

KURUTMA YÖNTEMLERİNİN KIRAZ DOMATESİN KURUTMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ VE MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Naciye Kutlu*, Aslı İşçi

Ankara Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Dışkapı, Ankara

Geliş tarihi / Received: 25.11.2015

Düzeltilerek Geliş tarihi / Received in revised form: 18.01.2016

Kabul tarihi / Accepted: 20.01.2016

Özet

Bu çalışmada, kiraz domatesi (*Lycopersicon esculentum* var. *Cerasiforme*), iki farklı yöntem (tepsili kurutucu (TK) ve mikrodalga (MD)) kullanılarak farklı sıcaklıklar (60, 70 ve 80 °C)-MD güçlerinde (140, 210 ve 280 W) kurutulmuş ve bu değişkenlerin, ürünün bazı özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel veriler literatürden bulunan 13 farklı modele uyarlanmış ve modellerdeki katsayılar doğrusal olmayan regresyon analizleri ile hesaplanmıştır. MD ile kurutmanın süreyi yaklaşık %38 oranında azalttığı görülmüştür. Efektif difüzyon katsayıları, artan sıcaklık ve MD gücü ile yükselmiştir. En iyi uyum sağlayan modeller Logaritmik, Wang&Sing ve Midilli olarak bulunmuştur. TK ve MD ile kurutulan örneklerin aktivasyon enerjileri sırasıyla 25.00 ve 15.3 W/g olarak bulunmuştur. Yaş örneğe en yakın renk değerleri TK için 60 °C'de bulunurken, MD güçleri arasında fark görülmemiştir. MD örneklerinin renk kalitesinin, TK ile kurutulmuş örneklere kıyasla daha iyi olduğu bulunmuştur. En yüksek rehidrasyon oranının, TK için 60 °C'de, MD için ise 210 W gücünde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kiraz domatesi, kurutma, modelleme, tepsili kurutucu, mikrodalga.

EFFECT OF DRYING METHODS ON CHARACTERISTICS OF CHERRY TOMATO AND MATHEMATICAL MODELING

Abstract

In this study, cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* var. *Cerasiforme*) were dried with two different methods (tray dryer (TD) and microwave (MW)) using different temperatures (60, 70 and 80 °C)-MW powers (140, 210 and 280 W). The effects of drying parameters on some drying characteristics of cherry tomatoes were investigated. Thirteen mathematical models available in the literature were fitted to the experimental moisture ratio data and the coefficients of the models were determined by non-linear regression analysis. It was observed that drying in microwave oven has reduced the drying time by 38%. The effective moisture diffusivities increased with increasing temperature and MW power. The best fit models were found as Logarithmic, Wang&Sing and Midilli. The activation energy values were found as 25.00 ve 15.3 W/g for samples dried with TD and MW, respectively. The closest color values to wet sample were detected at 60 °C for TD, but there were no differences between MW powers. Color values of MW samples were found be better than TD samples. Maximum rehydration rate was detected at 60 °C for TD and 210 W for MW.

Keywords: Cherry tomato, drying, modeling, tray dryer, microwave.

* Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author;

✉ nkutlu@ankara.edu.tr,

© (+90) 312 203 3300-3632,

☎ (+90) 312 317 8711

GİRİŞ

Domates taze, kuru ya da konserve şeklinde, en çok tüketilen meyvelerden biridir. Türkiye, 1135000 ton domates üretimi ile Dünya'da dördüncü sırada yer almaktadır (1). Kiraz domatesinin su içeriğinin normal domates ile yaklaşık aynı olmasına karşın, daha yüksek miktarda, vitamin A, C ve B6 içerdiği görülmüştür. Ayrıca, likopen ve beta karoten miktarları da oldukça yüksektir (2). Kurutulmuş domates, salatalarda, çorbalarda, yemek ve soslarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Kurutma, çok eski yıllardan beri yaygın bir şekilde kullanılan en önemli gıda koruma yöntemlerinden biridir. Gıdaların kurutulması günümüzde laboratuvar ya da endüstriyel ölçekli birçok farklı yöntem ile yapılabilmektedir. Bunlardan en önemlisi, sıcak hava ile kurutma olup, endüstriyel olarak da bu yöntem çok yaygındır. Kurutma yöntemi, ürün kalitesi içinde çok önemlidir (3). Sıcak hava kurutma yöntemiyle yapılan çalışmalar için örnek olarak, mantar (4), elma (5) ve kivi (6) verilebilir.

Mikrodalgalar 300 MHz ve 300 GHz frekans aralığına sahip elektromanyetik dalgalardır. Mikrodalgalar, iyonik iletim ve dipolar rotasyon olmak üzere iki şekilde ısıtma sağlarlar (7). Mikrodalga sistemleri henüz endüstriyel anlamda çok yaygın olmamasına karşın, laboratuvar çalışmalarında çok kullanılmaktadır (8). Tercih edilmesinin en önemli sebebi kurutma süresini oldukça kısaltmasıdır. Bunun yanında, etkin enerji kullanımı, seçici ısıtma, hassas proses kontrol, yüksek besin değerine sahip gıda sağlama gibi birçok avantajı da mevcuttur (9). MD kurutma yöntemiyle yapılan çalışmalar için örnek olarak, muz (10), nar (11) ve elma (12) verilebilir.

