

Farklı Kurutma Yöntemlerinin Patlıcanın Kurutma Karakteristikleri Üzerine Etkisi ve Kurutmanın Matematiksel Modellenmesi

Naciye Kutlu ✉, Aslı İşçi

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Dışkapı, Ankara

Geliş Tarihi (Received): 14.12.2015, Kabul Tarihi (Accepted): 29.03.2016

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): nkutlu@ankara.edu.tr (N. Kutlu)

☎ 0 312 203 33 00 / 3632 📠 0 312 317 87 11

ÖZ

Bu çalışmada, patlıcan (*Solanum melongena*) dilimleri tepsili kurutucu (TK) ve mikrodalga (MD) kullanılarak farklı sıcaklık (60, 70 ve 80°C) ve mikrodalga güçlerinde (180, 450 ve 720 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 %60 oranında azalttığı görülmüştür. Efektif difüzyon katsayıları, artan sıcaklık ve MD gücü ile yükselmiştir. En iyi uyum sağlayan modeller proses koşullarına göre değişiklik göstermiştir. TK ile kurutulan örneklerin aktivasyon enerjileri sıcaklıkla, MD ile kurutulan örneklerin aktivasyon enerjileri ise MD gücü ile ilişkilendirilmiştir. En yüksek rehidrasyon oranının, TK için 60°C'de, MD için ise 180 W gücünde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Patlıcan, Kurutma, Modelleme, Tepsili kurutucu, Mikrodalga

Effect of Different Drying Methods on Drying Characteristics of Eggplant Slices and Mathematical Modeling of Drying Processes

ABSTRACT

In this study, eggplant (*Solanum melongena*) slices were dried with two different methods (tray dryer (TD) and microwave (MW)) using different temperatures (60, 70 and 80°C) and MW powers (180, 450 and 720 W). The effects of drying parameters on some drying characteristics of eggplant were determined. Thirteen mathematical models available in the literature were fitted to the experimental moisture ratio data, and the coefficients of the models were determined by a non-linear regression analysis. Drying in an microwave oven reduced drying time by 60%. The effective moisture diffusivities increased with an increase in temperature and MW power. The best fit models varied depending on process conditions. The activation energies of tray dried and microwave dried samples were determined to be a function of temperature and microwave power, respectively. Maximum rehydration rate was found at 60°C for TD and 180 W for MW treatments.

Keywords: Eggplant, Drying, Modeling, Tray dryer, Microwave

GİRİŞ

Patlıcan (*Solanum melongena*) özellikle Çin, Hindistan ve İran'da üretilen önemli bir sebzedir. Türkiye'de üretimi yaklaşık 800000 tondur [1]. Gıda kompozisyonları veri tabanına göre, patlıcanın su oranı

yaklaşık %93'tür. Bu nedenle kalorisi çok düşüktür (23 kcal / 100 g). Kuru patlıcanın karbonhidrat, protein, mineral (demir, magnezyum, potasyum, sodyum, çinko), toplam lif gibi besin değerleri taze patlıcana göre daha yüksektir [2]. Kurutulmuş patlıcan, yemeklerde ve çorba karışımlarında kullanılabilir.

Kurutma işlemi ile su miktarı azalacağından, enzimatik ve mikrobiyolojik bozulma olasılığı önemli ölçüde azalmaktadır. Kurutma işlemi olarak çok farklı yöntemler kullanılmakta (sıcak havalı, püskürtmeli, akışkan yataklı, dondurarak vb.) ve yeni yöntemler (mikrodalga, radyo frekans ile vb.) endüstriye uyarlanma çalışılmaktadır [3]. Kullanılan yöntem, gıda kalitesi için çok önemlidir [4]. Endüstriyel olarak çok yaygın olarak kullanılan yöntem konveksiyonel kurutmadır. Genellikle tepsili kurutucu ile ürünler kurutulur. Son yıllarda, uzun kurutma sürelerinden dolayı sıcak hava ile kurutma yerine, MD ile kurutma işlemi üzerine çalışılmaktadır [5]. MD ile kurutmanın avantajları; düşük kurutma süresi, homojen ısıtma, yüksek verim, düşük maliyet, diğer yöntemlerle uyumlu olabilmesidir [6].

Bu çalışmanın amacı, patlıcanın TK ve MD ile farklı sıcaklık (60, 70 ve 80°C), farklı MD güçleri (180, 450 ve 720 W) ve farklı dilim kalınlıklarının (5 ve 10 mm), bazı kurutma karakteristikleri (kurutma hızı, efektif difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi ve rehidrasyon oranı) üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen deneysel nem verileri literatürde bulunan 13 farklı ince tabaka kurutma modeline uyarlanmış ve en iyi uyum sağlayan modeller belirlenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada materyal olarak kullanılan patlıcan (*Solanum melongena*) Ankara'dan lokal marketlerden tedarik edilmiştir. Ürünler iki farklı kalınlıkta (5 ve 10±1 mm) dilimlenerek kurutulmuştur. Örneklerin kurutma öncesi ve sonrasındaki nem analizleri 105°C'de infrared nem tayin cihazı (HB43-S, Mettler Toledo, ABD) ile yapılmıştır.

