



Drying of Fig with Microwave and Hot Air Assisted Foam-Mat Drying Method

Mehmet Koç^{1*}, Feyza Elmas², Emine Varhan³

^{1*}Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Aydın Adnan Menderes University, 09010 Aydın, Turkey
Corresponding author, E-mail: mehmet197@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-7640>

²Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Aydın Adnan Menderes University, 09010 Aydın, Turkey
E-mail: feyza.elmas35@gmail.com

³Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Aydın Adnan Menderes University, 09010 Aydın, Turkey
E-mail: eminevarhan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3246-928X>

ARTICLE INFO

Research Article

Received : 12/10/2018
Accepted : 19/12/2018

Keywords:

Fig
Foam drying
Hot air drying
Microwave drying
Drying kinetics
Modelling

ABSTRACT

In this study, the drying process of fig foam was carried out with hot air (60, 70, 80°C) and microwave (100, 300, 600 W) and the effect of drying process parameters and foam thickness on drying kinetics was investigated. The drying process was carried out only falling drying rate period and no constant drying rate period was observed. The drying times of the microwave drying were lower than the drying times of hot air drying due to the volumetric heating in addition to the large evaporation area on the foam surfaces. Drying times were shortened by increasing the temperature and microwave power whereas drying time increased with increasing foam thickness. Experimental drying data were placed in semi-empirical models of the 2. Fick's diffusion equation to determine kinetic parameters. Among them, it was found that Wang and Singh and Logarithmic models were better fitted for microwave and hot air drying respectively. The effective diffusion coefficient values for microwave and hot air drying varied between 9.94×10^{-10} - 405.69×10^{-10} , 13.26×10^{-10} - $26.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Effective diffusion coefficient values increased with increasing temperature, microwave power and foam thickness. High thickness supported the diffusion process by convection of heat due to the increase in gaps in the structure. Activation energy which calculated with Arrhenius equation was varied from 2.195-2.379 $\text{W} \cdot \text{g}^{-1}$ for microwave drying and 12.952-21.426 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ for hot air drying.

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi 7(2): 291-300, 2019

İncirin Sıcak Hava ve Mikrodalga Destekli Köpük Kurutma Yöntemi ile Kurutulması

MAKALE BİLGİSİ

Araştırma Makalesi

Geliş : 12/10/2018
Kabul : 19/12/2018

Anahtar Kelimeler:

İncir
Köpük kurutma
Sıcak hava kurutma
Mikrodalga kurutma
Kurutma kinetiği
Modelleme

ÖZ

Bu çalışmada, köpük kurutma yöntemi kullanılarak incirin sıcak hava (60, 70, 80°C) ve mikrodalga (100, 300, 600 W) ile kurutma işlemi gerçekleştirilmiş, kurutma işlem parametrelerinin ve köpük kalınlığının kurutma kinetiğine etkisi incelenmiştir. Kurutma işlemi yalnızca düşen kurutma periyodunda gerçekleşmiş ve sabit kurutma periyodu gözlenmemiştir. Mikrodalga ile kurutma, köpük yüzeylerindeki büyük buharlaşma alanına ek olarak hacimsel ısıtma sağlaması nedeniyle sıcak hava ile kurutmaya kıyasla daha kısa sürede tamamlanmıştır. Sıcaklığın ve mikrodalga gücünün artması kuruma sürelerini kısaltırken, köpük kalınlığının artması ile kuruma süreleri uzamıştır. Kinetik parametreleri belirlemek için, deneysel kurutma verileri Fick'in 2. difüzyon denkleminin yarı deneysel modellerine yerleştirilmiştir. Bunlar arasında, Wang ve Singh modeli mikrodalga kurutma için daha iyi bir uyum sağlarken, Logaritmik model sıcak hava ile kurutma için daha uygun bulunmuştur. Mikrodalga ve sıcak hava kurutma için etkili difüzyon katsayısı değerleri sırasıyla 9.94×10^{-10} - 405.69×10^{-10} ve 13.26×10^{-10} - $26.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ aralığında değişim göstermiştir. Kurutma sıcaklığı, mikrodalga gücü ve köpük kalınlığının artmasıyla etkili difüzyon katsayısı değerleri artmıştır. Kalınlığın artması yapıdaki boşlukların artmasını ve ısı iletiminin konveksiyonla gerçekleşmesini sağlayarak etkili difüzyon yayılımının desteklenmesini sağlamıştır. Aktivasyon enerjisi Arrhenius denklemi kullanılarak mikrodalga kurutma için 2,195-2,379 $\text{W} \cdot \text{g}^{-1}$ aralığında, sıcak hava ile kurutma için ise 12,952-21,426 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ aralığında bulunmuştur.



Giriş

Akdeniz diyetinin önemli bir parçasını oluşturan incir, sağlıklı ve uzun yaşamın simgesi olarak nitelendirilmektedir (Trichopoulou ve ark., 2006). İncir diğer birçok meyve ile karşılaştırıldığında yüksek besin içeriğine sahiptir. Ancak, yüksek nem ve şeker içeriğine sahip incir, mikrobiyal bozulmaya karşı oldukça hassas olması nedeni ile soğuk depolama koşullarında bile düşük raf ömrüne sahiptir. Bu nedenle, genellikle kurutularak tüketime sunulmaktadır (Farahnaky ve ark., 2009).

Kurutma, biyokimyasal, kimyasal ve mikrobiyolojik bozulmayı en aza indirmek için üründen suyun uzaklaştırılmasına dayanan bir koruma yöntemidir. Kurutma işlemi, meyvelerin raf ömrünü arttırsa da, askorbik asit, fenolik bileşikler ve karotenoidler gibi biyoaktif bileşiklerin stabilitesi, renk, tat ve doku dahil olmak üzere gıdaların kalite özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Sagar ve Kumar, 2010; Kandasamy ve ark., 2012; Sonawane ve Arya, 2015). Bu nedenle, biyoaktif bileşikleri muhafaza eden veya bu maddelerin kaybını en aza indiren alternatif kurutma yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Köpük kurutma yöntemi, kurutulacak olan ürünün köpürtme ajanları eklenerek düşük yoğunluğa sahip köpüğün kurutulması prensibine dayanmaktadır. Elde edilen köpük ince bir tabaka halinde toz ürün elde edilene kadar kurutulmaktadır (Silva ve ark., 2008; Sangamithra ve ark., 2015).

Köpüğün gözenekli yapısı ve kurutma havasına maruz kalan geniş yüzey alanı, kurutma işleminin kütle transfer oranlarını arttırmakta böylece daha kısa bir dehidrasyon süresine ve daha yüksek kalitede nihai ürüne yol açmaktadır. Ayrıca, bu yöntem ile kullanılan kurutma sıcaklığının geleneksel kurutma yöntemlerinden daha düşük olması, lezzet ve uçucu bileşenlerin kaybının azaltılması sağlanabilmektedir. Bunun yanı sıra köpük kurutma yöntemi, mikrobiyal, kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlara karşı yüksek stabilite, düşük taşıma, paketlenme ve nakliye maliyetleri, depolama sırasında göz ardı edilebilir enerji gereksinimlerinin azaltılması yönünden daha birçok avantaj sağlamaktadır. Köpük kurutma yönteminin gıda işleme uygulanmasındaki ana zorluk ise köpüğün stabilitesini korumaktır. Köpüğün sönməsi, daha düşük bir kurutma hızına neden olmakta böylece son ürün kalitesini düşürmektedir. Köpük stabilitesi, çözünebilir katı içeriği, köpürtme ajanının türü ve konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlerle ilgilidir (Karim ve Wai, 1999). Köpük kurutma, ilk olarak Rao ve ark. (1987) tarafından bütün yumurtanın kurutulması için kullanılmıştır. Çalışmada, dondurarak kurutma yöntemi köpük kurutma yöntemi ile karşılaştırılmış ve köpük kurutma işleminin daha yüksek kalitede ürün sunduğu sonucuna varılmıştır. Köpük kurutma bunun yanı sıra, domates posası (Kadam ve Balasubramanian, 2011), mango (Rajkumar ve ark., 2007), soya sütü (Akintoye ve Oguntunde, 1991), yıldız meyvesi (Karim ve Wai, 1999), börülce (Falade ve ark., 2003), muz (Thuwapanichayanan ve ark., 2008) ve yoğurt (Krasaekoopt ve Bhatia, 2012) gibi farklı ürünlerde de uygulanmıştır.

