği bildirilmiştir (Erbay ve İçer 2010).

Çizelge 3. Farklı sıcaklıklarda efektif difüzyon katsayısı değerleri

Table 3. Effective diffusion coefficients at different temperatures

Sıcaklık (°C)	D_{eff} (m ² /s)
50	2.19×10^{-10}
60	3.65×10^{-10}
70	7.30×10^{-10}
80	1.09×10^{-9}
90	1.46×10^{-9}

Katılarda gerçekleşen nem difüzyonu, sıcaklık ve nem içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Gerçekleştirilen kurutma işleminde aktivasyon enerjisinin yüksek olması, kurutma işleminin sıcaklık değişimlerine daha hassas olduğunun bir ifadesidir (Kutlu ve ark. 2015). Efektif difüzyon katsayısının sıcaklığa bağımlılığı Arrhenius eşitliği ile ifade edilmiş ve $\ln(D_{eff})$ değerlerine karşılık $1/T$ değerleri ile oluşturulan grafik Şekil 3'te verilmiştir ($R^2 = 0.9855$). Kızılötesi ışınlama ile kurutulan kuşburnu pulpunun aktivasyon enerjisi 47.91 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Efektif difüzyon katsayısının sıcaklığa bağımlılığı
Figure 3. Temperature dependence of effective diffusion coefficient

Gıdalarda aktivasyon enerjisi değerleri uygulanan kurutma işlemine ve gıdanın yapısına göre farklılık göstermekte ve genel olarak 12.32-83.93 kJ/mol aralığında değişmektedir (Erbay ve İçier 2010). Ibanoglu ve Maskan (2002) tarhana hamurunu kızılötesi ışınlam ile kurutmuş ve aktivasyon enerjisi değerlerinin 41.6-49.5 kJ/mol arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Wang ve ark. (2007) ise, elma posasına konvektif kurutucuda ince tabaka kurutma uyguladıkları çalışmada aktivasyon enerjisini 24.512 kJ/mol olarak belirlemişlerdir. Benzer şekilde, Celma ve ark. (2008) zeytin posasını kızılötesi-konvektif bir kurutucuda ince tabaka halinde kuruttukları çalışmada, aktivasyon enerjisini 21.30 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Maskan ve ark. (2002) farklı kalınlıklardaki (0.71-2.86 mm) üzüm pestilini konvektif kurutucu ile kuruttukları çalışmada, aktivasyon enerjisi değerlerinin 10.3-21.7 kJ/mol aralığında değiştiğini belirlemişlerdir. Aktivasyon enerjisi, kurutulan ürünün yapısına, ürünün kalınlığına ve kurutma çeşidine göre değişebilmektedir. Çalışmada elde edilen aktivasyon enerjisi değerinin literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