Yöntem

Deneyleerde kullanılan laboratuvar ölçekli TK İNOKSAN A.Ş. firması tarafından özel olarak imal edilmiştir. Patlıcan örnekleri 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. MD kurutma işlemi öncesinde TK ile (80°C ve 2 m/s hava hızı) içerdikleri toplam su miktarının %25'i kalıncaya kadar bir ön-kurutmaya tabii tutulmuşlardır. Daha sonra örnekler MD fırında (General Electric, GMOM 25, ABD) 3 farklı güç seviyesinde (180, 450 ve 720 W) kurutulmuşlardır. Ürünlerde kütle değişimleri hassas terazi ile (ATX-224, Shimadzu, Japonya) 30 saniyede bir kaydedilmiştir. Tüm deneyler 2 tekerrürlü yapılmıştır.

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. Tutulan su miktarının kuru madde miktarına oranı ile hesaplanmıştır [4].

Difüzyon Katsayısı ve Aktivasyon Enerjisi

Difüzyon katsayılarının belirlenmesinde kullanılan matematiksel Eşitlik (1) 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 kalınlığıdır (m). Uzun kuruma süreleri için bu formül serilerin ilk terimler sadeleştirilmiş, doğal logaritmik dönüşümleri zamana karşı grafiğe geçirilmiş ve elde edilen doğrunun eğimi kullanılarak D_{eff} değerleri eşitlik (2) ile hesaplanmıştır. Bu denklemde K, doğrunun eğimini göstermektedir [7].

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

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

Difüzyon katsayısının değişimi Arrhenius tipi üssel bir fonksiyonla açıklanabilmektedir. Aktivasyon enerjileri, TK ile kurutulan örnekler için eşitlik (3), MD ile kurutulan örnekler için eşitlik (4) kullanılarak [8] hesaplanmıştır. Bu eşitliklerde, D_{eff}; Efektif difüzyon katsayısı (m²/s), D₀; Sonsuz sıcaklıktaki difüzyon katsayısı (m²/s), E_A; Aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R; Ünlversal gaz sabiti (kJ/mol.K), T; kurutma havası sıcaklığıdır (K), m; yaş ürün ağırlığı (g) ve P; MD gücüdür (W).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (3)$$

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_A m}{P}\right) \quad (4)$$

Matematiksel Modelleme

Gıda kurutma proseslerinde en çok kullanılan 13 model (Tablo 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), χ² (ki-kare) (Eşitlik 5 ve 6) ve R² (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, R²'nin ise bire yakın olması gerekmektedir [9]. Bu eşitliklerde, ANO_{tahmini}; tahmini ayrılabilir nem oranı, ANO_{deneysel}; deneysel ayrılabilir nem oranı, N; deneysel veri sayısı ve n; kullanılan modeldeki katsayı sayısıdır.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ANO_{\text{tahmini}} - ANO_{\text{deneysel}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (ANO_{\text{deneysel}} - ANO_{\text{tahmini}})^2}{N - n} \quad (6)$$

Tablo 1. Kullanılan matematiksel modeller

Model No	Model	Model Adı	Kaynak
1	ANO=exp(-kt)	Newton	[10]
2	ANO=exp(-kt ⁿ)	Page	[11]
3	ANO=exp[-(-kt) ⁿ]	Geliştirilmiş Page I	[12]
4	ANO=exp[-(kt) ⁿ]	Geliştirilmiş Page II	[13]
5	ANO=a exp(-kt)	Henderson ve Pabis	[14]
6	ANO=a exp(-kt)+c	Logaritmik	[15]
7	ANO=a exp(-k ₀ t)+b exp(-k ₁ t)	İki terimli	[16]
8	ANO=a exp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	İki terimli eksponansiyel	[17]
9	ANO= 1+at+bt ²	Wang & Sing	[18]
10	ANO= a exp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	Difüzyon yaklaşım	[19]
11	ANO= a exp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	Verma ve ark.	[20]
12	ANO= a exp(-kt)+b exp(-gt)+c exp(-ht)	Geliştirilmiş Henderson ve Pabis	[21]
13	ANO= a exp(-kt ⁿ)+bt	Midilli ve ark.	[22]

Kurutma Hızının Hesaplanması

Kurutma hızı eşitlik (7) kullanılarak tüm örnekler için hesaplanmıştır [23]. Bu eşitlikte, $\Delta M/\Delta t$; kurutma hızı (kg su/kg km.dk), M; belli bir "t" anındaki nem içeriği ve t, Δt ; zamandır (dakika).