Kurutma, ısı ve kütle transferinin eşzamanlı olarak gerçekleştiği enerji yoğun bir işlemdir (Ratti, 2001). Gıdaların kurutma kinetiği, sonuçların tahmin edilmesi ve

parametrelerinin optimizasyonu için basitleştirmeler gerektiren karmaşık bir olgudur (Karathanos ve Belessiotis, 1999). Yeni sistemlerin tasarlanması, mevcut olanların iyileştirilmesi ve proses kontrolü için matematiksel modellerin ve kurutma kinetiğinin tanımlanması gerekmektedir. Modellemeler, modelin geliştirilmesinde kullanılan yaklaşıma dayanarak kuramsal, ampirik ve yarı-ampirik olarak sınıflandırılabilir. Kurutma süreleri, ısı transfer oranı, etkili difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi gibi kurutma parametrelerini belirlemek için ısı ve kütle transfer modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Literatürdeki köpük kurutma modelleme çalışmaları incelendiğinde, kullanılan kurutucu parametrelerinin veya köpük kalınlığının kurutma kinetiğine etkisinin ve yarı deneysel modellerin uygunluğunun incelendiği görülmektedir.

Dattatreya ve Balasubramanian (2011) köpük kurutma yöntemini kullanarak domates tozu üretiminde kurutucu hava sıcaklığının ve köpürtme ajanının (yumurta albümini) etkisini belirlemek için deneyler yapmıştır. 60, 65 ve 70°C sıcaklıklarda kurutulmuş domates suyunun kuruma süreleri sırasıyla 510, 450 ve 420 dakika olarak elde edilmiş ve kurutucu hava sıcaklığındaki 5°C'lik artış ile kurutma sürelerinde neredeyse 30 dakika azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Branco ve ark. (2016), uvaia ile oluşturdukları köpük formülasyonunun 60 ve 70°C de sıcak hava ile kurutma özelliklerini incelemek için araştırmalar yapmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, kurutma, her iki sıcaklıkta da sadece düşen kuruma periyodunda gerçekleşmiştir. Ayrıca, Page modelinin köpüğün kurutulmasını en iyi şekilde tanımladığını belirtmişler ve yüksek sıcaklıkların kuruma süresini kısaltarak etkili difüzyonu arttırdığını vurgulamışlardır.

Yacon suyu ve konsantre yacon suyunun köpük kurutulmasında çeşitli ürün kalınlıkları (0,5, 1,0 ve 1,5 cm) ve kurutucu hava sıcaklıklarının (50, 60 ve 70°C) etkisinin incelendiği bir çalışmada ise Franco ve ark., (2015) artan kalınlık ile ürünün yüzeyine ulaşmak için daha uzun yol gerekmesi nedeniyle etkili difüzyonun azaldığını belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, çalışmada, daha yüksek sıcaklıklar uygulandığında kurutma süresinin kıaldığı, hava ve köpük arasındaki daha büyük sıcaklık gradyanı nedeniyle kurutma oranının arttığı belirtilmiştir.

Khamjae ve Rojanakorn (2016) aril meyvesinin köpük kurutma koşullarının kurutulmuş ürünün etkili difüzyon katsayısı, fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve antioksidan özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar aril köpüğünün kurutulmasının düşen kuruma periyodunda gerçekleştiğini ve etkili difüzyon katsayısının artan sıcaklık ve köpük kalınlığı ile arttığını göstermiştir. Elde edilen etkili difüzyon katsayısı değerleri $1,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ile $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ arasında değişim göstermiştir.

Ayrıca, bahsedilen çalışmalar dışında, köpük kurutma kinetiği çalışması, karides (Azizpour ve ark., 2014), domates posası (Fernandes ve ark., 2013) ve ananas (Wilson ve ark., 2012) gibi gıdalar için de gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, incir, köpük kurutma yöntemi uygulanarak sıcak hava ve mikrodalga ile farklı sıcaklık,

güç ve kalınlıklarda kurutulmuştur. Çalışmanın amacı, incirin köpük kurutma kinetiğinin farklı kurutma değişkenleri ve köpük kalınlıkları için belirlenmesi, etkili difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisine olan etkisinin incelenmesidir. Ayrıca çalışma kapsamında, yarı deneysel modellerin uygunluğu da incelenmiştir.

Materyal ve Metot

Köpük Hazırlama

Çalışma kapsamında, üniform renk ve boyuta sahip sert ve kuru incirler yerel bir firmadan temin edilmiştir. Belirlenen sabit kuru madde içeriğine (%30) göre incirler bir miktar su ile yumuşatılıp, daha sonra homojen bir karışım elde etmek için 5 dakika boyunca parçalayıcıda (Arçelik K1260, Türkiye) karıştırılmıştır. Köpürtme ajanı olarak sıvı yumurta akı, asgari hızda 2 dakika boyunca ev tipi mikser (Arçelik K1260, Türkiye) kullanılarak köpük elde edilene kadar çırpılmıştır. Kurutma katkı maddesi olarak Maltodekstrin (MD) ve köpük stabilizatörü olarak karboksilmetil selüloz (CMC), hazırlanan köpüğe ilave edilerek 15 saniye boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen köpük ile incir, en az hızda çalışan ev tipi mikser altında 3 dakika homojenize edilerek incir köpüğü hazırlanmıştır.

Sıcak Hava Kurutma

Elde edilen incir köpüğü, 0,5, 0,7 ve 1,0 cm kalınlığında alüminyum plaka üzerine yayılmış ve daha sonra kontrollü sıcaklıklarda (60, 70 ve 80°C) ve sabit hava hızında (1,5 m·s⁻¹) tepsili kurutucuda (Eksis Makina, Türkiye) kurutulmuştur. Kurutma işlemi boyunca, köpük karışımını içeren plaka, düzenli aralıklarla (beş dakika) ± 0,01 g hassasiyete sahip elektronik terazide (Shimadzu BL-3200, Japonya) tartılmıştır. Kurutulmuş köpükler daha sonra kurutucudan çıkarılmış ve öğütücüde (Delonghi-KG79, İtalya) toz haline dönüştürülmüştür.

Mikrodalga Kurutma

Hazırlanan köpükler, 0,5, 0,7 ve 1,0 cm kalınlıktaki pişirme kağıdına yayılmış ve daha sonra farklı güçler (100, 300 ve 600 W) altında mikrodalga fırında (Arçelik, 9658 SYTI, Türkiye) kurutulmuştur. Nem kaybı, numunelerin her 2 dakikada bir ± 0,01 g hassasiyete sahip elektronik terazide (Shimadzu BL-3200, Japonya) tartılmasıyla belirlenmiştir. Kurutulmuş köpükler daha sonra kurutucudan çıkarılmış ve öğütücüde (Delonghi-KG79, İtalya) toz haline dönüştürülmüştür.

