


## Farklı Sıcaklık ve Mikrodalga Güçlerinde Kurutulan Elma Dilimlerinin Kurutma Özellikleri

Nizam Mustafa Nizamlıoğlu  

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 70000 Karaman

Geliş Tarihi (Received): 12.04.2022, Kabul Tarihi (Accepted): 22.09.2022

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): [munizam@kmu.edu.tr](mailto:munizam@kmu.edu.tr) (N.M. Nizamlıoğlu)

☎ 0338 226 5452 📠 0338 226 2214

### ÖZ

Bu çalışmada, farklı mikrodalga güçleri ve farklı sıcak havada kurutulan elma dilimlerinin kuruma özellikleri araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Mikrodalga gücünün artışına bağlı olarak kuruma hızı ve efektif difüzyon katsayısında artış, kuruma süresinde ise azalma tespit edilmiştir. Farklı mikrodalga güçlerinde nem yayılımları  $9.72 \times 10^{-10} - 2.36 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  aralığında, sıcak hava ile kurutmada ise  $3.80 \times 10^{-10} - 7.40 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  arasında bulunmuştur. Sıcak hava kurutma yönteminde farklı güçlerde uygulanan mikrodalga kurutma yöntemine göre daha uzun kuruma süresi, daha yavaş kuruma hızı ve daha düşük efektif difüzyon katsayısı elde edilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak kurutma hızı ve efektif difüzyon katsayısında artış tespit edilmiştir. Farklı mikrodalga güçlerinde kurutma eğrileri en iyi Page modeliyle, sıcak havalı kurutmada ise Parabolik modelle tanımlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elma dilimleri, Sıcak havayla kurutma, Mikrodalga kurutma, Rehidrasyon

### Drying Properties of Apple Slices at Different Temperatures and Microwave Powers

#### ABSTRACT

In this study, the drying properties of apple slices dried at different microwave powers and in different hot air were investigated and compared. Depending on the increase in microwave power, an increase in drying rate and effective moisture diffusivity and a decrease in drying time were determined. Effective moisture diffusivity were found in the range of  $9.72 \times 10^{-10} - 2.36 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  at different microwave powers, and between  $3.80 \times 10^{-10} - 7.40 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  in hot air drying. Longer drying time, slower drying rate and less effective moisture diffusivity were obtained from drying hot air when compared to different microwave powers. Depending on the increase in temperature, an increase in drying rate and effective moisture diffusivity was determined. While Page model has the best fit for the drying curves at different microwave powers, the drying curves of hot air dried apple slices were defined by Parabole model.

**Keywords:** Apple slices, Hot air drying, Microwave drying, Rehydration

### GİRİŞ

Elma (*Malus domestica* Borkh.), gül familyasının (*Rosaceae*), *Pomoideae* alt familyası içerisinde yer alan ve ılıman bölgelerde yetişen kokulu bir bitkidir [1]. Dünya'da elma üretimi yaklaşık 90 milyon ton civarında gerçekleşmekte, Çin %50 ile üretimde lider ve Türkiye %3.4 ile dördüncü sırada yer almaktadır [2, 3]. Elmanın

Dünyada 6000'den fazla çeşit ve 25 farklı türünün olduğu ancak bunların çok azının ticari öneme sahip olduğu bildirilmektedir [4]. Elma, 2021 yılı TÜİK verilerine göre 4.493.264 ton üretimi ile Türkiye'nin önemli meyvelerinden biridir [5]. Elmalar genel olarak; %85-86 su, %1-14 karbonhidrat, %2 diyet lifi, %0.6 yağ, %0.5 organik asit ve %0.3 proteinden oluşur [6, 7]. Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de sezonluk yaş

sebze ve meyvelerin yaklaşık %30-40'nın bozularak atıldığı bildirilmiştir [8]. Bu kayıpların önüne geçebilmek ve gıda maddelerinin tüketim ömrünü artırabilmek için kurutma önemli alternatiflerden birisidir [9, 10]. Kurutma ile meyve ve sebzelerin %80-95 oranlarındaki su içeriğinin %10-20'ye düşürülerek uzun süre dayanmasını sağlanmaktadır [11]. Kurutulmuş meyve ve sebze ürünlerinde nem içeriği meyve ve sebzelerin türüne göre genellikle %3-20 arasında değişmektedir [6].

Dünyanın birçok ülkesinde en çok üretilen ve tüketilen meyvelerden olan elma, kuru elma, atıştırmalık, kahvaltılık gıdalar, cips vb. ürünlerin üretiminde hammadde olarak önemli bir rol oynamaktadır [1, 12]. Elma meyvesi zengin şeker, organik asit ve vitamin içeriği nedeniyle insan diyetinde önemli yer tutar. Elmanın antimutajenik ve güçlü antioksidan etkilerinin yanında, kanser, diyabet, obezite, kardiyovasküler hastalıklar, astım ve diğer akciğer hastalıklarına karşı koruyucu olduğu, *in vivo* çalışmalardan elde edilen önemli bulgulardır [6, 13].

Kurutma, eş zamanlı ısı ve kütle transferinin bir arada gerçekleştiği ısınma evresi, sabit kuruma hızı evresi ve azalan kuruma hızı evresi olmak üzere suyun gıdalardan uzaklaştırılması işlemidir [14, 15]. Sabit hızla kuruma periyodunda kütle transferi, gıdanın yüzeyindeki sıvı filmde buharlaşma yolu ile olur. Sabit hızla kuruma periyodunca birim zamanda uzaklaşan su miktarı sabit kalmaktadır [16]. Sabit hızda kuruma periyodu sonunda kritik nem içeriğine ulaşılır ve azalan hızda kuruma periyodu başlar. Azalan hız periyodu ürün içerisindeki nem transfer hızı yüzeydeki buharlaşma oranından daha azdır. Bu nedenle azalan hız döneminde kuruma hızı azalır [5]. Sıcaklık derecesi, havanın nemi ve havanın kurutucudaki hızı gibi kuruma koşulları ile boyut, kalınlık gibi gıdaya ait özellikler kuruma hızını etkilemektedir [15, 17].

Günümüzde kolay ve ekonomik olan geleneksel kurutma metotları çok zaman alıcıdır ve enerji israfına, besin değerinde kayıplara ve kalitenin bozulmasına neden olmaktadır [18]. Son yıllarda mikrodalga ve radyo frekansı enerjisinin kullanıldığı dielektrik kurutma yöntemleri, hacimsel ve hızlı ısıtma özelliği nedeni ile geleneksel kurutma yöntemlerine alternatif olarak gündeme gelmektedir [19]. Mikrodalga kurutma, gıdanın içindeki su moleküllerinin titreşerek sürtünme sonucu ısı enerjisinin açığa çıkmasıyla, nemin hızlı bir şekilde uzaklaştırılması prensibine dayanır [9, 16, 20]. Mikrodalga ile kurutma işleminin geleneksel kurutma yöntemlerine göre enerjiden yararlanma oranı yüksek, kuruma süresi kısadır ve rehidrasyon yeteneği yüksek ürünler elde edilmektedir [6, 21]. Son zamanlarda, ucuz ve güvenilir mikrodalga kaynaklarının geliştirilmesi, kurutma işlemindeki uygulamalar için artan bir çekicilik haline gelmiştir [3, 20].