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_{t+\Delta t} - M}{\Delta t} \quad (7)$$

İstatistiksel Analizler

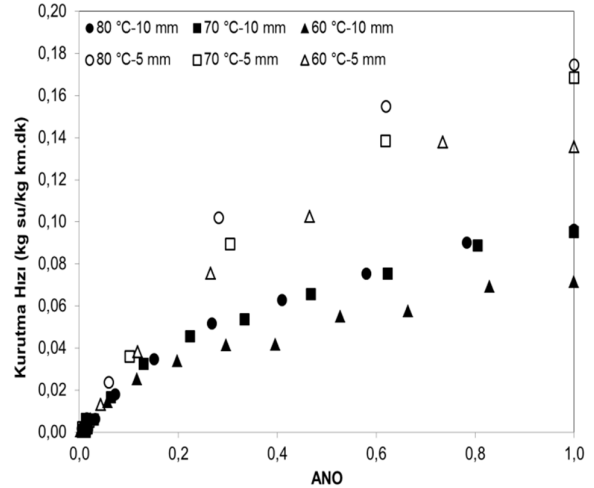
Bulgularla ilgili istatistiksel analizler MINITAB 15.1.1.0 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sonucu, istatistiksel açıdan önemli bulunan değerler Tukey testi ile $P \leq 0.05$ önem derecesine göre belirlenmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Kurutma Hızı ve Nem Oranı

Patlıcan örnekleri başlangıçta ortalama 13 kg su/kg kuru madde nem içeriğinden, 0.1 kg su/kg kuru madde nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Bulgular incelendiğinde kurutma sıcaklığının ve ürün kalınlığının kurutma hızı üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Farklı patlıcan örneklerinin ANO ile değişen kurutma hızı grafikleri Şekil 1'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere sabit hızda kuruma görülmemekte ve tüm kurutma işlemi azalan hız periyodunda gerçekleşmektedir. Bu da, kurutmayı sadece örnek içerisindeki difüzyonun etkilediğini göstermektedir. Azalan hız periyodunda, ürün içerisindeki nem oranının azalmasıyla kurutma hızı azalmaktadır. Dilim kalınlığı yarıya düşürüldüğünde kurutma hızı yaklaşık olarak iki kat artmıştır. Ürün kalınlığının azalması, suyun difüzyonla yol alacağı mesafeyi azaltır ve birim hacim başına kurumaya maruz kalan yüzey alanını artırır. Bu sebeple ince dilimlenmiş gıda ürünleri daha çabuk kururlar [4].

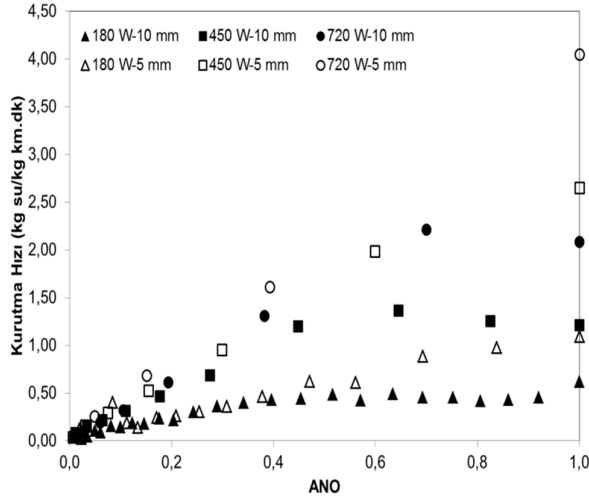
Benzer çalışmalar araştırmacılar tarafından farklı materyallerle de denenmiş ve sonuçta kurutma hızının nem içeriği ile azalan bir eğilim gösterdiği bulunmuştur [24, 25].



Şekil 1. TK ile kurutulmuş örneklerde ANO ile değişen kurutma hızı

MD ile kurutulan patlıcan örnekleri başlangıçta ortalama 3.47 kg su/kg kuru madde nem içeriğinden, 0.03 kg su/kg kuru madde nem içeriğine kadar kurutulmuştur. TK ile kurutulan örneklere benzer şekilde, MD gücünün ve ürün kalınlığının kurutma hızı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Farklı patlıcan örneklerinin ANO ile değişen kurutma hızı grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Örnekler beklenildiği gibi azalan hız periyodunda kurumaktadırlar. Yüksek MD güçlerinde örneklerin daha hızlı kuruduğu, ancak örneklerin kalınlığı arttıkça kurutma hızının azaldığı bulunmuştur. TK ile kurutulan örneklerde olduğu gibi, dilim kalınlığı iki katına çıkarıldığında, kurutma hızı yaklaşık olarak yarı yarıya düşmüştür. Benzer sonuçlar muz dilimlerinin MD ile kurutulması çalışmasında da rapor edilmiştir [26]. Bu çalışmada muz dilim kalınlığı 4.3 mm'den 14 mm'ye