Matematik Modelleme ve Kurutma Kinetiği

Gıda maddelerinin kurutulması genellikle düşen kurutma periyodunda meydana gelmektedir. Difüzyon gıda maddelerinde nemin yüzeye taşınması sırasında ana mekanizma olarak kabul edilmektedir. Düşen kurutma periyodunda katıdan nem transferi, Fick denkleminin ikinci kanunu ile açıklanabilmektedir.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (1)$$

Denklemden, X, nem içeriği (kg su·kg kuru madde⁻¹), D_{eff} etkili difüzyon katsayısı (m²·s⁻¹), z difüzyon mesafesi (m) ve t zamandır.

Denklemi çözmek için (1), aşağıdaki başlangıç ve sınır koşulları kullanılır:

$$\text{Başlangıç koşulu : } t=0, \quad X=X_0 \quad 0 < z < L$$

$$\text{Sınır koşulu 1 : } t>0, \quad \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad z=0$$

$$\text{Sınır koşulu 2 : } t>0, \quad -D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial X}{\partial z} \right) = k_c (X_s - X_e) \quad z=L$$

X₀, başlangıçtaki nem içeriği, X_s ve X_e sırasıyla yüzey ve denge nem içeriği, k_c konvektif kütle transfer katsayısı (m·s⁻¹) ve L (m) slabın kalınlığıdır.

İnce tabaka kurutma deneyleri sırasında örneklerin boyutsuz nem oranı (MR) aşağıdaki denklem şeklinde ifade edilmektedir (2).

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2)$$

Gıdaların kurutma mekanizmasını tanımlayan matematiksel modeller, gerekli sıcaklık ve nem bilgisini sağlar. İnce tabaka kurutma modelleri kuramsal, ampirik ve yarı-ampirik modeller olarak kategorize edilebilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan bazı yarı ampirik kurutma modelleri Newton (3), Page (4), Henderson ve Pabis (5), Modifiye Page (6), Wang ve Singh (7), iki terimli (8) ve Logaritmik (9) şeklinde sunulmuştur. Bu modeller genellikle Fick'in ikinci yasasının genel seri çözümünü basitleştirerek elde edilir.

$$MR = \exp(-k \cdot t) \quad (3)$$

$$MR = \exp(-k \cdot t^n) \quad (4)$$

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (5)$$

$$MR = \exp(-k \cdot t)^n \quad (6)$$

$$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2 \quad (7)$$

$$MR = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (8)$$

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c \quad (9)$$

Burada, a, k, b, n, k₀, k₁, c model sabitleridir ve t zamandır.

Modellerin uyum kalitesini değerlendirmek için belirleme katsayısı (R²) birincil kriterlerden biridir. R²'ye ek olarak, modellerin uygunluğunu belirlemek için kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılır. R² ve RMSE değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$R^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{h,i} - MR_{d,i})^2}{(MR_{d,i} - MR_{h,i})^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (MR_{d,i} - MR_{h,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

MR_h hesaplanan (teorik) nem oranı ve MR_d deneysel nem oranı değerleridir.

Etkili Difüzyon Katsayısı ve Aktivasyon Enerjisi

Fick'in difüzyon denklemini, etkili nem yayılımının hesaplanması için kullanılmaktadır. Denklem aşağıdaki şekilde (Crank, 1975) ifade edilmektedir:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (12)$$

Denklem (12) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$D_{\text{eff}} = \frac{\ln MR - \ln \frac{8}{\pi^2}}{\left(\frac{\pi^2 t}{4L^2}\right)} \quad (13)$$

Eğim (k_0), farklı sıcaklıklardaki etkin yayılımı belirlemek için denklem (12) 'a göre $\ln (MR)$ 'ye karşı zaman (t) grafiği çizilerek hesaplanmaktadır.

$$k_0 = \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}\right) \quad (14)$$

Nemli bir ürünün kuruma özellikleri esas olarak nemin bağlanma potansiyeline bağlıdır. Aktivasyon enerjisinin değeri, nemli üründe nemin bağlanma potansiyelini gösteren bir parametredir. Aktivasyon enerjisi, verilen nem içeriği ve sabit bileşimlerle üründen 1 mol nem çıkarılırken yapılan iş olarak ifade edilir.

Etkili difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi kurutucu hava sıcaklığına ve mikrodalga gücüne bağlı olarak, aşağıda verilen Arrhenius denklemleri ile açıklanabilmektedir.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (15)$$

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{m E_a}{P}\right) \quad (16)$$

D_0 , Arrhenius denkleminin üstel katsayısı, E_a nem yayılımı için aktivasyon enerjisi ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), R evrensel gaz sabiti ($8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T_a mutlak sıcaklık (K), P mikrodalga gücü (W) ve m ham numunenin kütesidir (g).

Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneylerin modellenmesi ve tasarlanmasında kullanılan deneylerin doğruluğunu geliştirmenin bir yoludur (Koç ve ark., 2008). Kurutma deneylerindeki belirsizlikler genellikle ölçüm cihazlarının seçimi ve kalibrasyonu, çevresel koşullar, kişisel gözlem ve okumadan kaynaklanır. Herhangi bir ölçümün belirsizliği, aşağıda verilen genel eşitlik kullanılarak ifade edilebilir (Kaymak-Ertekin ve Gedik 2005):

$$U_Y = \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial z_1} \times u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial z_2} \times u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial z_n} \times u_n\right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

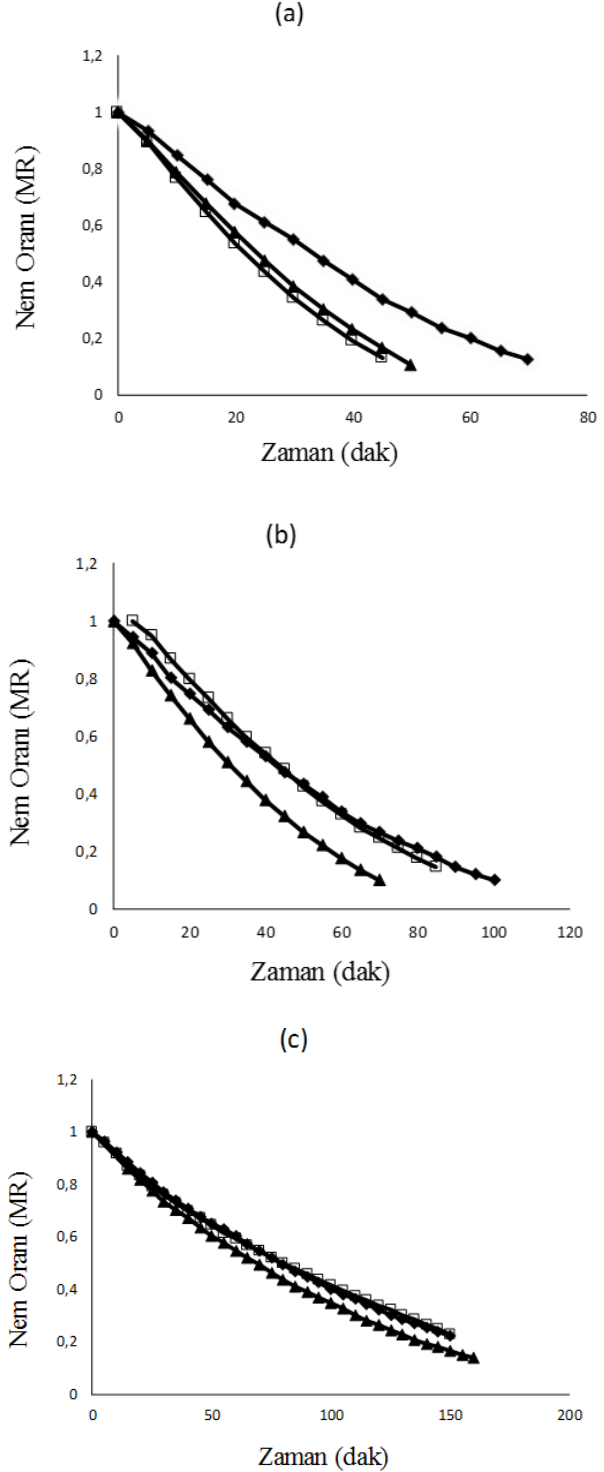
U_Y 'nin sonuçtaki belirsizlik olduğu yerde, u_1, u_2, \dots, u_n bağımsız değişkenlerdeki belirsizliktir; z_1, z_2, \dots, z_n bağımsız değişkenlerdir ve Y bağımlı değişkenlerin işlevidir.