Kurutma işleminin matematiksel modellenmesi, kurutma mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve enerji verimliliğinin optimizasyonu için esastır [22, 23]. Meyve ve sebzelerin nem içeriği yüksek olduğundan, bu gıda ürünlerinin kurutulmasını optimize etmek önemlidir [5]. Kurutma kinetiği, ısı ve kütle transfer olaylarının

mekanizmalarını tanımlar ve belirli işlem değişkenlerinin nem uzaklaştırma işlemleri üzerindeki etkisini araştırır [24]. Meyve ve sebzelerin kuruma kinetiğini belirlemek için kullanılan ince tabaka kurutma teknolojisi, en uygun çalışma koşullarının seçilmesini sağlayan kurutma işleminin bir tür matematiksel modellemesidir. Böylece kurutma prosesi tasarlanabilir ve optimize edilebilir [5, 6, 25].

Kurutma teknolojisinin en önemli yönlerinden biri kurutma işleminin modellenmesidir. Literatürde, elma dilimlerinin kurutma özellikleri açısından aralıklı mikrodalga kurutma ve sıcak hava kurutma işlemlerinin karşılaştırması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır [5, 19]. Yapılan çalışma ile farklı mikrodalga güçlerinde ve farklı hava sıcaklıklarında kurutulan elma dilimlerinin kuruma özellikleri belirlenmiştir. Mikrodalga ve sıcak hava ile kurutma yöntemleri karşılaştırılmış ve kinetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızda önceki çalışmalardan farklı olarak farklı mikrodalga çıkış güçleri ve aralıklı açık/kapalı kurutma işlemine göre diğer mikrodalga kurutma deneyleri modifiye edilerek 20 s açık / 10 s kapalı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

## MATERYAL ve METOT

### Materyal ve Örnek Hazırlama

Elma örnekleri (Granny Smith), Türkiye'nin Karaman ilindeki özel bir soğuk hava işletmesinden temin edilmiştir. Elma örnekleri analiz edilinceye kadar 4°C'de saklandı ve 4 gün içinde kurutma işlemleri tamamlanmıştır. Kurutma işlemi için elma örnekleri yıkanıp soyulduktan sonra dilimleyici (Boğaziçi Endüstriyel Mutfakları, Türkiye) ile 5±0.1 mm dilim kalınlığında kesilmiştir. Numunelerin başlangıç nem içeriği 105°C'de bir kurutma fırınında (Nüve, FN 055, Türkiye) belirlenmiştir. Elma örneklerinin başlangıç nem içeriği %84.89±0.60 olarak belirlenmiştir.

### Elma Örneklerinin Kurutulması

Sıcak hava kurutma yöntemi için yaklaşık 100 g ağırlığındaki elma dilimleri fanlı mikrodalga hibrit kurutma fırınına (Arçelik KMF 833 W) tek sıra halinde yerleştirilmiştir. Kurutma deneyleri üç farklı hava sıcaklığında (50, 60 ve 70°C) ve 1 m.s<sup>-1</sup> hava hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ağırlıkları 0.001 g hassasiyetle dijital terazi (Denver Instrument, Almanya) ile tartılmıştır. Kurutma deneyleri, numunelerin nem içeriği yaklaşık yaş bazda %10'a ulaştığında sonlandırılmıştır. Tüm kurutma deneyleri iki tekrarlı gerçekleştirilmiştir.

Mikrodalga kurutma deneyleri mikrodalga hibrit fırında (Arçelik KMF 833 W) gerçekleştirilmiştir. Mikrodalgada kurutma işlemi üç farklı mikrodalga çıkış gücü kullanılarak (100, 200 ve 300 W) gerçekleştirilmiştir. Her bir örnekten 100 g numune polipropilen delikli kurutma tepsileri üzerine yerleştirilmiş ve belirtilen mikrodalga çıkışlarında kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Beaudry ve ark. [26], Soysal ve ark. [27] ve Demiray ve ark. [28], tarafından uygulanan mikrodalga kurutma

deneyleri modifiye edilerek 20 s açık / 10 s kapalı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin nem içeriği yaklaşık yaş bazda %10 değerine ulaştığında kurutma işlemi tamamlanmıştır. Çalışmada Uluslararası Mikrodalga Güç Enstitüsü (IMPI) 2 Litre testi kullanılmıştır. Her mikrodalga güç seviyesinde iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

### Kurutma Verilerinin Matematiksel Modellemesi

Elma dilimlerinin nem oranının (NO) hesaplanmasında Eşitlik (1) kullanılmıştır;

$$NO = \frac{N_a - N_d}{N_b - N_d} \quad (1)$$

Eşitlikte  $N_d$ : denge nem içeriği;  $N_a$ : herhangi bir andaki nem içeriği ve  $N_b$ : başlangıç nem içeriğidir. Denge nem içeriği, herhangi bir andaki nem içeriğine ve başlangıç nem içeriğine kıyasla çok küçük bir değer olduğu için ihmal edilmiştir. Nem içeriği kuru madde üzerinden ifade edilmiştir. Nem oranı süreye bağlı değişen nem içeriklerinin (g su/g kuru madde) birbirine oranı olduğundan nem oranı boyutsuz olarak hesaplanmaktadır. [29, 30].

Kurutma hızının (KH) belirlenmesi için eşitlik (2) kullanılmıştır [29];

$$KH = \frac{N_{a+\Delta t} - N_a}{\Delta t} \quad (2)$$

Eşitlikte  $N_{a+\Delta t}$ : zaman farkındaki nem içeriğini ve  $\Delta t$ : iki ölçüm noktası arasındaki zaman farkını gösterir. Kök ortalama kare hatası (RMSE) ve indirgenmiş ki-kare ( $\chi^2$ ) değerleri, eşitlik (3) ve (4) ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (NO_{pre,i} - NO_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (NO_{pre,i} - NO_{exp,i})^2}{N-n} \quad (4)$$

Eşitlikte  $NO_{pre}$ : tahmini NO ve  $NO_{exp}$ : deneysel NO'dur. N ve n, gözlem verilerinin sayıları ve ince tabaka kurutma modellerinin sabitleridir [31]. İstatistiksel parametrelerin hesaplanması için MATLAB (ver. 8.6) kullanılmıştır. Deneysel modeller arasında en uygun model seçilirken modele ait determinasyon katsayısının ( $R^2$ ) daha yüksek değerleri,  $\chi^2$  ve RMSE değerlerinin daha düşük değerleri aranmıştır [28]. İnce tabaka kuruma eğrilerinin matematiksel modelleri Tablo 1'de verilmiştir [32].