arttırıldığında, kurutma hızının yaklaşık iki kat düşmüş olduğu rapor edilmiştir. Havuç dilimlerinin kalınlığının 3 mm'den 7 mm'ye çıkarılmasının, kurutma hızını ortalama %32 oranında azalttığı belirtilmiştir [5].



Şekil 2. MD ile kurutulan örneklerde ANO ile değişen kurutma hızı

TK ve MD ile iki aşamalı yapılan kurutmanın, sadece TK kullanılarak gerçekleştirilen kurutmaya göre süreyi %55-62 oranında azalttığı görülmüştür. Kurutma süresinin yarıdan fazla azaltılabilmesi endüstriyel anlamda büyük bir maddi kazanç sağlayabilir. Buna ek olarak, düşük MD güçlerinde dahi kurutma süresinin büyük ölçüde azaltılabilir olması, MD ile kurutma sırasındaki enerji sarfiyatının minimumda tutulabileceğini göstermektedir.

Matematiksel Modelleme

TK ile kurutulan örnekler için R^2 değerlerinin 0.97308-0.99976, χ^2 değerlerinin 0-0.01275 ve RMSE değerlerinin 0.00008-0.07613 aralığında olduğu

bulunmuştur. Sonuçlar irdelendiğinde, iki farklı modelin deneysel verilere iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir. Buna göre; 5 mm dilim kalınlığındaki örnekler için en iyi uyum Midilli ve ark. modelinde saptanmıştır. 10 mm dilim kalınlığındaki örnekler için ise en uygun modelin Wang & Sing olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar, patlıcan örneklerinin farklı sıcaklıklarda (30-70°C) ve farklı kalınlıklarda (0.635-2.54cm) kurutulması çalışmasında da görülmüş ve en uygun modelin Midilli ve ark. olduğu rapor edilmiştir [4]. Başka bir çalışmada 11 farklı modelden patlıcan kurutma verilerine en uygun modellerin farklı deney koşullarında Logaritmik, Wang & Sing ve Midilli olduğunu belirtilmiştir [25]. MD ile kurutulan örnekleri için ise R^2 değerlerinin 0.96391-0.99999, χ^2 değerlerinin 0-0.00493 ve RMSE değerlerinin 0.00008-0.06065 aralığında olduğu bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, birden fazla modelin deneysel verilere iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir. Buna göre, 5 mm dilim kalınlığındaki örnekler için en iyi uyum, 180 ve 720 W gücünde işlem gören ürünlerde Midilli ve ark., 450 W gücünde kurutulan örneklerde ise Page modelinde saptanmıştır. Benzer şekilde, 10 mm dilim kalınlığındaki örnekler için en uygun modelin 180 ve 450 W gücünde işlem gören ürünlerde Midilli ve ark., 720 W gücünde kurutulan örneklerde ise İki Terimli Ekspansiyonel modeli olduğu söylenebilir. Elma posasını 150-600 W MD güçlerinde kurutulduğu bir çalışmada, deneysel veriler 10 modele uyarlanmış ve en iyi uyumu Page modelinde saptanmıştır [7]. Ispanak yapraklarını 180-900 W MD güçlerinde kurutulduğu bir çalışmada ise deneysel veriler 11 modele uyarlanmış ve en iyi uyum gösteren model Midilli ve ark. olarak rapor edilmiştir [23]. Tüm modellerdeki katsayılar SigmaPlot 11.0 (Systat Software Inc., ABD) programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon analizi ile hesaplanmıştır. Modellerde yer alan katsayılar (a, k, n ve b), farklı koşullarda kurutulmuş patlıcan örnekleri için Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kurutulmuş patlıcan örnekleri için kullanılan modellerinin istatistiksel parametreleri ve model katsayıları

