



Kızılötesi Kurutucu ile Hurmanın Kurutulması ve Matematiksel Modellenmesi

Onur TAŞKIN^{1*} Nazmi İZLİ¹

¹Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059, Nilüfer/Bursa
*e-posta: onurtaskins@gmail.com

Alındığı tarih (Received): 29.05.2017

Kabul tarihi (Accepted): 21.07.2017

Online Baskı tarihi (Printed Online): 19.12.2017

Yazılı baskı tarihi (Printed): 29.12.2017

Öz: Bu çalışmada, farklı kızılötesi kurutma sıcaklıkları ile kurutulan hurma örneklerinin kuruma süresi, kuruma hızı ve mevcut bazı kurutma modellerinin uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışmada laboratuvar tipi kızılötesi kurutucu kullanılmış olup hurma örnekleri 5 mm kalınlığında dilim olarak kurutulmuştur. Deneysel sonuçlar, 60, 70 ve 80 °C kızılötesi kurutma sıcaklık uygulamalarının sırasıyla 310, 170 ve 110 dakika sürdüğünü göstermiştir. Hurma örneklerinin kurutma kinetiklerinin tanımlanması için, Henderson ve Pabis, Newton, Page, Logaritmik, İki Terimli, İki Terimli Eksponansiyel, Wang ve Singh, Difüzyon Yaklaşımı, Midilli ve ark. ince tabaka matematiksel kurutma modelleri kullanılarak en uygun model araştırılmıştır. İstatistiksel parametreler esas alınarak bu modellerin performansları değerlendirildiğinde, en düşük ki-kare (χ^2) ve hataların karelerinin karekök ortalaması (RMSE) değerlerinin yanı sıra en yüksek belirtme katsayısı (R^2) değerlerine sahip Midilli ve ark. modeli hurma örneklerinin tüm kurutma davranışlarının tanımlanması için en iyi model olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Kızılötesi kurutma, hurma, kurutma kinetikleri, modelleme

Date Drying by Infrared Dryer and Mathematical Modeling

Abstract: In this study, date samples drying with different infrared drying temperature on drying time, drying rate and the applicability of some different drying models were investigated. Fresh date samples were dried into 5 mm thick slices via a laboratory scale infrared dryer. Experimental results showed that average drying times of samples, which they were dried by infrared drying technique at 60, 70 and 80 °C of temperatures were 310, 170 and 110 minutes, respectively. In order to determine drying kinetics with time and moisture content of the date samples, Henderson and Pabis, Newton, Page, Logarithmic, Two term, Two term Exponential, Wang and Singh, Diffusion Approach and Midilli et al. thin layer mathematical drying models were used to investigate the most suitable model. Based on evaluation by statistical tests, the Midilli et al. model having lowest reduced chi-squared (χ^2) and root mean square error (RMSE) values as well as the highest coefficient of determination (R^2) was found to be the best model for describing the drying behavior of date samples.

Keywords: Infrared drying, date, drying kinetics, modeling

1. Giriş

Hurma (*Phoenix dactylifera* L.), palmyegiller (*Arecaceae*) familyasından tek çenekli bir meyvedir (Falade ve Abbo, 2007). Bu meyve şeker ve mineral madde bakımından oldukça zengindir (Amellal ve Benamara, 2008). Taze olarak tüketiminin yanı sıra, kurutulmuş haldeki tüketimi de oldukça fazladır. Tarımsal istatistik verilerine göre, Dünya'daki taze hurma üretimi, başta Ortadoğu ve Kuzey Afrika olmak

üzere, 2014 yılında 7.6 milyon ton'dur (FAO, 2017).

Meyve ve sebzelerin kurutularak, soğutularak, dondurularak, kimyasal maddelerle işlemlerden geçirilerek, gaz bileşimi kontrol edilen ortamlarda depolanarak, ultraviyole ve radyoaktif ışıklardan yararlanılarak uzun süre saklanması mümkün olmakla birlikte, bu uygulamalar içerisinde kendine geniş uygulama alanı bulan en eski yöntem kurutmadır (Demiray ve Tülek, 2012).