Bu çalışmanın amacı, kiraz domatesini iki farklı yöntem kullanılarak kurutulmasıdır. Kurutma sırasında farklı sıcaklıklar (60, 70 ve 80 °C) ve MD güçleri (140, 210, 280 W) denenmiş olup bu parametrelerin kurutma karakteristikleri (kuruma hızı, süresi, nem içeriği, efektif difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi, renk ve rehidrasyon oranı) üzerine etkisi incelenmiştir. Denemeler sonunda elde edilen nem değişimi verileri, matematiksel modeller ile açıklanmış ve en iyi uyum gösteren modeller belirlenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada materyal olarak kullanılan kiraz domatesi, lokal marketlerden tedarik edilmiştir. Örnekleri, kurutulmadan önce ekvatora dik olacak şekilde ikiye bölünmüştür (Çap 26±1 mm). Örneklerin kurutma öncesi ve sonrasındaki nem miktarları 105 °C'de infrared nem tayin cihazı (HB43-S, Metter Toledo, USA) ile belirlenmiştir.

Örneklerin tepsili kurutucu (TK) ile kurutulması

Deneylerde kullanılan laboratuvar ölçekli TK İNOKSEN A.Ş. firması tarafından özel olarak imal edilmiştir. Örnekler değişik kurutma sıcaklıklarında (60, 70 ve 80 °C) ve sabit hava hızında (2 m/s) kütle değişimleri sabitleninceye kadar kurutulmuştur. Ürünlerdeki ağırlık değişimleri her 30 dakikada bir kaydedilmiştir. Tüm deneyler 2 tekerrürlü yapılmıştır.

Örneklerin mikrodalga (MD) ile kurutulması

Örnekler, MD işlemi öncesinde TK ile (80 °C ve 2 m/s hava hızı) nem miktarı %65 (y.b) oluncaya kadar bir ön-kurutmaya tabii tutulmuştur. Daha sonra örnekler MD fırında (General Electric, GMOM 25, A.B.D) 3 farklı güç seviyesinde (140, 210, 280 W) kurutulmuşlardır. Güçler belirlenirken, materyalin kuruyabildiği en düşük güç ile yanmadan dayanabildiği en yüksek güç seçilmiştir. Ürünlerde kütle değişimleri hassas terazi ile (ATX-224, Shimadzu, Japonya) 30 saniyede bir kaydedilmiş ve tüm deneyler 2 tekerrürlü yapılmıştır.

Renk analizleri

Renk analizi, renk ölçer cihazı (C-400, Konica Minolta, Japonya) ile yapılmıştır. Kurutma öncesi ve kurutma sonrası 3 noktadan alınan CIE L*, a* ve b* değerleri kayıt edilmiş ve a*/b* oranı hesaplanmıştır. CIE L*, a* ve b* renk skala sisteminde L* aydınlık (parlaklık) değeridir. L* maksimum 100 (beyaz), minimum 0 (siyah) olacak şekilde değişebilmektedir. Pozitif a*, b* sırası ile kırmızı ve sarı, negatif a*, b* ise sırası ile yeşil ve mavi rengi göstermektedir (13).

Rehidrasyon oranı

Kurutulmuş örnekler 24 saat boyunca 25±1 °C'de su banyosu (SBD-313, Şimşek Laborteknik, Türkiye) içerisinde tutulmuş ve sonrasında yaş ürün ağırlıkları bulunmuştur (3). Rehidrasyon oranı eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.

$$RO = \frac{\text{yaş ağırlık (g)} - \text{kuru ağırlık (g)}}{\text{kuru madde miktarı (g)}} = \frac{\text{tutulan su miktarı (g)}}{\text{kuru madde miktarı (g)}} \quad (1)$$

Difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi hesaplamaları

Difüzyon katsayılarının belirlenmesinde kullanılan matematiksel eşitlik 2 aşağıda verilmiştir. Burada, ANO; Ayrılabilir nem oranı (M/M₀) (ürünün "t" anındaki nem miktarının ilk nem içeriğine oranı), t; kurutma süresi (s), D_{eff}; Efektif difüzyon katsayısı (m²/s) ve L; yarım dilim kalınlığı (m)'dir. Uzun kuruma süreleri için eşitlik 2, serilerin ilk terimleri sadeleştirilip, logaritmik formda yazıldığında eşitlik 3 elde edilir.

$$ANO = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{[2n+1]^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (2)$$

$$\ln ANO = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (3)$$

Bu çalışmada eşitlik 3'den yola çıkarak, ANO değerlerinin doğal logaritmik dönüşümleri zamana karşı grafiğe geçirilmiş ve elde edilen doğrunun eğimi kullanılarak D_{eff} değerleri eşitlik 4 ile hesaplanmıştır. Bu denklemde K, doğrunun eğimini göstermektedir (14).