Sonuç ve Tartışma

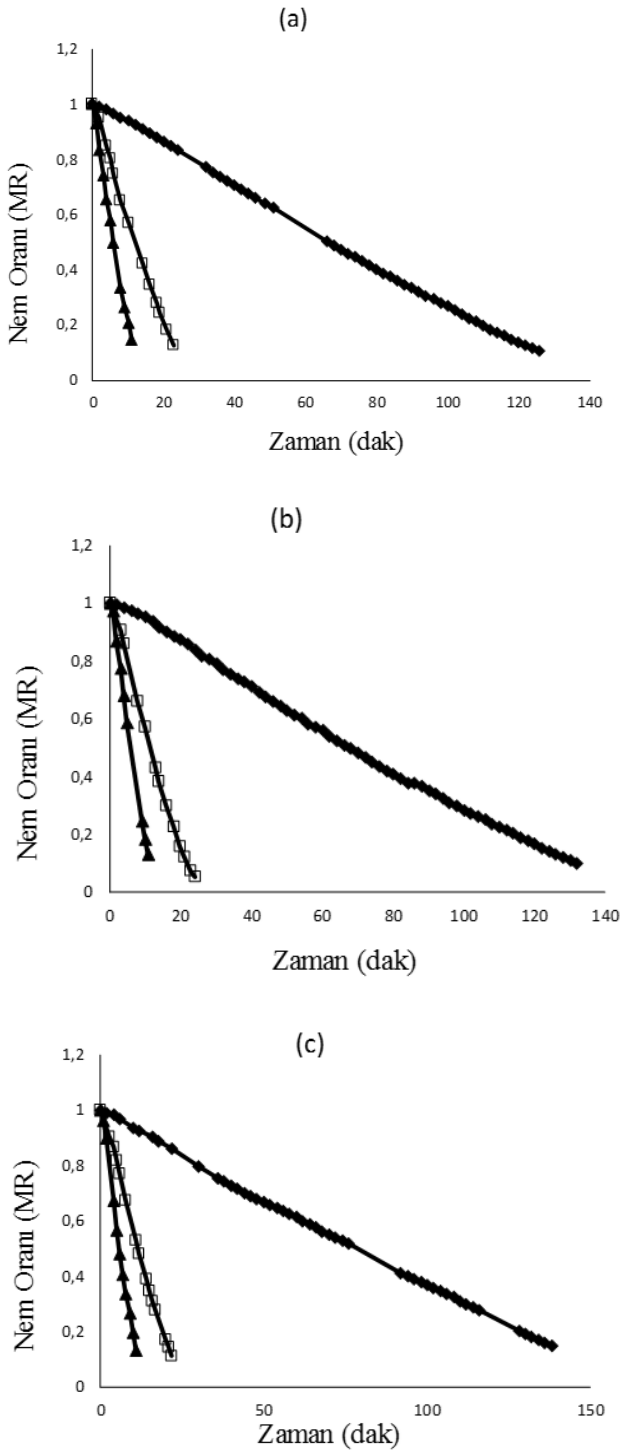
Kurutma Eğrilerinin Değerlendirilmesi

İncirin köpük yapı kazandırılarak sıcak hava ve mikrodalga ile kurutulmasındaki zamana bağlı nem oranındaki değişimler sırası ile Şekil 1 ve 2 de verilmiştir. Sonuçlar, kurutma işleminin yalnızca düşen kurutma periyodunda gerçekleştiğini ve sabit kurutma periyodunun gözlemlenmediğini göstermiştir. Bu durum kütle transferinin ana mekanizmasının difüzyon üzerinden gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Ürünün düşen kuruma periyodunda gerçekleşen su difüzyonu oranı artan

sıcaklık ve mikrodalga gücü ile artmış, bu da kurutma sırasında daha yüksek su uzaklaştırma oranına yol açmıştır. Bunun nedeni, kurutma sıcaklığı arttıkça, örnekteki nem basıncının önemli ölçüde artması olarak yorumlanmaktadır (Khamjae ve Rojanakorn, 2016). Benzer şekilde, mikrodalga gücünün artması, ürüne transfer edilen enerjiyi yükselterek, su difüzyon oranını artırmakta ve yüksek su uzaklaştırma oranı sağlamaktadır.



Şekil 1 İncir köpüğünün sıcak hava (60°C (\blacklozenge), 70°C (\square), 80°C (\blacktriangle)) ile kuruma eğrileri a) 0,5 cm b) 0,7 cm c) 1 cm
Figure 1 Drying curves of fig foam with hot air drying (60°C (\blacklozenge), 70°C (\square), 80°C (\blacktriangle)) a) 0,5 cm b) 0,7 cm c) 1 cm



Şekil 2 İncir köpüğünün mikrodalga (100 W (◆), 200 W (□), 300 W (▲)) ile kuruma eğrileri (a) 0,5 cm, (b) 0.7 cm, (c) 1 cm

Figure 2 Drying curves of fig foam with microwave drying (100 W (◆), 200 W (□), 300 W (▲)) (a) 0.5 cm, (b) 0.7 cm, (c) 1 cm

İncir köpüğünün kuruma özellikleri, kurutucu hava sıcaklığı ve mikrodalga gücüne göre değişim göstermektedir (Şekil 1 ve 2). Sıcak hava kurutma için, sıcaklığın artması kuruma süresi kısalmaktadır. Bu durum mikrodalga gücündeki artış için daha net bir şekilde gözlenmiştir. Mikrodalga gücünün artması, kuruma süresini oldukça düşürmüştür. Bunun nedeni, mikrodalga

kurutmada, su moleküllerinin enerjisi doğrudan emmesi ve iletmesi ile daha homojen bir ısı oluşumu sağlamasıdır (Baysal ve ark., 2003). Mikrodalga kurutmanın belirgin avantajlarından biri de köpük yüzeylerindeki büyük buharlaşma alanına ek olarak hacimsel ısıtmanın oluşmasıdır (Dev ve Raghavan, 2012). Mikrodalga kurutmanın, sıcak hava ile kurutma gibi geleneksel yöntemlerden, enerji tüketimi ve nihai ürünün kalitesi gibi yönlerden daha iyi sonuç verdiği literatürde belirtilmiştir. (Dev ve ark., 2008). Rao ve ark. (2007), sarımsak dilimlerinin kuruma sürelerinin, bir kabin kurutucuda 8 saatten iken bu sürelerin mikrodalga ile 0,25 saate düşürülebildiğini vurgulamıştır.

Genel olarak, her iki kurutma türü için de, ürüne köpük formunun kazandırılmış olması, ürün içi hava boşlukların artmasına bağlı olarak suyun yüzeye uzaklığını azaltarak serbest suymuş gibi uzaklaşmasını sağlamaktadır. Difüzyon mekanizmasını güçlendirecek şekilde gerçekleşen konveksiyon ile ısı iletimi kuruma oranını artırarak kuruma sürelerini ince tabaka kurutmaya göre daha fazla kısaltmaktadır. Aynı etki Azizpour ve ark. (2014) tarafından sıcaklığın, karideslerin köpük kurutulması üzerindeki etkilerinde de gözlenmiştir.