Model No	Deney Koşulu	RMSE	χ^2	R^2	a	k	n	b
13	60°C-5 mm	0.00146	0.00001	0.9994	0.9957	0.002271	1.424	-0.0000108
13	70°C-5 mm	0.00249	0.00001	0.9993	0.9978	0.003658	1.424	-0.0000037
13	80°C-5 mm	0.00422	0.00005	0.9987	0.9979	0.002564	1.526	-0.0000773
9	60°C-10 mm	0.00143	0.00000	0.9998	-0.006150	-	-	0.00000941
9	70°C-10 mm	0.00322	0.00001	0.9996	-0.007014	-	-	0.00001231
9	80°C-10 mm	0.00008	0.00001	0.9991	-0.007951	-	-	0.00001577
13	180 W-5 mm	0.00072	0.00000	0.9989	1.0040	0.006720	0.9777	-0.0001437
2	450 W-5 mm	0.00034	0.00000	0.9997	-	0.009308	1.1830	-
13	720 W-5 mm	0.00194	0.00002	0.9999	1.0000	0.030760	1.0000	-0.0001318
13	180 W-10 mm	0.00338	0.00001	0.9989	0.9654	0.000234	1.4440	-0.0000366
13	450 W-10 mm	0.00139	0.00000	0.9993	0.9947	0.001240	1.4410	-0.0000163
8	720 W-10 mm	0.00753	0.00007	0.9997	1.9110	0.024320	-	-

Efektif Difüzyon Katsayısı ve Aktivasyon Enerjisi

TK ve MD ile kurutulan patlıcan örneklerinin efektif difüzyon katsayıları hesaplanmış olup, değerler Tablo 3'te verilmiştir. TK ile kurutulmuş olan patlıcan örneklerinin efektif difüzyon katsayıları $1.01-4.06 \times 10^{-9}$ m²/s arasında olduğu bulunmuştur. Sabit kalınlıkta,

efektif difüzyon katsayısı sıcaklık arttıkça bir artış göstermiştir. Bilindiği üzere, yüksek sıcaklıklarda su molekülleri daha hızlı hareket ederler ve bu da efektif difüzyonunun artmasına sebep olur. Ek olarak, D_{eff} değeri örnek kalınlığının karesi ile doğru orantılıdır (Eşitlik 2). Bu sebeple, kalınlığın artması da efektif difüzyon katsayısında bir artışa neden olmuştur. Yapılan

çalışmalarda, patlıcan örnekleri için (50-80°C sıcaklık) hesaplanan efektif difüzyon katsayıları $5.575-9.745 \times 10^{-10}$ m²/s olarak rapor edilmiştir [25]. Vişnenin kurutulması ile ilgili bir çalışmada efektif difüzyon katsayısının sıcaklıkla arttığı ve değerlerinin $1.429-12.16 \times 10^{-9}$ m²/s aralığında değiştiği bildirilmiştir [27]. MD ile kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayıları $1.75-21.66 \times 10^{-8}$ m²/s arasında olduğu bulunmuştur. TK ile karşılaştırıldığında efektif difüzyon katsayılarının MD fırında yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sabit kalınlıkta, efektif difüzyon katsayısı MD gücü arttıkça bir artış göstermiştir. Yüksek MD güçlerinde su molekülleri daha hızlı hareket ederler ve bu da efektif difüzyonun artmasına sebep olur. Burada da, kalınlığın artması efektif difüzyon katsayısında bir artışa neden olmuştur. Elma posası ile yapılan bir çalışmada, 150-600 W MD güçleri arasında efektif difüzyon katsayılarının $1.0465-3.6854 \times 10^{-8}$ m²/s aralığında değiştiğini rapor edilmiştir [7]. Patates dilimlerinin MD ile kurutulduğu başka bir çalışmada da efektif difüzyon katsayılarını 5-25 W/g aralığındaki güç yoğunluklarında $0.025-3.05 \times 10^{-8}$ m²/s arasında değiştiği görülmüştür [28].

Aktivasyon enerjisi (EA), efektif difüzyon katsayılarının doğal logaritması ($\ln(D_{eff})$), sıcaklığın tersine (1/T) karşı grafiğe geçirildiğinde elde edilen doğrunun eğiminden hesaplanabilir. TK ile kurutulan örneklerin aktivasyon enerjileri, 5 mm ve 10 mm kalınlığındaki patlıcan örnekleri için sırasıyla, 30.75 ve 29.27 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Patlıcan örnekleri ile yapılan bir çalışmada aktivasyon enerjisinin 0.5 ve 1 cm kalınlıklar için sırasıyla 20.12 ve 24.54 kJ/mol arasında olduğunu rapor edilmiştir [29]. MD ile kurutulan örneklerin aktivasyon enerjileri, 5 mm kalınlıktaki patlıcan örneklerinde 76.5 W/g, 10 mm kalınlıktaki örneklerde ise 25.4 W/g olarak bulunmuştur. Pırasa ile yapılan bir çalışmada, pırasanın beyaz kısmı için aktivasyon enerjisi 1.048 W/g, yeşil kısmı için ise 1.131 W/g olarak rapor edilmiştir [30]. Bu bulgular ile çalışmamızdaki aktivasyon enerjisi sonucu ile arasındaki farkın çok fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedenin, aktivasyon enerjisi bulunurken formüle yer alan (Eşitlik 4) yaş ürün miktarı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bahsi geçen çalışmada örnek miktarları oldukça yüksektir (25-300 g aralığında). Bizim çalışmamızda örnek miktarları, 5 mm kalınlıktaki patlıcan örnekleri için 6-7 g, 10 mm kalınlıktaki örnekler için ise 14-15 g'dır. Buna ek olarak, pırasa çalışmasında herhangi bir ön kurutma işlemi uygulanmadığı, direkt MD fırına alındığı görülmüştür. Ön-kurutma işleminin de aktivasyon enerjisinde değişikliğe sebep olabileceği düşünülmektedir.