$$K = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \quad (4)$$

Difüzyon katsayısının değişimi Arrhenius tipi üssel bir fonksiyonla açıklanabilmektedir. Aktivasyon enerjileri, TK ile kurutulan örnekler için eşitlik 5, MD ile kurutulan örnekler için eşitlik 6 kullanılarak (15) hesaplanmıştır.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (5)$$

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_A m}{P}\right) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde, D_{eff} ; Efektif difüzyon katsayısı (m^2/s), D_0 ; Sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısı (m^2/s), E_A ; Aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R ; Üniversal gaz sabiti ($\text{kJ}/\text{mol.K}$), T ; kurutma havası sıcaklığı (K), m ; yaş ürün ağırlığı (g) ve P ; MD gücüdür (W).

Matematiksel modelleme

Gıda kurutma proseslerinde en çok kullanılan 13 model (Çizelge 1) istatistiksel olarak kıyaslanmış ve modellerdeki katsayılar doğrusal olmayan regresyon analizi (SigmaPlot 11.0, Systat Inc., USA) yapılarak bulunmuştur. Deneysel verilere en uygun model belirlenirken RMSE (tahmini standart hata), χ^2 (ki-kare) ve R^2 (belirleme katsayısı) hesaplanmıştır. Tahmini standart hata, modelden elde edilen tahmini ve deneysel veri arasındaki sapmayı ve ki-kare uyumun iyilik derecesini göstermektedir. En uygun model için ki-kare ve tahmini standart hata değerinin sıfıra, R^2 'nin ise bire yakın olması gerekmektedir (29). Bu eşitliklerde, ANO_{tahmini} ; tahmini ayrılabilir nem oranı, ANO_{deneysel} ; deneysel ayrılabilir nem oranı, N ; deneysel veri sayısı ve n ; kullanılan modeldeki katsayı sayısıdır.

Çizelge 1 Çalışmada kullanılan matematiksel modeller

Table 1 Thin layer drying models

Model	Model Adı / Model Name	Kaynak / References
$ANO = \exp(-kt)$	Newton	16
$ANO = \exp(-kt^n)$	Page	17
$ANO = \exp[-(kt)^n]$	Geliştirilmiş Page I Modified Page I	18
$ANO = \exp[-(kt)^n]$	Geliştirilmiş Page II Modified Page II	19
$ANO = a \exp(-kt)$	Henderson & Pabis	20
$ANO = a \exp(-kt) + c$	Logaritmik / Logarithmic	21
$ANO = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	İki terimli / Two-term	22
$ANO = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	İki terimli exponansiyel Two-term exponential	23
$ANO = 1 + at + bt^2$	Wang&Sing	24
$ANO = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Difüzyon yaklaşım Diffusion approach	25
$ANO = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Verma ve ark. Verma et al.	26
$ANO = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Geliştirilmiş Henderson ve Pabis Modified Henderson and Pabis	27
$ANO = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli	28

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ANO_{\text{tahmini}} - ANO_{\text{deneysel}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (ANO_{\text{deneysel}} - ANO_{\text{tahmini}})^2}{N - n} \quad (8)$$

Kurutma hızının hesaplanması

Kurutma hızı eşitlik 9 kullanılarak tüm örnekler için hesaplanmıştır (30). Bu eşitlikte, $\Delta M/\Delta t$; Kurutma hızı ($\text{kg su}/\text{kg k.m. dk}$), M ; Belli bir "t" anındaki nem içeriği ($\text{kg su}/\text{kg k.m.}$) ve t , Δt ; Zamandır (dk).

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_{t+\Delta t} - M}{\Delta t} \quad (9)$$

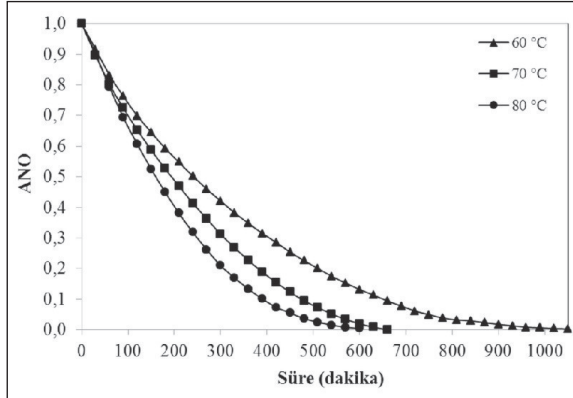
İstatistiksel analizler

Bulgularla ilgili istatistiksel analizler MINTAB 15.1.1.0 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sonucu, istatistiksel açıdan önemli bulunan değerler Tukey testi ile $P \leq 0.05$ önem derecesine göre belirlenmiştir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Sıcak Hava ile Kurutma