Tablo 1. İnce tabaka kuruma eğrilerinin matematiksel modelleri

**Table 1. Mathematical models of thin-layer drying curves**

Model İsmi	Model
Logaritmik	$a \exp(-kt) + c$
Lewis	$\exp(-kt)$
Henderson ve Pabis	$a \exp(-kt)$
Page	$\exp(-kt^n)$
Parabolik	$a + bt + ct^2$
Wang ve Sing	$1 + at + bt^2$

### Farklı Mikrodalga Güç Seviyeleri Ve Farklı Sıcak Hava İle Kurutulmuş Elma Dilimlerinin Efektif Difüzyon Katsayısı Ve Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Sabit bir nem yayılımına sahip sonsuz kalınlıkta örneğin efektif difüzyon katsayısının hesaplanması için Crank [33] tarafından önerilen Fick'in İkinci Yasası kullanılmıştır (Eşitlik 5).

$$NO = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)\pi^2 \frac{D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

Eşitlikte L: numunenin kurutmadan önceki ilk boyutunun yarı kalınlığı (m) ve t: kuruma süresidir (dk.). Eşitlik (5), eşitlik (6) da verildiği gibi uzun kuruma süresi (n = 1) için basit olarak yazılabilir;

$$\ln(NO) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff} t\right) \quad (6)$$

NO'nun kuruma süresine karşı doğal logaritmasından sonra (Eşitlik 6), aşağıdaki eşitlik (7) ile doğrusal bir eğri elde edilir. [30];

$$Eğim = - \frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff} \quad (7)$$

Aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ), kurutma işlemi açısından gıdanın içinden nem difüzyonunu başlatmak için gereken enerji olarak tanımlanır [34]. Düşük  $E_a$ , kurutma işleminde daha yüksek nem difüzyonunu ve kuruma hızını gösterir [35]. Arrhenius eşitliği (Eşitlik 8), sıcak havayla kurutma işleminde  $E_a$ 'nın hesaplanması için kullanılmıştır [28];

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

Eşitlikte,  $D_0$ : üstel sabit; R: evrensel gaz sabiti ve T: mutlak sıcaklıktır ( $^{\circ}K$ ).

Eşitlik (8) aşağıda Denklem (9) verildiği gibi yeniden düzenlenebilir;

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'un eğimi  $E_a$  elde edilir.

Mikrodalga fırında sıcaklığın sağlıksız ölçülmesi nedeniyle, Arrhenius denklemi Özbek ve Dadalı [36] tarafından aşağıda Eşitlik (10) da önerildiği gibi verilmiştir;

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a m}{P}\right) \quad (10)$$

Eşitlikte, m; ilk numune ağırlığıdır (g) ve P; mikrodalga çıkış gücünü (W) temsil eder. Eşitlik (10)'un yeniden düzenlenmesinden sonra, yeni eşitlik aşağıdaki eşitlik (11) gibi yazılır;

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a m}{P} \quad (11)$$

$D_{eff}$ 'in mikrodalga gücünün numune ağırlığına oranına karşı doğal logaritması,  $E_a$ 'yı temsil eden eğimli düz bir çizgi verir.

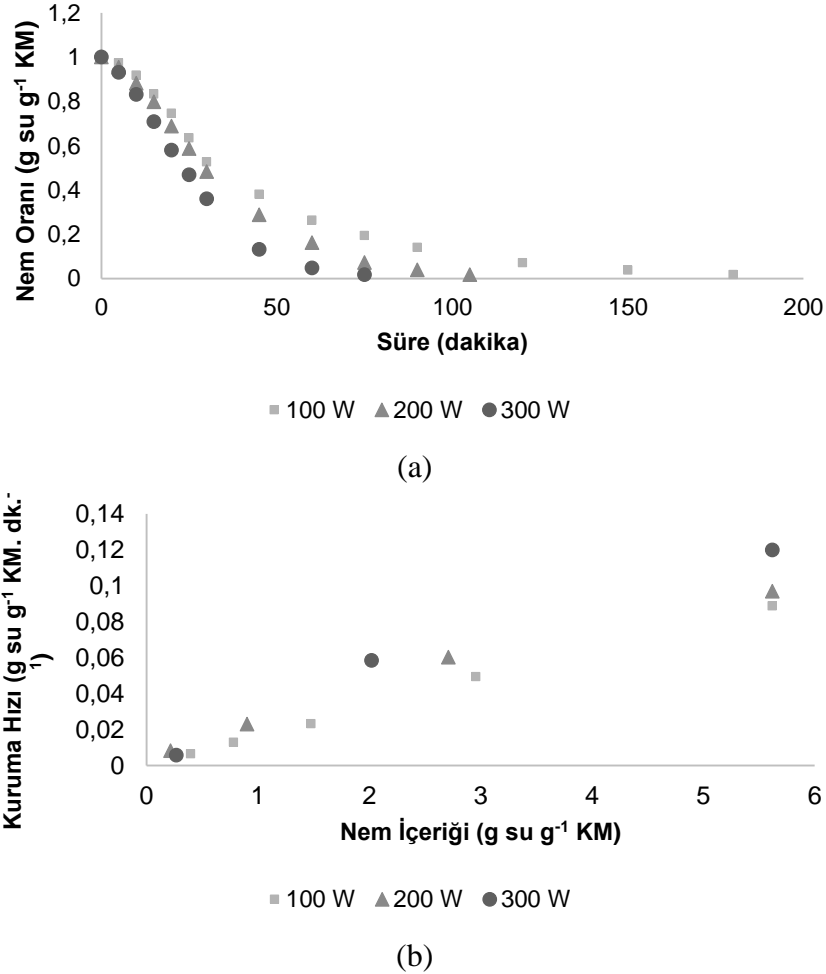
## BULGULAR ve TARTIŞMA

### Elma Dilimlerinin Farklı Mikrodalga Güç Seviyelerinde Kurutulması

#### Mikrodalga Gücünün Elma Dilimlerinin Kuruma Hızı Üzerindeki Etkisi

Şekil 1, farklı mikrodalgada güçlerinde kurutulan elma dilimlerinin nem oranı (NO) ve kuruma hızı (KH) varyasyonlarını göstermektedir. Şekil 1'de ve Tablo 3'de görüldüğü gibi mikrodalga güçlerinin KH üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Mikrodalga gücünün artmasıyla KH'nin önemli bir şekilde arttığı görülmektedir. Tablo 3'te görüldüğü gibi 100, 200 ve 300 W mikrodalga güçlerinde yaş bazda nem içeriğinin %10'a düşmesi için gereken süre sırasıyla 180 dk., 105 dk. ve 75 dk. olarak bulunmuştur. Mikrodalga gücü 100 W'dan-200 W'a, 100 W'dan-300 W'a ve 200 W'dan-300 W'a yükseltildiğinde, kuruma süresindeki azalmalar sırasıyla %41.67, %58,33 ve %28.57 bulunmuştur.