4. Sonuç

Kuşburnu pulpu kızılötesi ışınlam uygulanarak ince tabaka halinde kurutulmuş ve kurutma işlemi farklı matematiksel modeller ile açıklanmıştır. Tüm kurutma koşullarında işlemi en iyi ifade eden modelin Midilli ve ark. (2002)'nin geliştirdiği model olduğu tespit edilmiştir. Kuşburnu pulpunun kurutulması ile elde edilen difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerleri, literatürde farklı ürünlerle yapılan çalışmalar ile uyum içerisinde. Meyve barları, meyve cipsleri veya pestil gibi sağlıklı ve doğal atıştırmalık ürünlerin üretiminde kullanım potansiyeli oldukça yüksek olan kuşburnu pulpunun kızılötesi ışınlam ile ince tabaka kurutulması ve kurutma karakteristiklerinin belirlenmesinin, kuşburnu ile alternatif yeni bir ürün geliştirilmesi aşamasında proses parametrelerinin belirlenmesine ışık tutacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Akhondi E, Kazemi A and Maghsoodi V (2011). Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus L.*) stigmas in an infrared dryer. *Scientia Iranica*, 18(6): 1397-1401.
- Alibaş İ (2012). Asma yaprağının (*Vitis vinifera L.*) mikrodalga enerjisiyle kurutulması ve bazı kalite parametrelerinin belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 18(1): 43-53.
- Avhad MR and Marchetti JM (2016). Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. *Industrial Crops and Products*, 91: 76-87.
- Azeredo H, Brito ES, Moreira GE, Farias VL and Bruno LM (2006). Effect of drying and storage time on the physico-chemical properties of mango leathers. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(6): 635-638.
- Celma AR, Rojas S and Lopez-Rodriguez F (2008). Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(9): 1810-1818.
- Crank J (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press, London.
- Çakmak H, Kumcuoglu S and Tavman S (2013). Thin layer drying of bay leaves (*Laurus nobilis L.*) in conventional and microwave oven. *Akademik Gıda*, 11(1): 20-26.
- Das I, Das SK and Bal S (2004). Drying performance of a batch type vibration aided infrared dryer. *Journal of Food Engineering*, 64(1): 129-133.
- Erbay Z and İçer F (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5): 441-464.
- Erenturk S, Gulaboglu MS and Gultekin S (2004). The thin-layer drying characteristics of rosehip. *Biosystems Engineering*, 89(2): 159-166.
- Fasina OO, Tyler B and Pickard M (1997). Infrared heating of legume seeds effect on physical and mechanical properties. *ASAE Meeting Presentation*, Mirneapolis Minnesota.
- Fortes M and Okos RM (1981). Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels. *Transactions of the ASAE*, 24(3): 761-769.
- Goyal RK, Kingsly ARP, Manikantan MR and Ilyas SM (2007). Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79(1): 176-180.
- Güneş M (2008). Pomological and phonological characteristics of promising rose hip (*Rosa spp.*) genotypes. Gaziosmanpaşa University, Agricultural Faculty, Department of Horticulture, Tokat, Turkey, 12.
- Ibanoğlu Ş and Maskan M (2002). Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour-yoghurt mixture. *Journal of Food Engineering*, 54(2): 119-123.
- Karel M and Saguy I (1991). Effects of water on diffusion in food systems. in: *Water Relationships in Foods*. Editor Harry Levine and Louise Slade. Publ. by Springer Science+Business Media. 157-173.
- Kutlu N, İşçi A ve Demirkol ÖŞ (2015). Gıdalarda ince tabaka kurutma modelleri. *Gıda*, 40(1): 39-46.
- Madamba PS, Driscoll RH and Buckle KA (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1): 75-97.
- Maskan A, Kaya S and Maskan M (2002). Hot air and sun drying of grape leather (pestil). *Journal of Food Engineering*, 54(1): 81-88.
- Midilli A, Küçük H and Yapar Z (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7): 1503-1513.
- Miranda M, Maureira H, Rodriguez, K and Vega-Galvez A (2009). Influence of temperature on the drying kinetics-physicochemical properties and antioxidant capacity of Aloe vera gel. *Journal of Food Engineering*, 91: 297-304.
- Mongpranet S, Abe T and Tsurusaki T (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering*, 55(2): 147-156.
- Nowak D and Lewicki PP (2005). Quality of infrared dried apple slices. *Drying Technology*, 23(4): 831-846.
- Nozad M, Khojastehpour M, Tabasizadeh M, Azizi M, Ashtiani SHM and Salarikia A (2016). Characterization of hot-air drying and infrared drying of spearmint (*Mentha spicata L.*) leaves. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1(8): 466-473.
- Orrego CE, Salgado N and Botero, CA (2014). Developments and trends in fruit bar production and characterization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(1): 84-97.
- Özbek B and Dadalı G (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4): 541-549.
- Özdemir F, Aksu Mİ ve Sebahattin NAS (1997). Isıl işlemsiz elde edilen kuşburnu pulplarından farklı pulp/şeker oranlarında üretilen marmelatların kalite özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2): 353-358.
- Özdemir M and Devres YO (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4): 225-233.
- Özkoç S (2010). Kızılötesi ve kızılötesi-kombinasyon ısıtma teknolojilerinin gıda işleme uygulamalarında kullanımı. *Gıda*, 35(3): 211-218.
- Pawar SB and Pratapa VM (2015). Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1): 1-15.
- Riadh MH, Ahmad SAB, Marhaban MH and Soh AC (2015). Infrared heating in food drying: An overview. *Drying Technology*, 33(3): 322-335.
- Sawai J, Nakai T, Hashimoto A and Shimizu M (2004). A comparison of the hydrolysis of sweet potato starch with β -amylase and infrared radiation allows prediction of reducing sugar production. *International Journal of Food Science and Technology*, 39(9): 967-974.

- Sharaf-Eldeen YI, Blaisdell JL and Hamdy MY (1980). A model for ear corn drying. Transactions of the ASAE 23(5): 1261-1265.
- Sharma GP and Prasad S (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. Journal of Food Engineering, 65(4): 609-617.
- Sharma, GP, Verma RC and Pathare PB (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 67(3): 361-366.
- Sun J, Hu X, Zhao G, Wu J, Wang Z, Chen F and Liao X (2007). Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. Food Science and Technology international, 13(2): 91-97.
- Toğrul H (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. Journal of Food Engineering, 77(3): 610-619.
- Verma LR, Bucklin RA, Endan JB and Wratten FT (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 28(1): 296-301.
- Wang CY and Singh RP (1978). A single layer drying equation for rough rice. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 78, 3001.
- Wang Z, Sun J, Liao X, Chen F, Zhao G, Wu J and Hu X (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. Food Research International, 40(1): 39-46.
- Yamankaradeniz R (1983). Kuşburnu (*Rosa sp.*) değerlendirme olanakları. Gıda, 8(4): 157-162.
- Zhu A and Xinqi S (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. International Journal of Heat and Mass Transfer, 72: 345-351.