Örneklerinin nem miktarları TK ile kurutma başlangıcında %91 (y.b.) iken, kurutma sonunda bu oran %5 (y.b.) olarak ölçülmüştür. Örneklerin ayrılabilir nem oranları (ANO) kurutma süresi ile azalmıştır (Şekil 1). Kurutma hızı, ANO değeri düştükçe azalmaktadır. Sabit hızda bir kuruma görülmemekte ve sıcaklık artışı kurutma hızını olumlu etkilemektedir (Şekil 2). Kurutma hızı düşük olan örneklerin, kurutma sürelerinin de uzun olması beklenen bir olgudur. Örnekler 60, 70 ve 80 °C'de sırasıyla 1050, 660 ve 600 dakikada kurumuşlardır. Kurutma sıcaklığı 60 °C'den 80 °C'ye artırıldığında kurutma süresinde %37 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak, 70 °C ile 80 °C kurutma sıcaklıkları arasında sadece %9'luk bir süre kazanımı vardır. Bu bulgular



Şekil 1 TK ile kurutulan örneklerin ayrılabilir nem oranının (ANO) kurutma süresi ile değişimi

Figure 1 The change of moisture ratio (MR) of the TD dried samples with time

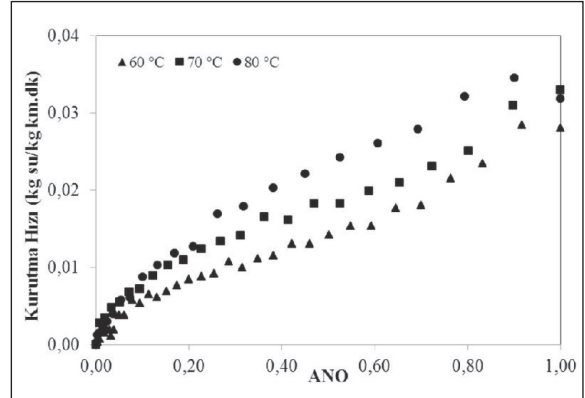
ışığında, örneklerin kurutma sıcaklığını 70 °C'den daha fazla arttırmanın (kurutma süresini çok etkilemediği için) ekonomik olmayacağı söylenebilir. Literatüre bakıldığında, 60-100 °C sıcaklık aralığında kurutulan domates örneklerinin 480-1200 dakika arasında değişen sürelerde kuruduğu görülmüştür. Bir çalışmada, sıcaklığın 60 °C'den 70 °C'ye çıkması ile kurutma süresi %30 azalırken, 70 °C'den 80 °C'ye çıkarılması süreyi sadece %14 oranında kısaltmıştır (31). Bu sonuçlar, bizim bulgularımızı destekler niteliktedir.

Her bir model için deneysel ve tahmini veriler kullanılarak RMSE, χ^2 ve R^2 değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde (Çizelge 2), 60 ve 70 °C için en yüksek R^2 ve en düşük RMSE ile χ^2 değeri, Logaritmik modelde saptanmıştır. 80 °C'de kurutulmuş örnekler için ise Wang&Sing modelinin en iyi uyumu gösterdiği söylenebilir.

Örneklerin efektif difüzyon katsayısı, artan sıcaklık ile yükselmiş ve $1.03-1.71 \times 10^{-9}$ m²/s aralığında değişmiştir (Çizelge 3). Bir çalışmada, domates püresinin efektif difüzyon katsayısının $7.77-9.14 \times 10^{-9}$ m²/s arasında, 16 mm kalınlığındaki yarım domatesin efektif difüzyon katsayısının ise $2.26-4.01 \times 10^{-9}$ m²/s arasında değiştiği tespit edilmiştir (32). Organik domatesler ile yapılan diğer bir çalışmada efektif difüzyon katsayılarının $1.07-1.31 \times 10^{-9}$ m²/s

Çizelge 2 Kurutulmuş örnekler için kullanılan modellerin katsayıları
Table 2 Model coefficients of dried samples

Model	Kurutma Koşulu Drying Conditions	RMSE	χ^2	R^2	a	k	c veya n c or n	b
Logaritmik	60°C	0.00354	0.00001	0.99886	1.088	0.002584	-0.09098	-
Logaritmik	70°C	0.00452	0.00002	0.99940	1.200	0.002839	-0.20150	-
Wang&Sing	80°C	0.00076	0.00001	0.99943	-0.00361	-	-	0.000003304
Midilli	140 W	0.00507	0.00003	0.99953	1.006	0.0001456	1.461	0.000037710
Midilli	210 W	0.00119	0.00000	0.99851	0.9929	0.0035610	1.077	0.000024210
Midilli	280 W	0.00938	0.00018	0.99991	1.000	0.0028400	1.170	0.000035140



Şekil 2 TK ile kurutulan örneklerin kurutma hızının ANO ile değişimi

Figure 2 The change of drying rate of TD dried samples with MR

aralığında olduğunu bildirilmiştir (25). Aktivasyon enerjisi (E_A) ise, efektif difüzyon katsayılarının doğal logaritması ($\ln D_{eff}$), sıcaklığın tersine ($1/T$) karşı grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğiminden hesaplanmıştır. Bu çalışmada kiraz domatesi örneklerinin aktivasyon enerjisi 25.00 kJ/mol olarak bulunmuştur. Domates ile yapılan diğer çalışmalar için aktivasyon enerjisi 22.98 kJ/mol (31) ve 32.94 kJ/mol olarak rapor edilmiştir (20).