Mikrodalga gücü yükseldikçe kuruma daha hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum, mikrodalga gücünün artışı ile numunede daha fazla ısı üretimi meydana gelmesi ve buna bağlı olarak yüksek buharlaşma hızına yol açması ile ilişkilendirilmiştir. Zarein ve ark. [29] ve Çelen ve ark. [35] Mikrodalga gücü arttıkça elma dilimlerinin (6 ve 5 mm elma dilim boyutu) daha hızlı kuruma hızına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Benzer sonuçlar mikrodalgada kurutulmuş farklı gıdalarda Demiray ve ark. [28] ve Azimi- Nejadian ve Hoseini [37] tarafından da rapor edilmiştir. Kurutma işleminin ilk aşamasında farklı mikrodalga güçlerinde, elma dilimlerinin nem içerikleri daha yüksek olduğu için ve bu nem daha yüksek mikrodalga absorpsiyonu sağladığı için kuruma hızları daha yüksek olmuştur. Elma dilimlerinde nem oranının azalmasına bağlı olarak farklı mikrodalga güçlerinde kuruma hızlarında azalma gözlenmiştir. Kuruma hızları Şekil 1'de görüldüğü gibi farklı mikrodalga güçlerinde üç aşamada meydana gelmiştir. Birinci aşama ısınma aşaması, ikinci aşama hızlı kuruma aşaması ve üçüncü aşama ise azalan kuruma hızlarını takip etmektedir. Benzer sonuçları Çelen ve ark. [35], Azimi-Nejadian ve Hoseini [37] ve Aghilinategh ve ark. [38] rapor etmişlerdir.



Şekil 1. Farklı dalga mikrodalga güçlerinde nem oranı (a) ve kuruma hızında değişim (b)  
Figure 1. Changes in moisture content (a) and drying rate (b) at different microwave powers

## Farklı Mikrodalga Güçlerinde Kurutma Eğrilerinin Modellenmesi

Kurutma işleminde matematiksel modelleme uygulaması kurutma prosesinin belirlenmesi ve optimizasyonunda büyük önem taşımaktadır. Buna bağlı olarak, elma dilimlerinin farklı mikrodalga güçlerinde kurutulmasına ait en ideal matematiksel modeli belirlemek için yapılan istatistiksel parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi tüm mikrodalga güçlerinde en yüksek  $R^2$ , en düşük RMSE ve  $\chi^2$  Page modeli ile elde edilmiştir. Page modeli farklı mikrodalga güçlerinde kurutma davranışını ideal olarak tanımlamıştır. Elma dilimlerinin ince tabaka kurutma davranışını diğer modellerle kıyaslandığında diğer modellere göre en

ideal şekilde Page modelinin açıkladığı Çelen ve ark. [35] tarafından bildirilmiştir. Çelen ve Kahveci [39] elma dilimlerinin mikrodalgada kurutulmasında Page modelinin deneysel verilerle en iyi uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. İzli ve Polat [40] Midilli ve ark.'nın modelinin, elma dilimlerinin mikrodalgada kurutulmasında kurutma hızını en iyi tanımlayan ince tabaka modeli olduğunu rapor etmişlerdir. Zarein ve ark. [29] Midilli ve ark. modelinin, elma dilimlerinin mikrodalgada kurutulmasında kurutma hızına en ideal şekilde uyduğunu bildirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar ve referanslara göre Page modeli ve Midilli ve ark. modelinin, elma dilimlerinin mikrodalgada kurutulmasında en ideal model olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 2. Farklı mikrodalga güçlerinde kurutma eğrilerinin model sabitleri ve istatistiksel parametreleri

*Table 2. Statistical parameters and model constants of drying curves at different microwave powers*

Model	Mikrodalga Güçleri	Model Sabitleri	$\chi^2$	RMSE	$R^2$
Lewis	100 W	k= 0.01968	0.002844081	0.05139	0.9805
	200 W	k= 0.02455	0.005616068	0.07175	0.9628
	300 W	k= 0.03206	0.006831253	0.07841	0.9535
Page	100 W	k= 0.007195 n= 1.270	0.001038134	0.02983	0.9939
	200 W	k= 0.004564 n= 1.473	0.000128051	0.01033	0.9993
	300 W	k= 0.004845 n= 1.576	4.17461E-05	0.005779	0.9998
Henderson ve Pabis	100 W	k= 0.02196 a= 1.082	0.001698883	0.03816	0.9901
	200 W	k= 0.02766 a= 1.100	0.004087068	0.05836	0.9777
	300 W	k= 0.03580 a= 1.095	0.00597024	0.06911	0.9679
Logaritmik	100 W	k= 0.02278 a= 1.069 c= 0.0168	0.002046558	0.0401	0.9890
	200 W	k= 0.02854 a= 1.086 c= 0.0164	0.005148506	0.06214	0.9747
	300 W	k= 0.03691 a= 1.079 c= 0.0174	0.007598264	0.07293	0.9642
Wang ve Singh	100 W	a= -0.01468 b= 0.00005302	0.003221753	0.05255	0.9812
	200 W	a= -0.01908 b= 0.00009163	0.001775006	0.03846	0.9903
	300 W	a= -0.02500 b= 0.0001541	0.002264192	0.04256	0.9878
Parabolik	100 W	a= 1.006 b= -0.01485 c= 0.0000538	0.003817867	0.05477	0.9813
	200 W	a= 1.052 b= -0.02134 c= 0.0001099	0.001146999	0.02933	0.9949
	300 W	a= 1.056 b= -0.02825 c= 0.0001900	0.001641729	0.0339	0.9932

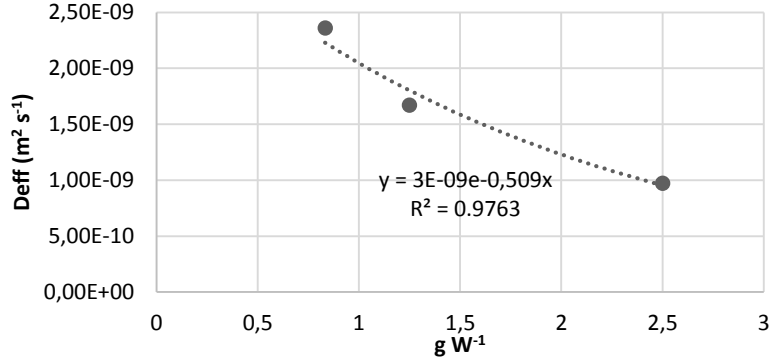
## Kesikli Mikrodalgada Kurutulmuş Elma Dilimlerinin Etkin Nem Yayılımı Ve Aktivasyon Enerjisi