Yukarıda sözü edilen her bir yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Kızılötesi kurutucuların ürüne direk nüfuz edişi, hızlı süreç kontrolü, ilk kurulum ve işletme maliyetinin düşük olması ve çevre dostu olması gibi özelliklerindendolayı diğer kurutuculardan ziyadekurutma alanında tercih edilebilir durumdadır. Kızılötesi ışınım kısa, orta ve uzak olmak üzere 3 farklı dalga boyuna ayrılmıştır. Gıda ürünlerinin kurutulmasında 0.5-100 µm dalga boyu uygulanmaktadır (Aktaş ve ark. 2013).

Elma (Nowak ve Lewicki, 2004), soğan (Sharma ve ark. 2005), kereviz (Jezek ve ark. 2008), üzüm (Celma ve ark. 2009), havuç (Kocabıyık ve Tezer, 2009), kırmızıbiber (Nasıroğlu ve Kocabıyık, 2009), ayva (Aktaş ve ark. 2013), havuç posası (Doymaz, 2013), nane yaprakları (Ertekin ve Heybeli, 2014), çilek (Adak ve ark. 2017) gibi bazı tarımsal ürünler kızılötesi kurutma yöntemi ile başarıyla kurutulmuştur. Bu çalışmada, farklı kızılötesi kurutma sıcaklık uygulamalarının hurma dilimlerinin kuruma hızı ve zamanı üzerindeki etkisi araştırılmış ve elde edilen deneysel veriler dokuz matematiksel model ile karşılaştırılarak en uygun modelin bulunması amaçlanmıştır.

Çizelge 1. Hurma örneklerinin matematiksel modellenmesi için kullanılan ince tabaka kurutma modelleri

Table 1. Thin layer drying models used for mathematical modeling of date samples

No	Model Adı	Model	Kaynak
1	Henderson ve Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Westerman ve ark. (1973)
2	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu (1997)
3	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Agrawal ve Singh (1977)
4	Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioğlu ve ark. (1999)
5	İki Terimli	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Madamba ve ark. (1996)
6	İki Terimli Eksponansiyel	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Sharaf-Eldeen ve ark. (1980)
7	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang ve Singh (1978)
8	Diffusion Yaklaşımı	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Kassem (1998)
9	Midilli ve ark.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli ve ark. (2002)

2. Materyal ve Yöntem

Kurutma ekipmanları ve kurutma işlemi

Bu çalışmada kullanılan taze hurma meyvesi yerel bir marketten satın alınmış ve deneyler sürecinde $+4 \pm 0.5$ °C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Meyvenin mevcut nem içeriğini belirlemek için, taze hurma örnekleri bir kurutma fırınında (ED115 Binder, Tuttlingen, Germany) 105 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle bekletilmiştir. Söz konusu bu meyvenin mevcut nem içeriği 1.87 (g su. g kuru madde⁻¹) olarak hesaplanmıştır. Daha sonra taze hurma örnekleri bir dilimleyici (Nicer Dicer, China) yardımıyla 5 ± 0.05 mm kalınlığında dilimlenmiş, kurutma deneyleri ise laboratuvar tipi bir kızılötesi kurutucu (Moc63u, Shimadzu, Japan) kullanılarak 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarında 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir.

Matematiksel modelleme

Kızılötesi kurutma yöntemiyle taze hurma örneklerinin kurutulması süresince elde edilen nem oranı değerlerinin zamanla değişiminin modellenmesi için Çizelge 1'de verilen 9 farklı ince tabaka kurutma modelleri kullanılmıştır.