Rehidrasyon Oranı

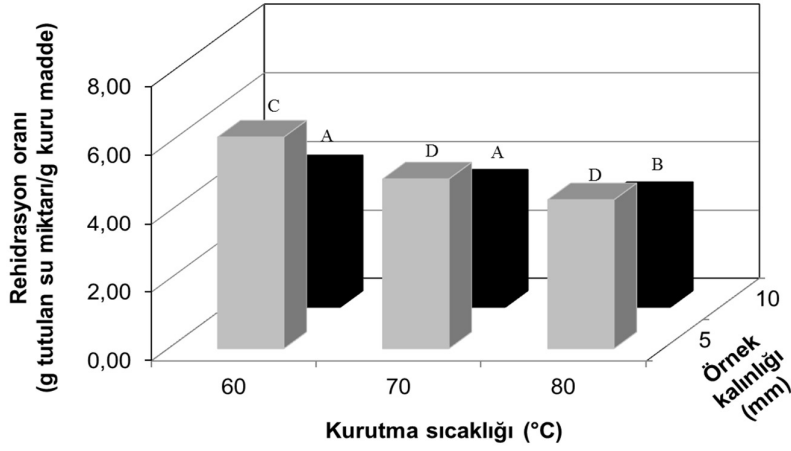
TK ile kurutulan 5 mm kalınlıktaki örneklerde en yüksek ve en düşük rehidrasyon oranları sırasıyla 6.18 ve 4.35 g tutulan su /g kuru madde iken, 10 mm kalınlıktaki örneklerde en yüksek 3.96 ve en düşük 3.19 g tutulan su/g kuru madde'dir. Sonuçlar incelendiğinde (Şekil 3), her iki kalınlık için en yüksek rehidrasyon oranı 60°C sıcaklıkta kurutulmuş patlıcan örneklerinde gözlemlenmiştir. Bu da düşük sıcaklıklarda yapısal ve hücrel bozulmaların minimum olduğunun bir

göstergesidir. Ek olarak, patlıcan örneklerinin yeniden su tutabilme kapasitelerinin kalınlıklarının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir (Tablo 3). İstatistiksel olarak incelendiğinde, 5 mm kalınlığındaki örneklerde 60°C'de elde edilen rehidrasyon sonuçlarının, diğer sıcaklıklardaki bulgulardan önemli ölçüde yüksek olduğu bulunmuştur ($P<0.05$).

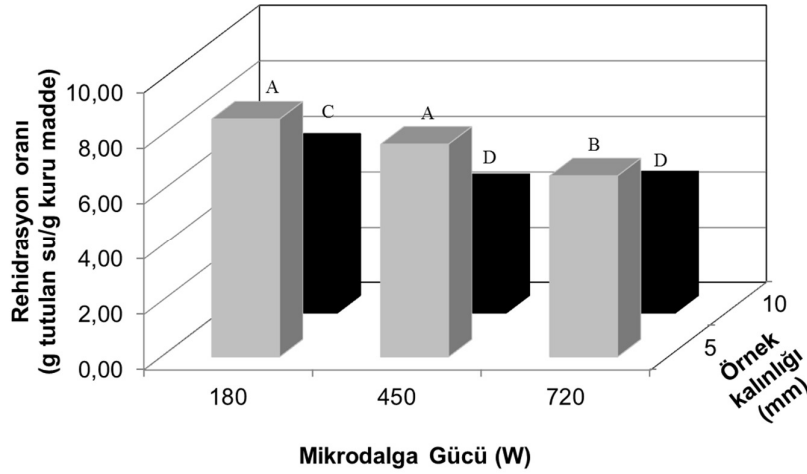
Tablo 3. Kurutulmuş patlıcan örneklerinin D_{eff} (m²/s) değerleri