Tablo 3'te görüldüğü gibi farklı mikrodalga gücünde kurutulmuş elma dilimlerinin  $D_{eff}$  değeri  $9.72 \times 10^{-10}$ - $2.36 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$  aralığında bulunmuştur. Tablo 3'de elma dilimlerinin farklı mikrodalga gücünde kurutulmasında, mikrodalga gücünün artmasına bağlı olarak  $D_{eff}$  değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek mikrodalga güçlerinde su moleküllerinde daha fazla ısınma ile açıklanabilir. İzli ve Polat [40] farklı mikrodalga güçlerinde kurutulmuş elma dilimlerinde  $D_{eff}$  değerlerini,  $8.11 \times 10^{-9}$  ile  $1.22 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$  arasında gözlemişlerdir.  $D_{eff}$  değerleri Mikrodalga güçlerinin 100 W'dan 300 W'a artmasıyla artmıştır. Aghilinategh ve ark. [38]  $D_{eff}$  değerlerinin, elma dilimlerinin farklı mikrodalga güçlerinde kurutulmasında  $1.26 \times 10^{-8}$  ile  $2 \times 10^{-8} m^2 s^{-1}$  arasında değiştiğini ve  $D_{eff}$  değerlerinin mikrodalga gücünün 200'den 600 W'a yükseldikçe arttığını bildirmişlerdir. Çelen ve ark. [35] yaptıkları çalışmada 1050 ile 2100 W arasındaki mikrodalga

güçlerinde daha yüksek  $D_{eff}$  değerleri ( $8.51 \times 10^{-8}$ - $1.12 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ ) bulmuşlardır. Bu sonuçlar yaptığımız çalışma ile benzerlik göstermektedir. Benze sonuçlar, Demiray ve ark. [28] soğan, Azimi-Nejadian ve Hoseini [37] patates dilimleri ve Kumar ve ark. [41] taro dilimleri ile yaptıkları çalışmalarda gözlemlenmiştir. Şekil 2'de  $D_{eff}$  değerinin doğal logaritmasının, numune ağırlığının mikrodalga güçlerine oranına çizilmesiyle hesaplanan  $E_a$  değeri  $0.51 W g^{-1}$  olarak bulunmuştur. Elde edilen  $E_a$ 'nın mikrodalgada kurutulmuş elma dilimlerinin ( $4.93 W g^{-1}$ ) [38], soğanın ( $7.9 W g^{-1}$ ) [28] ve nanenin ( $12.28 W g^{-1}$ ) [36]  $E_a$ 'sından daha düşük olduğu bulunmuştur.  $E_a$ 'nın düşük olması daha hızlı kuruma gerçekleştiğini ve daha yüksek  $D_{eff}$ 'i göstermektedir [5]. Bu durum elma varyetesi, başlangıç nem içeriği, dilim kalınlığı, deneysel çalışmada uygulanan sıcaklık, hava hızı veya mikrodalga güçlerinin farklılıkların ileri gelebilmektedir. Verilen örneklerde elma varyetesi farklı olmasının yanı sıra, elma soğan ve nane örneklerinin kurutma sıcaklıkları, nem oranları ve dilim kalınlıkları yapılan çalışma ile farklılık göstermektedir.

Tablo 3. Farklı mikrodalga güçleri ile kurutulmuş elma dilimlerinin  $D_{eff}$  ve  $E_a$  değerleri  
 Table 3.  $D_{eff}$  and  $E_a$  values of dried apple slices at different microwave powers

Mikrodalga Gücü	$D_{eff}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$E_a$ ( $D_{eff}$ )( $W \cdot g^{-1}$ )	Kuruma Süresi (dk.)
100 W	$9.72 \times 10^{-10}$		180
200 W	$1.67 \times 10^{-9}$	0.51	105
300 W	$2.36 \times 10^{-9}$		75



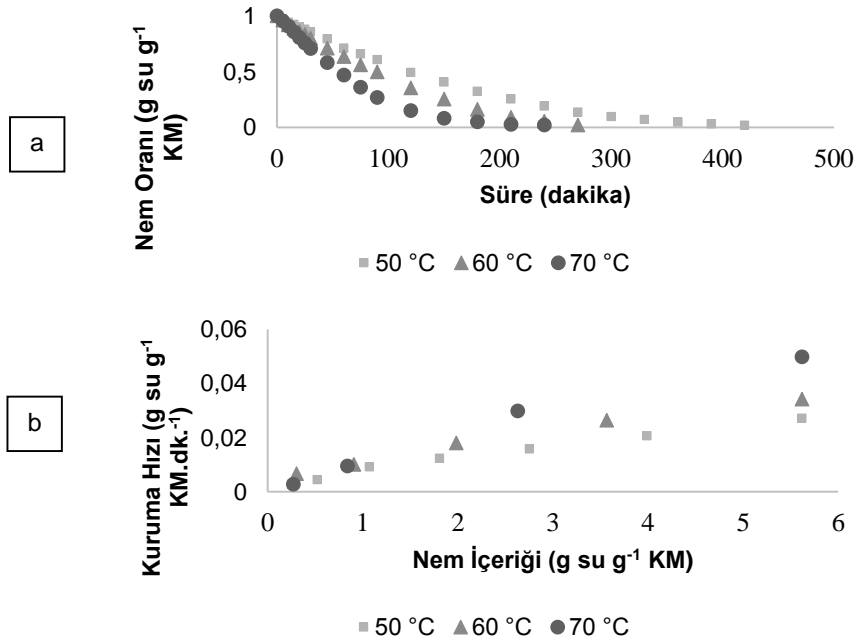
Şekil 2. Farklı mikrodalga güçlerinde  $D_{eff}$  ve numune ağırlığı arasındaki ilişki  
 Figure 2. Relationship between  $D_{eff}$  and sample weight at different microwave powers

### Elma Dilimlerinin Sıcak Hava İle Kurutulması

#### Elma Dilimlerinin Kuruma Hızına Sıcaklığın Etkisi

Elma dilimlerinin farklı sıcaklıklarda kurutulması ile elde edilen nem oranı ve kuruma hızı değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Sıcaklığın kurutma işlemi için en etkili parametrelerden biri olduğu Şekil 3 ve Tablo 5'te görülmektedir. Tablo 5'te de görüldüğü gibi KH artmış ve kuruma süresi kısalmıştır. Farklı meyve türlerinde yapılan çalışmalarda hava hızı ve dilim boyutu dikkate alınmadan sıcaklık artışı ile kurutma hızında artış olduğu, Sacilik ve Elicin [42], Zarein ve ark. [43] ve Beigi [44] tarafından bildirilmiştir. Bu sonuç, yüksek sıcaklıklar nedeniyle gıda ile kurutma havası arasındaki yüksek ısı

transferi ve buna bağlı olarak daha fazla buharlaşma olması nedeniyle kuruma süresinin kısalmasıyla ilişkilendirilmiştir [44]. Tablo 5'te görüldüğü gibi yapılan çalışmada farklı sıcaklıklarda (50, 60 ve 70°C) kurutulan elma örneklerinin nem içerikleri sırasıyla 420, 270 ve 240 dakika boyunca yaklaşık yaş bazda %10 nem içeriğine düşmüştür. Sıcaklığın 50°C'den 60°C'ye, 50°C'den 70°C'ye ve 60°C'den 70°C'ye artırılması ile kuruma süresindeki düşüş sırasıyla %35.71, %42.86 ve %11.11 olarak gerçekleşmiştir. 50–60°C'deki azalma, 60–70°C'den daha yüksek bulunmuştur. Başta sabit sonra azalan hızda kuruma periyodu gözlenmiştir. Zarein ve ark. [43] ve Beigi [44] elma dilimlerinin kurutulması üzerine yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçlar bildirmişlerdir.