Modellemede boyutsuz nem içeriği olan nem oranı (MR) belirlenirken, M_e değeri M_t ya da M_o değerleriyle karşılaştırıldığında çok küçük

olduğu için, Eşitlik 1 sadeleştirilerek Eşitlik 2 elde edilmiş ve hesaplamalar bu eşitliğe göre yapılmıştır (Xiao ve ark. 2010).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

MR : Nem oranı (birimsiz), M_t : Herhangi bir t anındaki nem içeriği (g su. g kuru madde⁻¹), M_e : Denge anındaki nem içeriği (g su. g kuru madde⁻¹) ve M_o : Başlangıçtaki nem içeriği (g su. g kuru madde⁻¹) olarak tanımlanmıştır.

İstatistiksel yöntem

Modelleme çalışmalarında MATLAB 2008a (MathWorks Inc., Natick, MA) paket programı kullanılmıştır. En iyi modelin belirlenmesinde ki-

kare (χ^2 , Eşitlik 3), hataların karelerinin karekök ortalaması ($RMSE$, Eşitlik 4) ve belirtme katsayısı (R^2) istatistiksel kriterleri uygulanmıştır (Goyal ve ark. 2006).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{I=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (4)$$

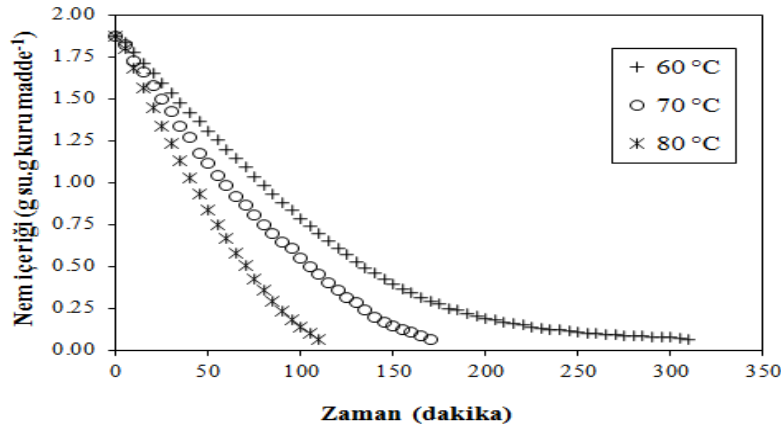
$MR_{exp,i}$, i . Deneysel nem oranı, $MR_{pre,i}$, i .

Tahmin edilen nem oranı, N gözlemlenen deneysel veri adedi, n modelde yer alan bağımsız değişken sayısıdır.

3. Bulgular ve Tartışma

Kurutulan hurma örneklerinin nem oranlarının zamanla değişimi

Kızılötesi kurutma yöntemiyle üç farklı kurutma sıcaklığında kurutulan taze hurma örneklerinin nem oranlarının zamanla değişimi Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Kızılötesi kurutma şartları altında hurma örneklerinin kurutma eğrisi

Figure 1. Drying curve of date samples under infrared drying conditions

Elde edilen veriler incelendiğinde, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarda kurutulan örneklerin ortalama kuruma süreleri sırasıyla 310, 170 ve 110 dakika olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara binaen, kızılötesi kurutma tekniğinde uygulanan kurutma sıcaklıkları azaldıkça kurutulan örneklerin kuruma

sürelerinin arttığı tespit edilmiştir. Botelho et al. (2011) ve Heybeli ve ark. (2013), sırasıyla, havuç ve kereviz meyvelerinin kızılötesi yöntemiyle kurutma işlemlerinde benzer sonuçları saptamışlardır.

Kuruma eğrilerinin modellenmesi

Taze hurma örneklerinin kızılötesi kurutma yöntemiyle kurutulması süresince elde edilen nem oranı değerlerinin kuruma zamanları ile değişimi Çizelge 1’de verilen 9 adet ince tabaka kurutma

modeli ile incelenmiştir. Tüm kurutma şartları için uygulanan modellerin kurutma katsayıları, R^2 , $RMSE$ ve χ^2 istatistiksel parametreleri hesaplanarak analiz edilmiş ve Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kızılötesi kurutma şartlarında kurutulan hurma örnekleri için değişik modellerden elde edilen tahmini katsayı ve istatistiksel analiz sonuçları