Kurutma öncesinde yaş örneklerin ($n=18$) ortalama L^* değerleri 38.61 olarak ölçülmüştür (Çizelge 4). Kontrol örneği L^* değeri ile 60 °C'de kurutulan örneklerin L^* değeri arasındaki fark istatistiksel olarak önemli değil iken, 70 ve 80 °C'de kurutulan örneklerde parlaklık önemli derecede azalmıştır ($P<0.05$). Sıcaklık yükselişinin, üründe parlaklığı azalttığı ve görüntü kalitesi açısından olumsuz etki

Çizelge 3 Kurutulmuş örneklerin D_{eff} değerleri
Table 3 D_{eff} values of dried samples

Sıcaklık (°C) Temperature (°C)	D_{eff} (m ² /s)
60°C	1.03×10^{-9}
70°C	1.37×10^{-9}
80°C	1.71×10^{-9}
140 W	5.22×10^{-9}
210 W	5.52×10^{-9}
280 W	7.56×10^{-9}

Çizelge 4 Kurutulmuş örneklerin renk değerleri
Table 4 Color values of dried samples

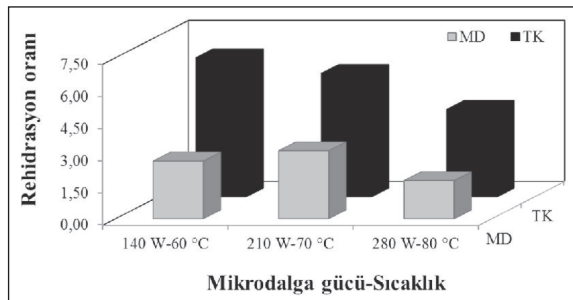
Kurutma Koşulları Drying Conditions	L*	a*	b*	a*/b*
Kontrol-TK Control-TD	38.61±0.66	18.38±1.76	22.25±1.65	0.83
60°C	39.18±1.73	27.95±3.78	32.64±1.88	0.86
70°C	36.05±2.78	28.85±3.34	30.73±1.69	0.94
80°C	31.30±0.84	30.23±1.42	28.02±2.13	1.08
Kontrol-MD Control-MW	38.07±0.65	22.55±0.40	21.44±1.93	1.05
140 W	35.72±0.96	24.50±1.66	21.75±1.26	1.13
210 W	34.16±1.38	22.84±1.95	23.20±1.46	0.98
280 W	37.60±1.63	21.63±0.92	23.69±0.88	0.91

yarattığı söylenebilir. Örneklerin kurutma öncesi ölçülen kırmızılık değeri (a*) 18.38 olarak ölçülmüş yapılan istatistiksel analizlere göre 60, 70 ve 80 °C'de ölçülen a* değerleri arasındaki farkın önemli olmadığı belirlenmiştir ($P<0.05$). a*/b* oranının ise düşük olması renk kalitesinin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Örneklerin a*/b* oranı sıcaklıkla birlikte artmış, kontrol ürününe en yakın değer 60 °C'de kurutulan örneklerde görülmüştür. Bir çalışmada, kurutulan organik domates örneklerinin L değerleri 33.80 ile 37.44, a değerini 23.54 ile 27.20 ve a/b oranını 1.49 ile 1.60 aralığında olduğunu rapor edilmiştir (25). Başka bir çalışmada, a*/b* oranının 1.0 ile 1.20 aralığında değiştiği ve en iyi renk değerlerinin 60 °C'de kurutulmuş ürünlerde olduğu bildirilmiştir (33).

Kuru örneklerin en yüksek ve en düşük rehidrasyon oranları sırasıyla 6.48 ve 4.07 g tutulan su/g kuru maddedir. En yüksek rehidrasyon oranı 60 °C'de kurutulan örneklerde görülmekte olup (Şekil 3), 80 °C'de ölçülen değerin, diğer iki sıcaklığa göre, istatistiksel olarak önemli ölçüde daha az olduğu tespit edilmiştir ($P<0.05$). Sıcaklık arttıkça rehidrasyon oranı azalmıştır. Literatürde, domates örnekleri farklı sıcaklıklarda (25, 40, 60 ve 80 °C) kurutulmuş ve rehidrasyon oranlarının sıcaklık arttıkça azaldığı belirtilmiştir (34). Bu bulgular, bizim sonucumuzu destekler niteliktedir.