Köpük kalınlığındaki artış, transfer edilen nemin yüzeye olan uzaklığını arttırdığından kuruma sürelerini yükseltmiştir. Örneğin, 70°C kuruma sıcaklığı için 0,5 cm ürün kalınlığında kuruma süresi 50 dk. iken 0,7 cm için bu süre 90 dk. ve 1 cm için 150 dk. olarak bulunmuştur. Daha ince tabakalarda ısı transferi daha hızlı gerçekleşmiş ve ısı penetrasyonu daha kısa sürede nem dağılımını tetiklemiştir (Djaeni ve ark., 2015). Benzer davranışlar, Rajkumar ve ark., (2007) tarafından mango, Vernon-Carter ve ark. (2001) tarafından yumurta albümini ve Kandasamy ve ark. (2012) tarafından papaya suyu için kaydedilmiştir.

Kurutma Eğrilerinin Matematiksel Modellenmesi

Yarı-Ampirik Modellerin Değerlendirilmesi: Nem içeriği verileri, kurutma koşullarının incir köpüğünün kurutma özellikleri üzerindeki etkisini matematiksel olarak açıklamak için yarı deneysel modellere yerleştirilmiştir. Modellerin uygunluğunun belirlenmesi için R^2 ve RMSE değerlerine bağlı olarak (Denk. 3-9) doğrusal olmayan regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar farklı mikrodalga güçleri ve hava sıcaklıkları için sırası ile Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Köpük formülasyonunun sıcak hava ile kurutma davranışını açıklamak için tüm modeller uygunluk seviyesindedir. Fakat en uygun modelin, tüm sıcaklık ve kalınlıklar için en yüksek R^2 (> 0,996) ve en düşük RMSE (<0,033) değerleri göz önünde bulundurularak Logaritmik model olduğu görülmüştür. Logaritmik model a, c ve k sabitlerini içermektedir. Sabitlerin sıcaklık değişiminden etkilenmediği gözlenirken, a değeri ürün kalınlığındaki artışla azalmış, c ve k değeri ise kalınlıktan önemli ölçüde etkilenmemiştir. Franco ve ark. (2015) ya da sununun sıcak hava ile köpük kurutulması çalışmasında logaritmik modelin en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerini sunduğunu dolayısıyla test edilen koşullar altında kurutma işlemini daha iyi tanımladığını belirtmiştir. Ayrıca, logaritmik model, kayısıların (Doymaz, 2004) ve eriklerin kurutma sürecini de daha iyi tanımlayan model olarak seçilmiştir (Goyal ve ark., 2007).

Tablo 1 Mikrodalga ile incirin köpük kurutulmasında yarı ampirik modellerin doğrusal olmayan regresyon analizi sonuçları
 Table 1 Non-linear regression analysis results of semi-empirical models for microwave drying of fig foam

Güç	Kalınlık	Modeller	a	b	c	k	k ₀	k ₁	n	R ²	RMSE	
100 W	0,5cm	Newton				0,753				0,928	0,058	
		Page				0,614			1,631	0,994	0,087	
		Henderson ve Pabis	1,146			0,868				0,953	0,110	
		Modifiye Page				0,809			0,931	0,928	0,058	
		Wang ve Singh	-0,503	0,043				0,868	0,868	0,994	0,074	
		İki terimli	0,573	0,573						0,953	0,110	
	Logaritmik	1,944		-0,896	0,303				0,995	0,002		
	0,7cm	Newton				0,743					0,933	0,048
		Page				0,602			1,591	0,993	0,089	
		Henderson ve Pabis	1,145			0,854				0,957	0,112	
		Modifiye Page				1,234			0,602	0,933	0,048	
		Wang ve Singh	-0,499	0,046				0,854	0,854	0,996	0,071	
		İki terimli	0,573	0,573						0,957	0,112	
	Logaritmik	1,838		-0,792	0,318				0,998	0,000		
	1,0cm	Newton				0,653					0,933	0,039
		Page				0,498			1,563	0,989	0,099	
		Henderson ve Pabis	1,127			0,739				0,952	0,109	
		Modifiye Page				0,837			0,78	0,933	0,039	
Wang ve Singh		-0,436	0,033				0,739	0,739	0,997	0,053		
İki terimli		0,56	0,568						0,952	0,109		
Logaritmik	2,072		-1,047	0,231				0,997	0,010			
300 W	0,5cm	Newton				4,159				0,937	0,048	
		Page				8,704			1,533	0,994	0,077	
		Henderson ve Pabis	1,141			4,762				0,96	0,104	
		Modifiye Page				2,719			1,529	0,937	0,048	
		Wang ve Singh	-2,833	1,505				8,96	8,84	0,997	0,063	
		İki terimli	-74,754	75,728						0,99	0,075	
	Logaritmik	1,815		-0,774	1,807				0,998	0,019		
	0,7cm	Newton				4,494					0,918	0,027
		Page				11,451			1,657	0,995	0,082	
		Henderson ve Pabis	1,173			5,241				0,948	0,121	
		Modifiye Page				2,781			1,616	0,918	0,027	
		Wang ve Singh	-2,975	1,589				5,241	5,241	0,992	0,079	
		İki terimli	0,587	0,587						0,948	0,121	
	Logaritmik	1,834		-0,771	1,969				0,995	0,009		
	1,0cm	Newton				4,315					0,921	0,050
		Page				11,278			1,681	0,997	0,074	
		Henderson ve Pabis	1,175			5,059				0,952	0,118	
		Modifiye Page				1,269			3,401	0,921	0,050	
Wang ve Singh		-2,947	1,683				9,856	9,731	0,989	0,091		
İki terimli		-89,512	90,48						0,992	0,083		
Logaritmik	1,691		-0,613	-0,964				0,993	0,004			
600 W	0,5cm	Newton				8,507				0,947	0,022	
		Page				25,479			1,531	0,995	0,085	
		Henderson ve Pabis	1,101			9,373				0,961	0,111	
		Modifiye Page				2,495			3,41	0,947	0,022	
		Wang ve Singh	-5,869	7,156				17,762	17,972	0,997	0,062	
		İki terimli	84,795	-83,817						0,992	0,080	
	Logaritmik	1,698		-0,668	3,881				0,997	0,000		
	0,7cm	Newton				8,563					0,932	0,072
		Page				35,21			1,678	0,997	0,058	
		Henderson ve Pabis	1,132			9,707				0,955	0,109	
		Modifiye Page				3,456			2,478	0,932	0,072	
		Wang ve Singh	-5,577	5,038				9,708	9,707	0,991	0,088	
		İki terimli	0,569	0,564						0,955	0,109	
	Logaritmik	1,979		-0,922	3,378				0,994	0,002		
	1,0cm	Newton				8,526					0,929	0,060
		Page				34,252			1,672	0,995	0,069	
		Henderson ve Pabis	1,136			9,666				0,952	0,119	
		Modifiye Page				2,914			2,926	0,929	0,060	
Wang ve Singh		-5,531	5,002				9,666	9,666	0,993	0,085		
İki terimli		0,545	0,591						0,952	0,119		
Logaritmik	1,981		-0,927	3,321				0,996	0,004			

Tablo 2 Sıcak hava ile incirin köpük kurutulmasında yarı ampirik modellerin doğrusal olmayan regresyon analizi sonuçları
 Table 2 Non-linear regression analysis results of semi-empirical models for hot air drying of fig foam