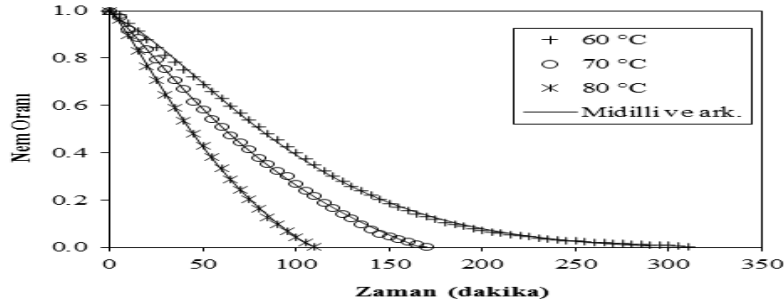
Table 2. Estimated values of coefficients and statistical analyses obtained from various thin layer drying models for drying of date samples at infrared drying conditions

No	60 °C			70 °C			80 °C					
	Model katsayıları	R^2	RMSE	$\chi^2(10^{-4})$	Model katsayıları	R^2	RMSE	$\chi^2(10^{-4})$	Model katsayıları	R^2	RMSE	$\chi^2(10^{-4})$
1	a=1.16 k=0.02753	0.9634	0.0667	44.1368	a=1.125 k=0.03321	0.9724	0.0567	32.3309	a=1.096 k=0.03638	0.9724	0.0559	30.8148
2	k=0.02401	0.9404	0.0852	72.9711	k=0.02975	0.9575	0.0704	50.4617	k=0.03333	0.9632	0.0645	41.6470
3	k=0.00197 n=1.652 a=1.322	0.9986	0.0130	1.7176	k=0.004744 n=1.504 a=1.273	0.9989	0.0114	1.5244	k=0.006856 n=1.448 a=1.319	0.9983	0.0136	1.6537
4	k=0.01837 c=-0.2146 a=-0.2754	0.9833	0.0451	19.8206	k=0.02262 c=-0.1962 a=1.243	0.9900	0.0341	12.1484	k=0.02219 c=-0.2747 a=24.01	0.9951	0.0235	5.5701
5	$k_o=5.323$ b=1.275 $k_1=0.03012$	0.9784	0.0513	25.8357	$k_o=0.03652$ b=-0.2426 $k_1=4.163$	0.9858	0.0407	16.5055	$k_o=0.06367$ b=-22.97 $k_1=0.06597$	0.9943	0.0253	5.9417
6	a=1.022 k=0.01932	0.9655	0.0648	41.9409	a=0.0000059 k=504.3	0.9549	0.0724	53.4497	a=0.0000092 k=360.9	0.9605	0.0668	44.6484
7	a=-0.01746 b=0.000007491	0.9810	0.0480	23.1766	a=-0.02168 b=0.0001171	0.9907	0.0329	11.6911	a=-0.02412 b=0.0001429	0.9966	0.0186	3.6238
8	a=0.02629 k=6.366 b=0.003683 a=1.014	0.9247	0.0957	87.7333	a=1.646 k=0.0281 b=0.9158 a=1.012	0.9531	0.0739	52.4178	a=-13.09 k=0.06892 b=0.9352 a=0.9972	0.9966	0.0197	3.3102
9	k=0.002189 n=1.631 b=-0.0000498	0.9987	0.0126	1.5324	k=0.005768 n=1.448 b=0.000143	0.9990	0.0110	1.4541	k=0.00867 n=1.356 b=0.000637	0.9997	0.0058	0.2528

Çizelge 2 incelendiğinde, taze hurma örneklerinin kızılötesi kurutma yöntemiyle kurutulmasıyla elde edilen nem oranı değerlerine en yakın değerlerin, istatistiksel parametrelere göre kullanılan modeller arasında, Midilli ve ark. isimli modelden elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte Midilli ve ark. isimli model için, 60 °C sıcaklıkta kurutulan örneklerde $R^2=0.9987$, $RMSE=0.0126$ ve $\chi^2=1.5324 \times 10^{-4}$, 70 °C sıcaklıkta kurutulan örneklerde $R^2=0.9990$, $RMSE=0.0110$ ve $\chi^2=1.4541 \times 10^{-4}$, ve 80 °C sıcaklıkta kurutulan örneklerde $R^2=0.9997$, $RMSE=0.0058$ ve $\chi^2=$