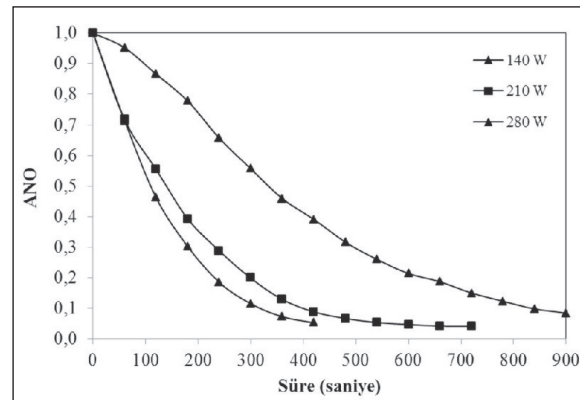
Mikrodalga ile Kurutma

Örneklerin MD ile kurutma öncesi nem miktarı ortalama %65 (y.b) iken kurutma sonrası ürünlerin nem miktarı %13 (y.b.) olarak ölçülmüştür. Ürünlerin



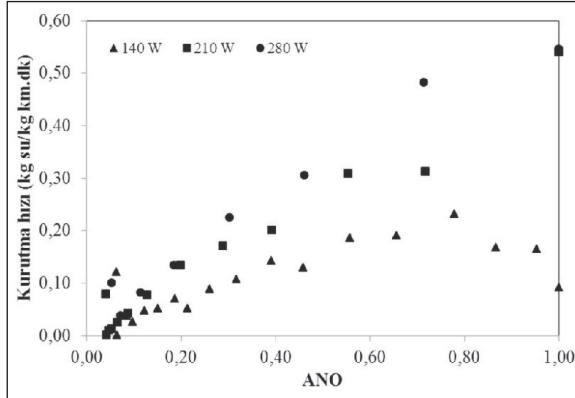
Şekil 3 TK ve MD ile kurutulan örneklerin rehidrasyon oranı
Figure 3 Rehydration rate of TD and MW dried samples

ANO değerlerinin zamanla değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Kurutma hızı grafiği incelendiğinde, (Şekil 5) MD gücünün kurutma hızı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Genel olarak kurutmanın azalan hız periyodunda gerçekleştiği söylenebilir. MD ile kurutulan örneklerin kurutma hızları, TK ile kurutulan örneklere oranla yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bu bulgu, MD ile gıda ürünlerinin kurutulması üzerine etkisini göstermektedir. Örneklerin (artan MD gücü ile) kurutma süreleri sırasıyla 1020, 720 ve 420 saniyedir. MD gücünün 2 kat artırılması, kuruma süresini %59 oranında azaltmıştır. Domates ezmesinin MD ile 160-800 W güç arasında kurutulmasıyla elde edilen kurutma hızı verilerine göre MD gücü arttıkça kurutma hızının da arttığı rapor edilmiştir (35). Aynı çalışmada, MD gücünün 5 kat artırılması ile kurutma süresinin yaklaşık 2.5 kat azaldığı bildirilmiştir. Diğer bir çalışmada da, domates dilimlerinin kurutma hızlarının MD gücüyle orantılı olarak arttığı bildirilmiştir (36). Aynı çalışmada, domates örneklerinin 90 W MD gücünde 100 dakikada kuruduğu, gücün 4 kat artırılması ile kurutma süresinin 6 dakikaya düştüğü rapor edilmiştir. TK ile örneklerinin ön-kurutması için harcanan süre 360 dakika olarak belirlenmiştir. Bu değere, MD ile nihai nem miktarına kadar geçen süre eklenerek



Şekil 4 MD ile kurutulan örneklerin ayrılabilir nem oranının (ANO) kurutma süresi ile değişimi

Figure 4 The change of moisture ratio (MR) of the MW dried samples with time



Şekil 5 MD ile kurutulan örneklerin kurutma hızının ANO ile değişimi

Figure 5 The change of drying rate of MW dried samples with MR

toplam kurutma süreleri hesaplanmıştır ve sadece TK kullanılarak gerçekleştirilen kurutmaya göre süreyi %37-39 oranında azalttığı görülmüştür. MD kurutma işleminin endüstriyel alanlarda da kullanılabilmesi ve düşük MD güçlerinde dahi kurutma süresinin büyük ölçüde azaltılabiliyor olması, MD ile kurutma sırasındaki enerji sarfiyatının minimumda tutulabileceğini göstermektedir.

Deneylerden elde edilen gerçek veriler ve modellerden elde edilen tahmini veriler kullanılarak R^2 , χ^2 ve RMSE değerleri hesaplanmıştır ve sonuçlar irdelendiğinde (Çizelge 2), tek modelin deneysel verilere iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir. Buna göre; MD ile kurutulan örnekler için, MD güçleri fark etmeksizin en iyi uyum gösteren model Midilli olarak saptanmıştır. Benzer olarak, domates ezmesinin MD ile kurutulduğu bir çalışmada, deneysel verilere en iyi uyum gösteren modelin Midilli olduğu görülmüştür (35).