Sıcaklık	Kalınlık	Modeller	a	b	c	k	k ₀	k ₁	n	R ²	RMSE	
60°C	0,5cm	Newton				1,494				0,965	0,040	
		Page				1,677			1,401	0,996	0,077	
		Henderson ve Pabis	1,089			1,626				0,975	0,105	
		Modifiye Page				1,43			1,044	0,965	0,040	
		Wang ve Singh	-1,077	0,28						0,999	0,050	
		İki terimli	-137,963	138,945				2,942	2,924	0,995	0,071	
	Logaritmik	1,371		-0,342	0,911					0,998	0,004	
	0,7cm	Newton				1,142					0,976	0,080
		Page				1,119				1,329	0,998	0,073
		Henderson ve Pabis	1,089			1,236				0,1	0,984	0,110
		Modifiye Page				0,989				1,158	0,976	0,080
		Wang ve Singh	-0,816	0,167							0,999	0,015
		İki terimli	0,544	0,544				1,236	1,236		0,984	0,110
	Logaritmik	1,16		-0,114	0,941					0,996	0,002	
	1,0cm	Newton				0,6					0,982	0,075
		Page				0,509				1,237	0,996	0,077
		Henderson ve Pabis	1,064			0,637					0,987	0,098
		Modifiye Page				0,777				0,772	0,982	0,075
Wang ve Singh		-0,436	0,048							0,999	0,050	
İki terimli		0,568	0,497				0,637	0,637		0,987	0,098	
Logaritmik	1,146		-0,129	0,471					0,998	0,004		
70°C	0,5cm	Newton	2,264							0,966	0,053	
		Page				3,01			1,414	0,997	0,075	
		Henderson ve Pabis	1,081			2,44					0,975	0,110
		Modifiye Page				1,142				1,983	0,966	0,053
		Wang ve Singh	-1,633	0,652							0,999	0,053
		İki terimli	73,051	-72,065				4,423	4,478		0,996	0,073
	Logaritmik	1,335		-0,307	1,428					0,997	0,003	
	0,7cm	Newton				1,278					0,972	0,077
		Page				1,307				1,371	0,998	0,073
		Henderson ve Pabis	1,097			1,393					0,981	0,114
		Modifiye Page				1,277				1,001	0,972	0,077
		Wang ve Singh	-0,917	0,211							0,999	0,043
		İki terimli	0,544	0,553				1,393	1,393		0,981	0,114
	Logaritmik	1,19		-0,139	1,017					0,996	0,003	
	1,0cm	Newton				0,595					0,978	0,080
		Page				0,51				1,223	0,991	0,092
		Henderson ve Pabis	1,052			0,625					0,981	0,101
		Modifiye Page				0,789				0,754	0,978	0,080
Wang ve Singh		-0,432	0,047							0,997	0,063	
İki terimli		0,509	0,543				0,625	0,625		0,981	0,101	
Logaritmik	1,196		-0,203	0,408					0,998	0,000		
80°C	0,5cm	Newton				2,087				0,96	0,039	
		Page				2,769			1,447	0,996	0,082	
		Henderson ve Pabis	1,083			2,259					0,969	0,109
		Modifiye Page				1,2				1,739	0,96	0,039
		Wang ve Singh	-1,481	0,507							0,999	0,051
		İki terimli	0,369	0,714				2,259	2,259		0,969	0,109
	Logaritmik	1,479		-0,456	1,126					0,998	0,003	
	0,7cm	Newton				1,568					0,97	0,042
		Page				1,769				1,356	0,996	0,075
		Henderson ve Pabis	1,08			1,693					0,978	0,101
		Modifiye Page				1,58				0,993	0,97	0,042
		Wang ve Singh	-1,136	0,315							1	0,037
		İki terimli	0,275	0,804				1,693	1,693		0,978	0,101
	Logaritmik	1,349		-0,327	0,966					0,999	0,033	
	1,0cm	Newton				0,688					0,986	0,083
		Page				0,609				1,207	0,996	0,080
		Henderson ve Pabis	1,057			0,725					0,989	0,100
		Modifiye Page				0,825				0,833	0,986	0,083
Wang ve Singh		-0,488	0,06							0,996	0,067	
İki terimli		0,528	0,528				0,725	0,725		0,989	0,100	
Logaritmik	1,113		-0,098	0,565					0,998	0,002		

Mikrodalga kurutma için, Wang ve Singh modeli, her mikrodalga gücü için en yüksek R^2 ($>0,991$) ve en düşük RMSE ($<0,1074$) değerini vermiştir. Wang ve Singh modeli a ve b sabitlerini içermektedir. Model sabitleri ürün kalınlığından ve mikrodalga gücünden önemli derecede etkilenmemiştir. Kadam ve Balasubramanian (2011) tarafından gerçekleştirilen domates posasının sıcak hava ile köpük kurutulması çalışmasında da en uygun modelin Wang ve Singh modeli olduğu ortaya konmuştur.

Etkili difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisinin tahmini: Farklı işlem koşullarında kurutulan incir köpüğü için, boyutsuz nem içeriği değerlerinde zamana karşı değişim gözlemlenmiştir. Büzülme etkileri göz ardı edilerek her deney koşulu için logaritmik parsellerin eğiminden ortalama difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Etkili difüzyon katsayısı değerleri, farklı hava sıcaklıkları, mikrodalga güçleri ve kalınlıklar için ilgili regresyon katsayıları ile birlikte, Tablo 3'te verilmiştir.

Kurutma türü fark etmeksizin, kurutulacak olan ürüne köpük formunun kazandırılmış olması, ince tabaka kurutma işlemine göre etkili difüzyon katsayıları bakımından oldukça avantaj sağlamaktadır. Kurutulacak ürüne köpük formu kazandırılarak, hava ile temas yüzeyi genişletilmekte ve kurutucu ortamın köpüğün içine daha etkin şekilde entegre olması sağlanabilmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, köpük benzeri numunelerin etkili nem difüzyonu katsayılarının, köpük olmayan örneklerden daha yüksek elde edildiği görülmüştür (Eke ve Asota, 1995). Gerçekleştirilen çalışmada, mikrodalga ve sıcak hava kurutma için etkili difüzyon katsayısı değerleri sırasıyla $9,94 \times 10^{-10}$ – $405,69 \times 10^{-10}$, $13,26 \times 10^{-10}$ – $26,65 \times 10^{-10}$ m^2s^{-1} aralığında değişim göstermiştir. Mikrodalga ile kurutma için etkili difüzyon katsayısı değerleri sıcak hava ile kurutma için elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bu durum, kurutma süresi için de belirtildiği gibi, mikrodalga ile daha homojen bir ısı dağılımı sağlanarak konveksiyon ile ısı iletimin daha etkin

şekilde gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır (Baysal ve ark., 2003).

Kurutucu hava sıcaklığının ve mikrodalga gücünün artması etkin difüzyon yayılımını arttırmıştır. Köpüğün içindeki artan basıncın ve enerjinin bir sonucu olarak daha yüksek sıcaklık ve mikrodalga gücü, etkili difüzyon katsayısı değerlerini arttırmaktadır. Thuwapanichayanan ve ark. (2008), belirli köpük yoğunlukları için, 60, 70 ve 80°C'de kurutulmuş muz köpüğünün etkin nem difüzyonunun artan sıcaklıkla arttığını bildirmişlerdir. Rajkumar ve ark. (2007), mango köpüğünün kurutması sırasında sıcaklıkla birlikte etkin nem difüzyonunda artışın olduğunu bildirmişlerdir. Kadam ve Balasubramanian, (2011), belirli bir köpük kalınlığı ve yumurta albümin konsantrasyonu için, 60, 65 ve 70°C'de kurutulmuş domates suyu köpüğünün etkin nem yayılımının artan sıcaklıkla arttığını doğrulamıştır.