Deney Koşulu	D_{eff} (m ² /s)
5 mm 60°C	1.01×10^{-9}
5 mm 70°C	1.42×10^{-9}
5 mm 80°C	1.90×10^{-9}
10 mm 60°C	2.23×10^{-9}
10 mm 70°C	3.14×10^{-9}
10 mm 80°C	4.06×10^{-9}
5 mm 180 W	1.75×10^{-8}
5 mm 450 W	6.23×10^{-8}
5 mm 720 W	10.28×10^{-8}
10 mm 180 W	4.92×10^{-8}
10 mm 450 W	15.54×10^{-8}
10 mm 720 W	21.66×10^{-8}

Ancak, 10 mm kalınlığındaki patlıcan örneklerinde, 60 ve 70°C'de tespit edilen rehidrasyon verilerinin arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Sabit sıcaklıkta ise dilim kalınlıkları arasındaki rehidrasyon oranı farkı, her örnek için istatistiksel olarak farklıdır ($P<0.05$). Yapılan bir çalışmada, patlıcan örnekleri farklı sıcaklıklarda (30-70°C) kurutulmuş ve maksimum rehidrasyon oranının 50°C'de kurutulan örneklerden elde edildiğini rapor edilmiştir [4]. MD ile kurutulan örnekler için ise, 5 mm kalınlıkta en yüksek ve en düşük rehidrasyon oranları sırasıyla 8.59 ve 6.54 g tutulan su/g kuru madde iken, 10 mm kalınlıkta en yüksek 5.85 ve en düşük 4.50 g tutulan su/g kuru madde'dir. Sonuçlar incelendiğinde (Şekil 4), her iki kalınlık için en yüksek rehidrasyon oranı 180 W MD gücünde kurutulmuş patlıcan örneklerinde gözlemlenmiştir. Bu da düşük MD güçlerinde yapısal ve hücrel bozulmaların minimum olduğunu göstermektedir. İstatistiksel olarak incelendiğinde, 5 mm kalınlığında ve 720 W MD gücünde kurutulan örneklerden elde edilen rehidrasyon sonuçlarının, diğer MD güçlerindeki bulgulardan önemli ölçüde düşük olduğu bulunmuştur ($P<0.05$). 10 mm kalınlığındaki patlıcan örneklerinde ise, 180 W MD gücünde tespit edilen rehidrasyon oranı verilerinin diğer MD güçlerindeki bulgulardan önemli ölçüde yüksek olduğu bulunmuştur ($P<0.05$). Ek olarak, TK ile kurutulan örneklerde olduğu gibi MD ile kurutulan örneklerde de yeniden su tutabilme kapasitelerinin kalınlıklarının artmasıyla istatistiksel olarak önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5 ve 9 mm kalınlığında kesilen havuç örnekleri ile yapılan bir çalışmada rehidrasyon oranlarının kalınlık arttıkça bir düşüş olduğu belirtilmiştir [5]. TK ve MD ile kurutulan patlıcan örneklerinin rehidrasyon oranları karşılaştırıldığında ise, MD ile kurutulan örneklerin yeniden su tutabilme özelliklerinin belirgin bir şekilde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulguya dayanarak, MD kurutulmuş gıda ürünlerinin kalitesini olumlu yönde etkilediğini söylemek mümkündür.



Şekil 3. TK ile kurutulan örneklerin farklı koşullardaki rehidrasyon oranları



Şekil 4. MD ile kurutulan örneklerin farklı koşullardaki rehidrasyon oranları

SONUÇLAR

TK ile yapılan deneylerde sıcaklık arttıkça, kuruma hızının arttığı ve bu sebeple kurutma süresinin düştüğü gözlemlenmiştir. Çalışılan tüm ürünlerde en yüksek kurutma sıcaklığında (80°C), kurutma hızının en yüksek olduğu tespit edilmiştir. MD ile kurutulan ürünlerde ise MD gücünün artması ile kurutma hızı artmış ve kurutma süresi azalmıştır. MD fırının kullanılması, TK yöntemine göre kurutma süresini, yaklaşık %60 oranında azaltmıştır. Her bir ürün için, deneysel nem oranı verilerine en iyi uyumu sağlayan matematiksel modeller belirlenmiştir. Bir ürünün farklı koşullarda kurutulmasının dahi model uyumluluklarında farklılıklara sebep olduğu görülmüştür. Efektif difüzyon katsayıları TK ile kurutulan örneklerde artan sıcaklıkla, MD kurutmada ise artan MD gücüyle bir artış göstermiştir. Buna göre, tüm ürünlerde efektif difüzyon katsayıları 10^{-9} ile 10^{-8} m²/s arasında değiştiği bulunmuştur. MD ile kurutulan örneklerin efektif difüzyon katsayıları, TK ile kurutulan örneklerden yaklaşık 10 kat daha yüksektir. TK ile kurutulan örneklerin rehidrasyon oranları MD ile kurutulanlara göre

daha düşük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bütün bu karakteristiklere genel olarak bakıldığında, en kaliteli ve en hızlı kurutmanın sağlanmasının, o ürünün yapısına bağlı olduğu görülmüştür. 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 tarihi: 17 Temmuz 2015).
- [2] Ulusal Gıda Kompozisyonları Veri Tabanı <http://http://www.turkomp.gov.tr/> (Erişim tarihi: 17 Kasım 2015).