MD ile kurutulmuş olan örneklerin efektif difüzyon katsayıları $5.22-7.56 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında olduğu bulunmuştur (Çizelge 3). TK ile karşılaştırıldığında, efektif difüzyon katsayılarının MD ile yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Efektif difüzyon katsayısı MD gücü arttıkça bir artış göstermiştir. Domates ezmesinin MD ile 160-800 W güçlerinde kurutulduğu bir çalışmada, efektif difüzyon katsayısı $1.14-6.09 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında değiştiği bildirilmiştir (35). Domates örneklerinin 210 ve 700 W güçlerinde kurutulduğu diğer bir çalışmada ise efektif difüzyon katsayılarının $5.16-11.11 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında değiştiği rapor edilmiştir (37). Efektif difüzyon katsayılarının doğal logaritması ($\ln(D_{\text{eff}})$), ürünün ağırlığının MD gücüne oranına (m/P) karşı grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğiminden ürünün aktivasyon

enerjisi (E_A) hesaplanmaktadır. Bu çalışmada kiraz domatesi örneklerinin aktivasyon enerjisi 15.3 W/g olarak bulunmuştur. MD içine koyulan örnekler $5-7.5 \text{ g}$ aralığındadır.

Kurutma öncesinde yaş örneklerin ($n=9$) ortalama L^* değerleri 38.07 olarak ölçülmüştür (Çizelge 4). MD gücü artışı ile L^* değerlerinde çok önemli bir değişme görülmemiştir. Örneklerin kurutma öncesi ölçülen kırmızılık değeri (a^*) 22.55 olarak ölçülmüş ve bu değer kurutma işlemi sonrasında farklı MD güçleriyle önemli bir değişme göstermemiştir ($P>0.05$). a^*/b^* oranının ise düşük olması renk kalitesinin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Örneklerin a^*/b^* oranında, MD gücü artışı ile birlikte istatistiksel açıdan önemli bir fark görülmemiştir ($P>0.05$). Elde edilen bu bulgular, MD ile kurutulmuş örneklerin görüntü kalitesinin yaş örneğe çok yakın olduğunu göstermektedir. TK ile kurutulan örnekler ile kıyaslandığında, MD ile kurutulan örneklerin renk açısından daha kaliteli olduğu söylenebilir.

MD ile kurutulan örneklerin en yüksek ve en düşük rehidrasyon oranları sırasıyla 3.17 ve 1.77 g tutulan su miktarı/ g kuru madde'dir. Sonuçlar incelendiğinde (Şekil 3) en yüksek rehidrasyon oranı 210 W MD gücünde kurutulmuş örneklerde gözlemlenmiştir ($P<0.05$). TK ve MD ile kurutulan örneklerinin rehidrasyon oranları karşılaştırıldığında, TK ile kurutulan örneklerin yeniden su tutabilme özelliklerinin belirgin bir şekilde daha fazla olduğu tespit edilmiştir. MD ile kuruyan örneklerin son ürünlerdeki nem miktarları TK ile kurutan örneklerden daha yüksek olduğu için, bu durumun rehidrasyon oranını düşürdüğü düşünülmektedir.

Sonuç olarak, MD kullanılması kurutma süresini yaklaşık %38 oranlarında azaltmıştır. Tüm ürünlerde efektif difüzyon katsayıları $10^{-9}-10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değiştiği ve MD ile kurutulan örneklerin D_{eff} değerleri, TK ile kurutulan örneklerden yaklaşık 10 kat daha yüksektir. MD ile kurutulan örneklerin renk kalitesi TK ile kurutulmuş örneklere kıyasla daha iyi olduğu bulunmuştur. Rehidrasyon oranları TK örneklerinde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Kurutma süresi açısından değerlendirilirse, MD ile kurutmanın gıda endüstrisine büyük kazanç sağlayacağı çok açıktır.