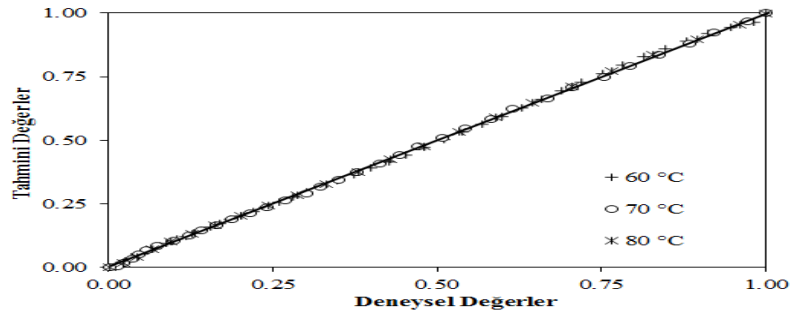
0.2528×10^{-4} ’tür. Ayrıca Şekil 2, elde edilen deneysel sonuçların Midilli ve ark. isimli model yardımıyla elde edilen tahmini sonuçlarla birbirlerine oldukça yakın olduklarını göstermektedir.

Şekil 3’te, kızılötesi kurutma yöntemiyle gerçekleştirilen kurutma işlemleri süreçlerinden elde edilen nem oranlarıyla, Midilli ve ark. isimli modelden elde edilen tahmini nem oranlarının karşılaştırılması verilmiştir. Nitekim ilgili şekilden, söz konusu bu verilerin 45° açıyla çizilmiş bir eğrinin etrafında toplandığı görülmüştür.



Şekil 2. Kızılötesi kurutma şartları altında deneysel ve Midilli ve ark. modeliyle elde edilen teorik nem oranı değerlerinin zamanla karşılaştırılması

Figure 2. A comparison of the experimental and theoretical moisture ratios predicted by the Midilli et al. model at specific drying times under infrared drying conditions



Şekil 3. Deneysel nem oranı değerleri ile Midilli ve ark. modeli kullanılarak elde edilen tahmini nem oranı değerlerinin karşılaştırılması

Figure 3. Comparison between experimental and predicted moisture ratio values using Midilli et al. model

Taze hurma örneklerinin kızılötesi kurutma yöntemiyle kurutulmasından elde edilen deneysel sonuçları için, bu çalışmada kullanılan diğer 9 modele nazaran, Midilli ve ark. isimli modelin en iyi tahminleyici model olduğu saptanmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, Celma ve ark. (2009) ve Doymaz ve ark. (2015) sırasıyla domates ve yeşil fasulye örneklerini kızılötesi kurutma yöntemiyle kurutarak elde ettikleri deneysel sonuçları uygulamış oldukları farklı modeller arasında en iyi açıklayan modelin Midilli ve ark. modeli olduğunu belirtmişlerdir.

4. Sonuç

Hurma örneklerinin 60, 70 ve 80 °C sıcaklıklarındaki kızılötesi uygulamalarında sıcaklığın artması ile kuruma süresi kısalmıştır. Kurutulan örneklerin ortalama kuruma süreleri 310, 170 ve 110 dakika olarak bulunmuştur.