Elde edilen sonuçların, hem sıcak hava hem de mikrodalga kurutma için, etkili difüzyon katsayısı değerlerinin köpük kalınlığının artmasıyla birlikte arttığını göstermiştir. Bu durum, daha yüksek köpük kalınlıklarının daha fazla iç boşluk içermesi böylece, nem transferinin, daha uzun bir mesafe boyunca gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Ürün içi çökme olmamasına bağlı olarak, yüksek köpük kalınlıklarındaki fazla sayıda hava boşluğu konveksiyon ile ısı transferinin daha etkili şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Ayrıca, çok gözenekli yapılar difüzyona karşı daha az akı direnci sağlamakta ve böylece nemin yüzeye transfer edilmesini büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Benzer şekilde, Rajkumar ve ark. (2007), herhangi bir özel kurutma sıcaklığında, 3 mm'de mango posası köpüğünün ortalama etkili nem difüzyonu değerinin 2 mm veya 1 mm'den daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Rasouli ve ark. (2011), daha yüksek kalınlıktaki sarımsak dilimlerinin, daha düşük kalınlıklardan ziyade, daha yüksek etkili nem dağılımı değerleri gösterdiğini bulgulamıştır.

Tablo 3 Farklı hava sıcaklıkları ve mikrodalga güçleri için etkili difüzyon katsayısı değerleri
Table 3 The effective diffusivity values for different air temperatures and microwave powers

Kurutma Türü	Sıcaklık (°C)/Güç (W)	Kalınlık (cm)	Deff×10 ¹⁰ (m ² ·s ⁻¹)	R ²
Sıcak hava kurutma	60	0,5	13,26	0,960
		0,7	19,57	0,960
		1,0	20,75	0,966
	70	0,5	18,36	0,968
		0,7	23,00	0,965
		1,0	21,41	0,950
	80	0,5	21,76	0,935
		0,7	25,92	0,965
		1,0	26,65	0,959
Mikrodalga kurutma	100	0,5	10,14	0,982
		0,7	9,94	0,974
		1,0	20,28	0,962
	300	0,5	38,03	0,971
		0,7	79,51	0,973
		1,0	213,00	0,979
	600	0,5	86,21	0,967
		0,7	154,10	0,975
		1,0	405,70	0,969

Tablo 4 Sıcak hava ve mikrodalga ile incir köpük kurutma için Arrhenius parametreleri

Table 4 Arrhenius parameters for the microwave and hot air drying of fig foam

Kurutma Türü	Kalınlık (cm)	$D_0 \times 10^9$ (m ² ·s ⁻¹)	E_a	R ²
Sıcak hava kurutma	0,5	322	21,426 (kJ/mol)	0,967
	0,7	26,5	13,572 (kJ/mol)	0,995
	1	21,5	12,952 (kJ/mol)	0,848
Mikrodalga kurutma	0,5	1,71	2,379 (W/g)	0,980
	0,7	2,93	2,203 (W/g)	0,999
	1	7,74	2,195 (W/g)	0,999

Tablo5 Deneysel ölçüm belirsizlikleri ve tahmin edilen değerler için toplam belirsizlikler

Table 5 Uncertainties of the experimental measurements and total uncertainties for the predicted values

Parametre	Birim	Sonuç	
		Sıcak Hava Kurutma	Mikrodalga Kurutma
Deneysel ölçümler			
Sıcaklık Ölçümü	°C	±2,00	-
Güç Ölçümü	W	-	±0,1
Ağırlık Ölçümü	g	±0,01	±0,01
Zaman Ölçümü	s	±0,033	±0,033
Kalınlık Ölçümü	cm	±05	±0,5
Tahmin edilen değerler			
Nem Oranı (MR)	birimsiz	±0,04% ^a	±0,09% ^d
Etkili Difüzyon Katsayısı	m ² ·s ⁻¹	±1,61% ^b	±2,69% ^e
Aktivasyon Enerjisi	kJ·mol ⁻¹ * and W·g ⁻¹ **	±2,94% ^c	±4,79% ^f

*Sıcak hava kurutma için aktivasyon enerjisi birimi, **Mikrodalga kurutma için aktivasyon enerjisi birimi, ^aNominal değer 0,73 olarak alındı, ^bNominal değer 23*10-10 m²·s⁻¹ olarak alındı, ^cNominal değer 13,57 kJ·mol⁻¹ olarak alındı, ^dNominal değer 0,155 olarak alındı, ^eNominal değer 79,51*10-10 m²·s⁻¹ olarak alındı, ^fNominal değer 2,203 W·g⁻¹ olarak alındı

Mikrodalga kurutmaya ait aktivasyon enerjisi sonuçları, sıcak hava kurutmaya göre oldukça düşük bulunmuştur. Farklı köpük kalınlıkları için mikrodalga ile kurutulmuş incir köpüğüne ait aktivasyon enerjisi değerleri 2,195-2,379 W·g⁻¹ arasında değişim gösterirken, sıcak hava ile kurutma için sonuçlar 12,952-21,426 kJ·mol⁻¹ arasında değişmektedir (Tablo 4). Mikrodalga kurutmanın sağladığı yüksek etkili difüzyon katsayıları suyun uzaklaştırılması için gereken aktivasyon enerjisinin daha düşük olmasına neden olmuştur. Her iki kurutma türü içinde köpük kalınlığının artması aktivasyon enerjisi değerlerini düşürmüştür. Azizpour ve ark. (2014) nın gerçekleştirdiği karideslerin sıcak hava ile köpük kurutulması çalışmasında aktivasyon enerjisi değeri 26,89 kJ·mol⁻¹ olarak bulunmuştur. Benzer sonuçlar Alakali ve ark. (2010) nın mango püresi için osmo-köpük ($E_a = 22,3$ kJ·mol⁻¹) kurutma çalışmasında da elde edildiği belirtilmiştir. Sonuçlar, çalışmada elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde dir.

Etkili difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi sonuçları ışığında, gerçekleştirilen köpük formunun herhangi bir çökme gerçekleşmeksizin, yapısının korunarak etkili bir şekilde kurutulabildiği sonucuna varılmıştır. Ürün kalınlığının artmasıyla, suyun boşluklu yapılarından kapiler kuvvetlere ek olarak daha fazla konveksiyon yoluyla uzaklaşması sağlanmış, böylece yüksek difüzyon katsayılarının ve düşük aktivasyon enerjisi değerlerinin elde edilmesi, köpük kurutma işleminin etkin bir şekilde gerçekleştiğinin göstergesi niteliğini taşımıştır.

Belirsizlik analizi sonuçları: Tablo 5’de ölçülen parametrelerin belirsizliğini, hesaplanan nem oranı, etkili difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi değerlerinin toplam belirsizliklerini listelemektedir. İncirin köpük kurutma analizi için elde edilen belirsizlik değerleri, %5 olarak kabul edilen limitin altında elde edilmiştir.

Tartışma

İncirin sıcak hava ve mikrodalga ile köpük kurutma kinetikleri, sıcak hava için 1,5 m·s⁻¹’lik sabit hava hızında, 60-80°C sıcaklık aralığında ve mikrodalga kurutma için 100-600 W güç aralığında gerçekleştirilmiştir. Kuruma eğrileri her iki kurutma türü içinde yalnızca düşen kuruma periyodunda gerçekleşmiş, sabit kuruma periyodu gözlenmemiştir. Kurutucu hava sıcaklığı ve mikrodalga gücündeki artış ile kuruma oranları artmış, toplam kuruma süreleri mikrodalga kurutma ile daha kısa bulunmuştur. Bu nedenle, mikrodalga kurutma yöntemi, incirin köpük kurutulması için sıcak hava ile kurutmadan kurutma süresi açısından daha verimli bulunmuştur. Etkili difüzyon katsayılarının hava sıcaklığı, mikrodalga gücü ve köpük kalınlığındaki bir artışla artmıştır. Ayrıca, nem dağılımı için hesaplanan aktivasyon enerji değerleri bu durumu doğrulamıştır. Ürün kalınlıklarının etkili difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi değerlerine ters bir etki yarattığı gözlenmiştir. Ürün kalınlığının artmasıyla artan etkili difüzyon katsayısı ve düşen aktivasyon enerjisi değerleri etkin bir köpük yapısının oluşturabildiğini göstermiştir. Etkin köpük yapısının oluşturulması suyun transfer mekanizmasına, konveksiyon yolu ile ısı iletimi bakımından katkı sağlamış ve kurutma etkinliğinin artmasını sağlamıştır.