Şekil 3. Farklı hava sıcaklıklarında nem oranı (a) ve kuruma hızı (b) değişimi  
 Figure 3. Changes in moisture content (a) and drying rate (b) at different air temperatures

### Sıcak Hava Kurutma Eğrilerinin Modellenmesi

Farklı sıcaklıklarda kurutma işlemine ait matematiksel modellerin istatistiksel parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Tüm modellerin R<sup>2</sup> değerleri Tablo 4'ten de görüldüğü gibi kabul edilebilir değer (0.90) üzerindedir. Tüm kurutma sıcaklıklarında en düşük RMSE ve  $\chi^2$  ve en yüksek R<sup>2</sup> değeri Parabolik model ile elde edilmiş ve bu sonuçlara bağlı olarak sıcak havada kuruma davranışını tanımlamak için en uygun modelin parabolik model olduğu bulunmuştur. Zarein ve ark. [43] ve Beigi [44] Midilli ve ark. modelinin, elma dilimlerinin sıcak hava ile kurutulmasında kuruma eğrilerini tanımlamak için en ideal model olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmalardan farklı olarak, Sacilik ve Elicin [42] sıcak hava ile kurutulmuş elma dilimlerinin deneysel verilerini Logaritmik model ile tanımlamışlardır. Farklı çalışmalarda tespit edilen bu sonuçlara göre, elma

çeşidi, başlangıç nem içeriği, kurutma ekipmanı ve kurutma koşullarına bağlı olarak kurutma işlemi matematiksel modeller farklılık gösterebilmektedir. Tepe ve Tepe [5] Kesikli mikrodalga ve sıcak hava ile kurutmanın elma dilimlerinin kuruma ve rehidrasyon özellikleri üzerindeki etkisini karşılaştırmışlardır. Kesikli mikrodalga kurutma ve sıcak hava ile kurutmada efektif nem difüzyonu sırasıyla  $4.47 \times 10^{-9}$  ve  $2.54 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ve  $38 \times 10^{-10}$ – $6.25 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  aralığında bulunmuşlardır. Kesikli mikrodalga kurutmaya kıyasla sıcak havayla kurutmada daha uzun kuruma süresi, daha yavaş kuruma hızı ve daha az efektif nem difüzyonu elde etmişlerdir. Page modelinin kesikli mikrodalga kurutma eğrilerine en iyi uyumu sağladığını, sıcak hava kurutma eğrileri Parabolik Model tarafından uygun bir şekilde tanımlandığı bildirmişlerdir. Bu sonuçlar elde ettiğimiz sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Tablo 4. Sıcak hava kurutma eğrilerinin model sabitleri ve istatistiksel parametreleri

*Table 4. Statistical parameters and model constants of hot Air drying curves*

Model	Sıcaklık	Model Sabitleri	$\chi^2$	RMSE	R <sup>2</sup>
Lewis	50°C	k= 0.006451	0.001325474	0.03557	0.9905
	60°C	k= 0.008808	0.001781709	0.04095	0.986
	70°C	k= 0.01345	0.001380097	0.03597	0.9903
Page	50°C	k= 0.002438 n= 1.193	0.000278791	0.01592	0.9982
	60°C	k= 0.003387 n= 1.206	0.00059693	0.02295	0.9959
	70°C	k= 0.005491 n= 1.215	6.16217E-05	0.007401	0.9996
Henderson ve Pabis	50°C	k= 0.006742 a= 1.034	0.001123586	0.03196	0.9927
	60°C	k= 0.009219 a= 1.032	0.001689496	0.03861	0.9883
	70°C	k= 0.01439 a= 1.048	0.000946615	0.02878	0.9942
Logaritmik	50°C	k= 0.006997 a= 1.020 c= 0.0168	0.001506473	0.03607	0.9907
	60°C	k= 0.009565 a= 1.016 c= 0.0185	0.002185054	0.04242	0.9859
	70°C	k= 0.01498 a= 1.034 c= 0.0188	0.001380406	0.03349	0.9921
Wang ve Singh	50°C	a= -0.004881 b= 0.000006138	7.44519E-05	0.008227	0.9995
	60°C	a= -0.006785 b= 0.000001174	6.75974E-05	0.007723	0.9995
	70°C	a= -0.01024 b= 0.00002626	0.00043725	0.01956	0.9973
Parabolik	50°C	a= 0.9919 b= -0.004793 c= 0.000005956	5.84353E-05	0.007104	0.9997
	60°C	a= 0.9905 b= -0.006616 c= 0.00001119	3.96739E-05	0.005716	0.9998
	70°C	a= 0.9952 b= -0.01014 c= 0.00002591	0.000497243	0.0201	0.9974

### Sıcak Hava ile Kurutulmuş Elma Dilimlerinin Efektif Difüzyon ve Aktivasyon Enerjisi

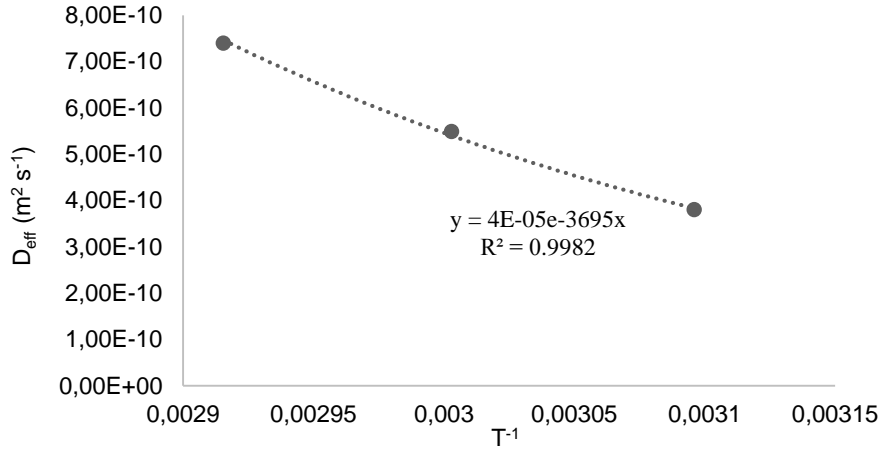
Tablo 5'de D<sub>eff</sub> ve E<sub>a</sub> değerleri verilmiş ve D<sub>eff</sub> değeri  $3.80 \times 10^{-10}$  ile  $7.40 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  arasında bulunmuştur. Sıcaklık artışı elma örneklerinin D<sub>eff</sub> değerini önemli ölçüde artırmıştır. Yapılan çalışma ile elde edilen D<sub>eff</sub> değeri, elma dilimleri üzerine yapılan iki farklı çalışmadaki D<sub>eff</sub> değerleri ile ( $7.03 \times 10^{-10}$ – $1.08 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) [44] ve ( $2.27 \times 10^{-10}$ – $4.97 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) [40] benzer sonuçlar elde edilmiştir. Elma dilimleri ve elma posası ile yapılan iki farklı çalışmadaki D<sub>eff</sub> değerleri ise sırasıyla  $1.79 \times 10^{-9}$ – $4.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  [45] ve  $1.9082 \times 10^{-9}$ – $3.9346 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  [46] bulunmuş ve elde ettiğimiz D<sub>eff</sub> değerlerinden biraz daha düşük