Teşekkür

SigmaPlot 11.0 programı ile ilgili destek ve yardımlarından dolayı, Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Dr. Suna Ertunç'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. FAO. Gıda ve Tarım Örgütü, Domates üretim istatistikleri <http://www.fao.org/statistics/en/> (Erişim 17 Temmuz 2015).
2. Ulusal Gıda Kompozisyonları Veri Tabanı <http://http://www.turkomp.gov.tr/> (Erişim 17 Kasım 2015).
3. Ertekin C, Yaldiz O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J Food Eng*, 63, 349-359.
4. Guo X, Xia C, Tan Y, Chen I, Ming J. 2014. Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinus edodes*). *J Integr Agric*, 13, 207-216.
5. Esfahani JA, Majdi H, Barati E. 2014. Analytical two-dimensional analysis of the transport phenomena occurring during convective drying: Apple slices. *J Food Eng*, 123, 87-93.
6. Orikasa T, Koide S, Okamoto S, Imaizumi T, Muramatsu Y, Takeda J, Shiina T, Tagawa A. 2014. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. *J Food Eng*, 125, 51-58.
7. Schubert H, Regier M. 2005. *The Microwave Processing of Foods*. Woodhead Cambridge, UK.
8. Wang, J. and Xi, Y.S. 2005. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *J Food Eng*, 68, 505-511.
9. Torringa E, Esveld E, Scheewe I, van den Berg R, Bartels P. 2001. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *J Food Eng*, 49, 185-191.
10. Esehaghbeygi AA, Pirnazari K, Sadeghi M. 2014. Quality assessment of electrohydrodynamic & microwave dehydrated banana slices. *Food Sci Technol*, 55, 565-571.
11. Dak M, Pareek NK. 2014. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils undergoing microwave-vacuum drying. *J Food Eng*, 122, 117-121.
12. Zarein M, Samadi SH, Ghobadian B. 2015. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *J Saudi Society Agric Sci*, 14(1), 41-47.
13. Hunterlab. 2008. Hunter Versus CIE 1976 L*, a*, b*. Applications Note. 13(2), 4 pp.
14. Wang Z, Sun J, Chen F, Liao X, Hu X. 2007. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace and without hot air pre-drying. *J Food Eng*, 80, 536-544.
15. Dadalı G, Apar DK, Özbek B. 2007. Microwave Drying Kinetics of Okra. *Drying Technology*, 25, 917-924.
16. Ayensu A. 1997. Dehydration of Food Crops Using a Solar Dryer With Convective Heat Flow. *Solar Energy*, 59(4-6), 121-126.
17. Sarsavadiva P, Sawhney R, Pangavhane DR, Sing I. 1999. Drying Behaviour of Brined Onion Slices. *J Food Eng*, 40, 219-226.
18. Yıldız O, Ertekin C, Uzun HI. 2000. Çekirdeksiz Üzümün İnce Tabaka Halinde Güneş Enerji ile Kurutulmasının Matematiksel Modellemesi Üzerinde Bir Araştırma. 19. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi Bildiri Kitabı, Erzurum, 345-350 s.
19. Yıldız O, Ertekin C. 2001. Thin Layer Solar Drying of Some Vegetables. *Drying Technol*, 19, 583-597.
20. Doymaz I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J Food Eng*, 79, 243-248.
21. Yağcıoğlu A, Değirmencioğlu A, Çağatay F. 1999. Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Condition. 7th Int. Congress on Agriculture Mechanization and Energy, pp. 565-569, Adana.
22. Madamba PS, Driscoll RH, Buckle KA. 1996. Thin Layer Drying Characteristics of Garlic Slices. *J Food Eng*, 29, 75-97.
23. Sharaf-Eldeen YI, Blaisdell JL, Hamdy MY. 1980. A model for Ear Corn. *Drying Technol ASAE*, 23, 1261-1271.
24. Wang CY, Sing RP. 1978. *A Single Layer Drying Equation for Rough Rice*. Am. Soc. Agr. Eng, St. Joseph, MI, 78, 3001.
25. Sacilik K, Keskin R, Elicin AK. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J Food Eng*, 73, 231-238.
26. Verma LR, Bucklin JB, Endan F, Wratten T. 1985. Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. *Technol ASAE*, 28, 296-301.
27. Karathanos VT. 1999. Determination on Water Content of Dried Fruits by Drying Kinetics. *J Food Eng*, 39, 337-344.
28. Midilli A, Küçük H, Yapar Z. 2002. A New Model for Single-Layer Drying. *Drying Technol*, 20, 1503-1513.
29. Pangavhane DR, Sawhney PN, Sarsavadia PN. 1999. Effect of Various Dipping Pretreatments on Drying Kinetics of Thompson Seedless Grapes. *J Food Eng*, 39, 211-216.
30. Karaaslan SN. 2008. Sebze ve Endüstri Bitkilerinin Mikrodalgayla Kurutulması Üzerine Çalışmalar. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Adana, Türkiye, 195 s.

31. Demiray E, Tulek Y. 2012. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersium esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer. *Heat Mass Transfer*, 48; pp. 841-847.
32. Giovanelli G, Zanoni B, Lavelli V, Nani R. 2002. Water Sorption, Drying and Antioxidant Properties of Dried Tomato Products. *J Food Eng*, 52, 135-141.
33. Muratore G, Rizzo V, Licciardello F, Maccarone E. 2008. Partial dehydration of cherry tomato at different temperature and nutritional quality of the products. *Food Chem*, 111, 887-891.
34. Goula AM, Adamopoulos KG. 2009. Modeling the rehydration process of dried tomato. *Drying technol*, 27, 1078-1088.
35. Al-Harabsheh M, Al-Muhtaseb H, Magee TRA. 2009. Microwave Drying Kinetics of Tomato Pomace: Effect of Osmotic Dehydration. *Chem Eng Proces*, 48, 524-531.
36. Çelen S, Kahveci K. 2013. Microwave Drying Behaviour of Tomato Slices. *Czech J Food Sci*, 2, 132-138.
37. Arslan D, Özcan MM. 2011. Drying of tomato slices: changes in drying kinetics, mineral contents, antioxidant activity and color parameters. *CyTA-J Food*, 9, 229-236.