Teorik Fick’in difüzyon modelinin yanı sıra, yedi yarı deneysel kurutma modeli incirin köpük kurutma kinetiğini belirlemek için test edilmiştir. Modeller arasında, mikrodalga ve sıcak hava ile kurutma prosesini sırasıyla daha yüksek R² ve daha düşük RMSE değerlerini veren Wang ve Singh ile Logaritmik modellerin en iyi şekilde açıkladığı sonucuna varılmıştır.

Daha sonraki çalışmalar için mikrodalga kurutma (mikrodalga gücü ve süresi) ve sıcak hava kurutma işlem koşulları (kurutucu hava sıcaklığı ve süresi) daha verimli bir kurutma prosesi için optimize edilip iyileştirilebilir.

Buna ek olarak, mikrodalga kurutma tekniği, zaman tasarrufu nedeniyle köpük kurutma için sıcak hava kurutma tekniğine alternatif olarak düşünülmelidir.

Teşekkür

Çalışmaya finansal yönden sağlamış olduğu destekten dolayı Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MF-17003 Nolu proje) Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Akintoye OA, Oguntunde OA. 1991. Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soymilk. *Drying Technol.*, 9(1): 245-262.

Alakali JS, Kucha EI, Ariahu CC. 2010. Drying characteristics of osmo-foam-mat mango pulp. *Journal of Agriculture Biotechnology & Ecology.*, 3(1): 87-98.

Azizpour M, Mohebbi M, Haddad Khodaparast MH, Varidi M. 2014. Optimization of foaming parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). *Drying Technol.*, 32: 374e384.

Baysal T, İçier F, Ersus S. 2003. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *Eur Food Res Technol*, 218 (1): 68-73.

Branco IG, Kikuchi TT, Sanjinez EJA, Moraes ICF, Haminiuk CWI. 2016. Drying kinetics and quality of uvaia (*Hexachlamys edulis* (O. Berg)) powder obtained by foam-mat drying. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 51: 1703–1710.

Crank J. 1975. *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Oxford, UK: Clarendon Press.

Dev SR, Raghavan VG. 2012. Advancements in drying techniques for food, fiber, and fuel. *Drying. Technol.* 30: 1147–1159.

Djaeni M, Prasetyaningrum A, Sasongko SB, Widayat W, Hii CL. 2015. Application of foam-mat drying with egg White for carrageenan: drying rate and product quality aspects. *J. Food Sci. Technol.*, 52: 1170–1175.

Doymaz I. 2004. Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus alba* L.).

Eke AB, Onyenekwum PC, Asota CN, Kalu RN. 1995. Effect of solar and traditional open sun on the microbial loads and some nutrients of tomato. 17th annual conference of Nigerian society of Agricultural Engineers, Federal University of Technology, Nigeria.

Falade KO, Adeyanju KI, Uzo-Peters PI. 2003. Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glycerylmonostearate and egg albumin as foaming agents. *Eur. Food Res. Technol.*, 217(6): 486-491

Farahnaky A, Ansari S, Majzoobi M. 2009. Effect of glycerol on the moisture sorption isotherms of figs. *J. Food Eng.*, 93: 468–473

Fernandes RVB, Queiroz F, Botrel DA, Rocha VV, Lima CF, Souza VR. 2013. Foam mat drying of tomato pulp. *Biosci. J.*, 29: 816–825.

Franco TS, Perussello CA, Ellendersen LDSN, Masson ML. 2015. Foam mat drying of yacon juice: experimental analysis and computer simulation. *J. Food Eng.*, 158: 48–57.

Goyal RK, Kingsly ARP, Manikanthan MR, Ilyas SM. 2007. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *J. Food Eng.* 79: 176–180.

Kadam DM, Balasubramanian S. 2011. Foam mat drying of tomato juice. *J. Food Process. Preserv.*, 35(4): 488-495.

Kandasamy P, Varadharaju N, Kalemullah S, Maladhi D. 2012. Optimization of process parameters for foam-mat drying of papaya pulp. *J. Food Sci. Technol.* 51: 2526–2534.

Kandasamy P, Varadharaju N, Kalemullah S. 2012. Foam mat drying of papaya (*Carica Papaya* L.) using glycerol monostearate as foaming agent. *Food Science and Quality Management*, 9: 17–27.

Karathanos VT, Belessiotis VG. 1999. Application of thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J. Agric. Eng. Res.*, 74: 355–361.

Karim AA, Wai CC. 1999. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoacarambola* L.) puree, Stability and air drying characteristics. *Food Chem.*, 64(3): 337-343.

Kaymak-Ertekin F, Gedik A. 2005. Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage. *J. Food. Eng.*, 68(4): 443-453.

Khamjae T, Rojanakorn T. 2016. Foam-mat drying of passion fruit aril. *Int. Food. Res. J.*, 25(1): 204-212

Koc B, Eren I, Ertekin FK. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *J. Food. Eng.*, 85(3): 340-349.

Krasaekoopt W, Bhatia S. 2012. Production of yogurt powder using foam-mat drying. *Faculty of Biotechnology, Assumption University Bangkok, Thailand*, 15(3): 166-171.

Rajkumar P, Kailappan R, Viswanathan R, Raghavan GSV. 2007. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *J. Food. Eng.*, 79(4): 1452-1459.

Rajkumar P, Kailappan R, Viswanathan RGSV. 2007. Raghavan, Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer, *J. Food. Eng.*, 79: 1452–1459.

Rajkumar P, Kailappan R. (2006). Optimizing the process parameters for foam mat drying of Totapuri mango pulp. *Madras Agric. J.*, 93: 86–98.

Rao PP, Nagender A, Rao LJ, Rao DG. 2007. Studies on the effects of microwave drying and cabinet tray drying on the chemical composition of volatile oils of garlic powders. *Eur. Food. Res. Technol.*, 224: 791-795.

Rao TSS, Murali HS, Rao KRG. 1987. Preparation of foam-mat dried and freeze dried whole egg powder (hen's). *J. Food. Sci. Technol.*, 24: 23–26.

Rasouli M, Seiedlou S, Ghasemzadeh HR, Nalbandi. 2011. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy of activation during the hot air drying of garlic. 2(4): 96-101.

Sagar VR, Kumar PS. 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J. Food. Sci. Technol.*, 47: 15–26.

Sangamithra A, Venkatachalam S, John SG, Kuppuswamy K. 2015. Foam mat drying of food materials: a review. *J. Food. Process. Preserv.*, 39: 3165–3174.

Silva AS, Gurjao KCO, Almeida FCA, Bruno RLA, Pereira WE. 2008. Dehydration of tamarind pulp through the foam-mat drying method. 32: 1899–1905.

Sonawane SK, Arya SS. 2015. Effect of drying and storage on bioactive components of jambhul and wood apple. *J. Food. Sci. Technol.*, 52: 2833–2841.

Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S, Soponronnarit S. 2008. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *J. Food Eng.* 86: 573–583.

Trichopoulou A, Vasilopoulou E, Georga K, Soukara S, Dilis V. 2006. Traditional foods: Why and how to sustain them. *Trends Food Sci. Tech.* 17: 498–504.

Vernon-Carter EJ, Espinosa-Paredes G, Beristain CI, Romero-Tehuiztil H. 2001. Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarind foam-mats. *Food. Res. Int.* 34: 587–598.

Wilson RA, Kadam DM, Kaur V, Chadha S, Kaushik P, Kaur S, Patil RT, Rai DR. 2012. Physicochemical and microbial quality evaluation of foam-matdried pineapple powder. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 47: 1654–1659.