bulunmuştur. Kuruma hızı ile D<sub>eff</sub> değeri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışına paralel olarak elma dilimlerinin nem içeriğinde daha fazla buharlaşma meydana gelmektedir [28]. E<sub>a</sub> değerini veren D<sub>eff</sub> ve T<sup>-1</sup>'in doğal logaritması arasındaki Arrhenius tipi bağıntı Şekil 4'de verilmiştir. Tablo 5'de görüldüğü gibi elma dilimlerinin E<sub>a</sub> değeri  $30.72 \text{ kJ mol}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Elma üzerine yapılan farklı çalışmalarda E<sub>a</sub> değeri, iki farklı elma diliminde sırasıyla  $19.80 \text{ kJ mol}^{-1}$  [44],  $17.77$ – $25.41 \text{ kJ mol}^{-1}$  ve elma posasında  $24.512 \text{ kJ mol}^{-1}$  bulunmuş ve bu değerler yaptığımız çalışmadan daha düşük bulunmuştur. Gıdalar için genel E<sub>a</sub> değerleri, Aghbashlo ve arkadaşları [47] tarafından  $1.27$ – $110 \text{ kJ mol}^{-1}$  aralığında rapor edilmiştir.

Tablo 5. Sıcak hava ile kurutulmuş elma dilimlerinin D<sub>eff</sub> ve E<sub>a</sub> değerleri

*Table 5. D<sub>eff</sub> and E<sub>a</sub> values of hot air dried apple slices*

Sıcaklık	D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	E <sub>a</sub> (kJ.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Kurutma Süresi (dk.)
50°C	$3.80 \times 10^{-10}$	30.72	420
60°C	$5.49 \times 10^{-10}$		270
70°C	$7.40 \times 10^{-10}$		240



Şekil 4. Farklı hava sıcaklıklarında  $D_{eff}$  ve numune ağırlığı arasındaki ilişki  
Figure 4. Relationship between  $D_{eff}$  and sample weight at different air temperatures

## SONUÇ

Yapılan çalışmada farklı mikrodalga güçlerinde ve farklı sıcak hava şartlarında kurutulmuş elma dilimlerinde kurutma özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre farklı mikrodalga güçlerinde kurutma işlemi kurutma hızı ve kurutma süresini önemli derecede etkilemiştir. Farklı mikrodalga güçleri sıcak havaya göre kurutma süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Mikrodalga gücündeki ve kurutma hava sıcaklığındaki artış kurutma hızını artırmış, kurutma süresini ise kısaltmıştır. Mikro dalga gücünün 100W'den 200W'a ve 100W'den 300W'a artırılmasının, 200W'dan 300W'a artırılmasına göre kurutma üzerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Kurutma hızı, artan mikrodalga gücü ve hava sıcaklığı ile artmış ve bu artış oranına paralel olarak  $D_{eff}$  değerinin de arttığı tespit edilmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak  $D_{eff}$  değerindeki artışa, 50-60°C ve 50-70°C arasında değişen sıcaklıktaki artışın etkisi, 60-70°C'den daha yüksek bulunmuştur. Farklı mikrodalga güçlerinde elma dilimlerinin kurutma davranışını en iyi tahmin eden model Page modeli, sıcak hava ile elma dilimlerinin kurutulmasında ise Parabolik model en uygun model olarak tespit edilmiştir.

## Kısaltmalar

NO: nem oranı; KH: kuruma hızı; RMSE: Kök ortalama kare hatası; Na+Δt: zaman farkındaki nem içeriği; Δt: iki ölçüm noktası arasındaki zaman farkı; χ<sup>2</sup>: indirgenmiş ki-kare; R<sup>2</sup>: determinasyon katsayısı; NO<sub>pre</sub>: tahmini NO; NO<sub>exp</sub>: deneysel NO; L: numunenin kurutmadan önceki ilk boyutunun yarı kalınlığı; t: kuruma süresi; E<sub>a</sub>: aktivasyon enerjisi; D<sub>0</sub>: üstel sabit; R: evrensel gaz sabiti T: mutlak sıcaklık; m: ilk numune ağırlığı; P: mikrodalga çıkış gücü

## KAYNAKLAR

- [1] Moscetti, R., Raponi, F., Ferri, S., Colantoni, A., Monarca, D., Massantini, R. (2018). Real-time monitoring of organic apple (var. Gala) during hot-air drying using near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 222, 139-150.
- [2] FAO. (2018). Food and Agricultural Organization statistica database. Retrieved from <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E> (15.03.2022).
- [3] Polat, A., Taskin, O., Izli, N., Asik, B.B. (2019). Continuous and intermittent microwave-vacuum drying of apple: Drying kinetics, protein, mineral content, and color. *Journal of Food Process Engineering*, 42(3), e13012.
- [4] Alibas, I., Zia, M.P., Yilmaz, A., Asik, B.B. (2020). Drying kinetics and quality characteristics of green apple peel (*Mallus communis* L. var. "Granny Smith") used in herbal tea production. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(2), e14332.
- [5] Tepe, T.K., Tepe, B. (2020). The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices. *Heat and Mass Transfer*, 56(11), 3047-3057.
- [6] Kaya, Z.G. (2019). Ultrases Ön İşlemeyle Sıcak Hava ve Mikrodalga Sistemlerinde Kurutulan Elma Dilimlerinin Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- [7] Winiczenko, R., Kaleta, A., Górnicki, K. (2021). Application of a moga algorithm and ann in the optimization of apple drying and rehydration processes. *Processes*, 9(8), 1415.
- [8] Kaya, A., Aydın, O., Demirtaş, C. (2007). Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering*, 96(4), 517-524.
- [9] Yoğurtçu, H. (2014). Mikrodalga fırında limon kurutma: kinetiği ve modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 27-33.
- [10] Amanor-Atiemoh, R., Zhou, C., Abdullaleef Taiye, M., Sarpong, F., Wahia, H., Amoa-Owusu, A., Chen, L. (2020). Effect of ultrasound-ethanol pretreatment on drying kinetics, quality parameters, functional group, and amino acid profile of apple slices using pulsed vacuum drying. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2), e13347.