- [3] Baysal, T., İçier, F., 2015. Gıda Mühendisliğine Giriş. Bölüm 12: Kurutma. Yayın no:1246, ISBN: 978-605-320-151-9, Nobel Yayıncılık, Ankara, 859p.
- [4] Ertekin, C., Yaldiz, O., 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering* 63: 349-359.
- [5] Wang, J., Xi, Y.S., 2005. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering* 68: 505-511.
- [6] Singh, S., Gaikwad, K., More, P.K., Kumbhar, B.K., 2013. Microwave convection drying characteristics of beet root (*Beta vulgaris L.*) using modeling equations for drying. *Journal of Food Processing Technology* 4:1-4.
- [7] Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., Hu, X., 2007. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering* 80: 536-544.
- [8] Dadalı, G., Apar, D.K., Özbek, B., 2007. Microwave Drying Kinetics of Okra. *Drying Technology* 25: 917-924.
- [9] Pangavhane, D.R., Sawhney, P.N., Sarsavadia, P.N., 1999. Effect of various dipping pretreatments on drying kinetics of Thompson seedless grapes. *Journal of Food Engineering* 39: 211-216.
- [10] Ayensu, A., 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4-6): 121-126.
- [11] Sarsavadia, P., Sawhney, R., Pangavhane, D.R., Sing, I., 1999. Drying behavior of brined onion slices. *Journal of Food Engineering* 40: 219-226.
- [12] Yaldız, O., Ertekin, C., Uzun, H.I., 2000. Çekirdeksiz Üzümün İnce Tabaka Halinde Güneş Enerji ile Kurutulmasının Matematiksel Modellemesi Üzerinde Bir Araştırma. 19. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi Bildiri Kitabı, 1-2 Haziran, Erzurum, 345-350 s.
- [13] Yaldız, O., Ertekin, C., 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology* 19: 583-597.
- [14] Bengston, G., Rahman, M.S., Stanley, R., Perera, C.O., 1998. Effect Specific Pretreatment on the Drying Behavior of Apple Rings. New Zeland Inst. of Food Science and New Zeland Conference, Nelson, 10s.
- [15] Yağcıoğlu, A., Değirmencioğlu, A., Çağatay, F., 1999. Drying Characteristics of Laurel Leaves under Different Drying Condition. 7th Int. Congress on Agricultural Mechanization and Energy, 26-27 Mayıs, Adana, 565-569.
- [16] Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A., 1996. Thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering* 29: 75-97.
- [17] Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y., 1980. A model for ear corn. *Drying Technology ASAE* 23: 1261-1271.
- [18] Wang, C.Y., Sing, R.P., 1978. A Single Layer Drying Equation for Rough Rice. Am. Soc. Agr. Eng, St. Joseph, MI, 78, 3001.
- [19] Kassem, A.S., 1998. Comparative Studies on Thin Layer Drying Models for Wheat. 13th Int. Congress on Agriculture Mechanization and Energy, 2-6 Feb, Morocco.
- [20] Verma, L.R., Bucklin, J.B., Endan, F., Wratten, T., 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Technology ASAE* 28: 296-301.
- [21] Karathanos, V.T., 1999. Determination on water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 39: 337-344.
- [22] Midilli, A., Küçük, H., Yapar, Z., 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technology* 20: 1503-1513.
- [23] Karaaslan, S.N., 2008. Sebze ve Endüstri Bitkilerinin Mikrodalgayla Kurutulması Üzerine Çalışmalar. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Adana, Türkiye, 195 s.
- [24] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Beygi, S.R.H., 2010. Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus L.*). *Journal of Food Processing and Preservation* 34: 351-365.
- [25] Doymaz, İ., 2011. Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation* 35: 280-289.
- [26] Maskan, M., 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44: 71-78.
- [27] Mengeş, H.O., Ertekin, C., 2007. Vişne kurutmada kurutmanın çeşitli modellerle açıklanması. *Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 21: 4-10.
- [28] Darvishi, H., 2012. Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices. *Agric Eng Int: CIGR* 14(1): 94-102.
- [29] Doymaz, İ., Göl, E., 2011. Convective drying characteristics of eggplants slices. *Journal of Food Process Engineering* 34: 1234-1252.
- [30] Dadalı, G., Özbek, B., 2008. Microwave heat treatment of leek: drying kinetics and effective moisture diffusivity. *International Journal of Food Science and Technology* 43: 1443-1451.