Ayrıca, örneklerin nem oranlarının azalmasıyla kuruma hızlarının da yavaşladığı belirlenmiştir. Çalışmada değerlendirilen 9 farklı ince tabaka kurutma modeli arasında istatistiksel değerlendirmelere göre Midilli ve ark. modeli hurma örneklerinden deneysel olarak elde edilen nem oranı değerlerine en yakın sonuçları sağlamıştır. Sonuç olarak Midilli ve ark. modeli bu çalışmada kullanılan tüm kurutma şartlarında hurma örneklerinin kuruma eğrilerini en iyi açıklayan model olarak belirlenmiştir. Elde edilen kurutma karakteristikleri ve modelleme sonuçları dikkate alındığında kurutulan hurma örneklerinin kızılötesi kurutma yöntemiyle kurutulmasının olumlu sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- Adak N, Heybeli N, Ertekin C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, 219: 109-116.
- Agrawal YC, Singh RP. (1977). Thin layer drying studies on short grain rough rice. *ASAE*, 3531: 330-350.
- Aktaş M, İlbaş M, Yalçın A, Şahin M. (2013). Kızılötesi ışınım ile bir kurutucuda kuruma davranışlarının deneysel incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(4): 767-775.
- Amellal H, Benamara S. (2008). Vacuum drying of common date pulp cubes. *Drying Technology*, 26(3): 378-382.
- Ayensu A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4-6): 121-126.
- Botelho FM, Corrêa PC, Goneli A, Martins MA, Magalhães FE, Campos S. (2011). Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(8): 845-852.
- Celma AR, Cuadros F, López-Rodríguez F. (2009a). Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food and Bioprocess Processing*, 87(4): 282-291.
- Celma AR, López-Rodríguez F, Blázquez FC. (2009b). Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. *Food and Bioprocess Processing* 87(4): 247-253.
- Demiray E, Tülek Y. (2012) Kurutma İşleminin Kırmızı Biberdeki Renk Maddelerine Etkisi. *Electronic Journal of Food Technologies*, 7(3): 1-10.
- Doymaz İ. (2013). Determination of infrared drying characteristics and modelling of drying behaviour of carrot pomace. *Journal of Agricultural Sciences*. 19: 44-53.
- Doymaz İ, Kipcak AS, Piskin S. (2015). Characterisation of thin-layer infrared drying of green bean. *Czech Journal of Food Sciences*, 33: 83-90.
- Ertekin C, Heybeli N. (2014). Thin-layer infrared drying of mint leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(4): 1480-1490.
- Falade KO, Abbo ES. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 79(2): 724-730.
- FAO. (2017). *Food and Agricultural Organization Statistical Database*. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>. Accessed 5 January 2017.
- Goyal RK, Kingsly ARP, Manikantan MR, Ilyas SM. (2006). Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Biosystems Engineering*, 95: 43-49.
- Heybeli N, Ertekin C, Dikici G. (2013). İnfrared kurutucu ile kerevizin kurutulması. *Tralleis*, 1(2): 16-25.
- Ježek D, Tripalo B, Brnčić M, Karlović D, Brnčić SR, Vikić-Topić D, Karlović S. (2008). Dehydration of celery by infrared drying. *Croatica Chemica Acta*, 81(2): 325-331.
- Kassem AS. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. 13th International Congress on Agricultural Engineering, 2-6 February, Morocco.
- Kocabiyik H, Tezer D. (2009). Drying of carrot slices using infrared radiation. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(5): 953-959.
- Madamba PS, Driscoll RH, Buckle KA. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 75-97.
- Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7): 1503-1513.
- Nasiroglu S, Kocabiyik H. (2009). Thin-Layer infrared radiation drying of red pepper slices. *Journal of Food Process Engineering*, 32(1): 1-16.
- Nowak D, Lewicki PP. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(3): 353-360.
- Sharaf-Elden YI, Blaisdell JL, Hamdy MY. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5: 1261-1265.
- Sharma GP, Verma RC, Pathare PB. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67(3): 361-366.
- Yagcioglu A, Degirmencioglu A, Cagatay F. (1999). Drying characteristics of the laurel leaves under different drying conditions. *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy*. Adana, Turkey, 565-569.
- Wang CY, Singh RP. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *ASAE*, 78(3001): 33.
- Westerman PW, White GM, Ross IJ. (1973). Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. *Transactions of the ASAE*, 16: 1136-1139.