- [11] Karacaoğlu, C., Gürsoy, O., Yılmaz, Y. (2016). Ultrasonikasyon destekli vakum impregnasyon emdirme tekniği ile muamele işleminin kivi dilimlerinin kuruma kinetiği üzerine etkisi. *Akademik Gıda*, 14(3), 256-266.
- [12] Yıldız, Z., Gökayaz, L. (2020). Rafli doğal konvektif güneş enerjili kurutucuda elma kuruma kinetiğinin incelenmesi. *Engineering Sciences*, 15(1), 34-42.
- [13] Santacatalina, J.V., Contreras, M., Simal, S., Cárcel, J.A., Garcia-Perez, J.V. (2016). Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 28, 100-109.
- [14] Şen, S., Aydın, F. (2020). Experimental investigation of drying kinetics of apple with hot air, microwave and ultrasonic power. *Sādhanā*, 45(1), 1-10.
- [15] da Silva, W.P., Galvão, I.B., e Silva, C.M., de Farias Aires, J.E., de Figueirêdo, R.M.F. (2020). Empirical model for describing continuous and intermittent drying kinetics of apple pieces. *Heat and Mass Transfer*, 56(4), 1263–1274.
- [16] Tepe, F.B. (2020). Hünnap (Z. *Jujuba* Mill) Meyvelerinin Farklı Olgunlaşma Evrelerinde ve Kurutma Sürecinde Bazı Kalite Parametrelerinin Kinetik Analizi. Doktora Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- [17] Yapıcı, B. (2017). Radyo Frekansı Kurutma Yöntemi İle Elma Cipsi Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.
- [18] Khan, M.I.H., Nagy, S.A., Karim, M.A. (2018). Transport of cellular water during drying: An understanding of cell rupturing mechanism in apple tissue. *Food Research International*, 105, 772-781.
- [19] Martynenko, A., Zheng, W. (2016). Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects. *Journal of Food Engineering*, 168, 215-222.
- [20] Ando, Y., Hagiwara, S., Nabetani, H., Sotome, I., Okunishi, T., Okadome, H., Tagawa, A. (2019). Effects of prefreezing on the drying characteristics, structural formation and mechanical properties of microwave-vacuum dried apple. *Journal of Food Engineering*, 244, 170-177.
- [21] Şen, S., Aydın, F. (2020). Experimental investigation of drying kinetics of apple with hot air, microwave and ultrasonic power. *Sādhanā*, 45(1), 1-10.
- [22] Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., Maskan, M. (2018). Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat and Mass Transfer*, 54(2), 425-436.
- [23] Dai, J.W., Xiao, H.W., Zhang, L.H., Chu, M.Y., Qin, W., Wu, Z.J., Yin, P.F. (2019). Drying characteristics and modeling of apple slices during microwave intermittent drying. *Journal of Food Process Engineering*, 42(6), e13212.
- [24] Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Marinou-Kouris, D. (2000). Drying related properties of apple. *Drying Technology*, 18(6), 1251-1267.
- [25] Onwude, D.I., Hashim, N., Janius, R.B., Nawi, N.M., Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599-618.
- [26] Beaudry, C., Raghavan, G.S.V., Rennie, T.J. (2003). Microwave finish drying of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technology*, 21(9), 1797-1810.
- [27] Soysal, Y., Öztekin, S., Eren, Ö. (2006). Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93(4), 403-413.
- [28] Demiray, E., Seker, A., Tulek, Y. (2017). Drying kinetics of onion (*Allium cepa* L.) slices with convective and microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 53(5), 1817-1827.
- [29] Zarein, M., Samadi, S.H., Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 41-47.
- [30] Bi, J., Yang, A., Liu, X., Wu, X., Chen, Q., Wang, Q., Wang, X. (2015). Effects of pretreatments on explosion puffing drying kinetics of apple chips. *LWT-Food Science and Technology*, 60(2), 1136-1142.
- [31] Tepe, F.B., Tepe, T.K., Ekinci, A. (2022). Impact of air temperature on drying characteristics and some bioactive properties of kiwi fruit slices. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 28(2), 151-159.
- [32] Zhang, Z., Liu, Z., Liu, C., Li, D., Jiang, N., Liu, C. (2016). Effects of ultrasound pretreatment on drying kinetics and quality parameters of button mushroom slices. *Drying Technology*, 34(15), 1791-1800.
- [33] Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford.
- [34] Toriki-Harchegani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M., Tohidi, M. (2016). Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Heat and Mass Transfer*, 52(2), 281-289.
- [35] Çelen, S., Haksever, A., Moralar, A. (2017). The effects of microwave energy to the drying of apple (gala) slices. *Karalimas Science Engineering Journal*, 7(1), 228-236.
- [36] Özbek, B., Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549.
- [37] Azimi-Nejadian, H., Hoseini, S.S. (2019). Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato. *Heat and Mass Transfer*, 55(10), 2921-2930.
- [38] Aghilinategh, N., Rafiee, S., Gholikhani, A., Hosseinpour, S., Omid, M., Mohtasebi, S.S., Maleki, N. (2015). A comparative study of dried apple using hot air, intermittent and continuous microwave: evaluation of kinetic parameters and

- physicochemical quality attributes. *Food Science and Nutrition*, 3(6), 519-526.
- [39] Çelen, S., Kahveci, K. (2013). Microwave drying behaviour of apple slices. *Proc Inst Mech Eng, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 227(4), 264-272.
- [40] İzli, N., Polat, A. (2018). Intermittent microwave drying of apple slices: drying kinetics, modeling, rehydration ratio and effective moisture diffusivity. *Journal of Agriculture Science*, 26(1), 32-41.
- [41] Kumar, V., Sharma, H.K., Singh, K. (2016). Mathematical modeling of thin layer microwave drying of taro slices. *Journal of Institution of Engineers (India), Ser A* 97(1), 53–61.
- [42] Sacilik, K., Elicin, A.K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73(3), 281-289.
- [43] Zarein, M., Samadi, S.H., Ghobadian, B. (2013). Kinetic drying and mathematical modeling of apple slices on dehydration process. *Journal of Food Processing Technology*, 4(7), 1-4.
- [44] Beigi, M. (2016). Hot-air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment. *Heat and Mass Transfer*, 52(8), 1435-1442.
- [45] Velić, D.A., Planinić, M., Tomas, S., Bilić, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 97-102.
- [46] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., Hu, X. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40(1), 39-46.
- [47] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2865-2871.
-