



Sıcak havayla kurutulan bademin kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi

Determination of drying characteristics of almond dried by hot air drying

Gizem HET BATTAL^{1*}, Kamil SAÇILIK²

^{1,2} Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölüm, 06130, Ankara, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0003-2822-9379>; ²<https://orcid.org/0000-0001-5353-7328>

To cite this article:

Het Battal, G. & Saçılık, K. (2023). Sıcak havayla kurutulan bademin kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 27(4): 499-514
DOI: 10.29050/harranziraat.1297716

*Address for Correspondence:

Gizem HET BATTAL
e-mail:
gizemhet@gmail.com

Received Date:

16.05.2023

Accepted Date:

21.09.2023

© Copyright 2018 by Harran University Faculty of Agriculture. Available on-line at www.dergipark.gov.tr/harranziraat



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

Öz

Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin konvektif sıcak hava kurutucuda 1 m s⁻¹ hava hızında ve 45-60°C hava sıcaklığında kurutma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Azalan hız periyodunda yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinden nem transferi, Fick difüzyon modeli uygulanarak tanımlanmış ve efektif difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Efektif difüzyon katsayısının sıcaklığa olan bağımlılığı Arrhenius tip ilişki ile tanımlanmıştır. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin aktivasyon enerjisi sırasıyla 30.87 ve 28.05 kJ mol⁻¹ olarak bulunmuştur. Örneklerin deneysel kurutma verileri için Page, Logarithmic, Two-term, Approximation of diffusion ve Midilli ve ark. modelleri kullanılmıştır. Test edilen modellerin kuruma hızı sabitleri ve katsayıları doğrusal olmayan regresyon analizi ile belirlenmiştir. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin kuruma karakteristiklerini belirlemek için test edilen beş model arasından Midilli ve ark. kurutma modeli, elde edilen deneysel verilere en iyi uyumu sağlamıştır. Taze ve kurutulmuş badem örneklerinin su aktivitesi (aw) değerleri, raf ömrü kriteri olarak farklı ortam hava sıcaklıklarında değerlendirilmiştir. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin kurutma entalpisi (ΔH) ve entropisi (ΔS) değerleri, hava sıcaklığının artmasıyla azalırken, Gibbs serbest enerjisi (ΔG) hava sıcaklığındaki artışla artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konvektif hava kurutma, Badem, Nem içeriği, Efektif difüzyon katsayısı, Termodinamik özellikler

Abstract

The drying properties of almond samples were studied experimentally in a hot air drier at air temperature range of 45–60°C in a convective hot-air dryer at an air velocity of 1 m/s⁻¹. The Fick's diffusion model was used to characterize moisture transport from in-shell and in-hull almond samples during the decreasing rate phase, and the effective diffusivity was estimated. The relationship of Arrhenius-type equation was employed to illustrate the temperature-dependent changes in effective diffusion coefficient. In-shell and in-hull almond were found to have activation energies of 30.87 and 28.05 kJ mol⁻¹, respectively. The five models commonly used in the literature were fitted to the experimentally collected almond drying data, and non-linear regression analysis was performed to estimate the constants of the five models. The drying model developed by Midilli et al. had the greatest agreement with the experimental data of all the models examined to explain the drying behavior of the almond. The water activity (aw) values of fresh and dried almond samples were evaluated at different ambient air temperatures as shelf life criteria. While the Gibbs free energy (ΔG) rose with an increase in air temperature, the enthalpy (ΔH) and entropy (ΔS) of drying the almond samples decreased with an increase in temperature.

Key Words: Convective air-drying, Almond, Moisture content, Thermodynamic properties

Giriş

Badem (*Prunus amygdalus* L.), dünyadaki en önemli ve en büyük sert kabuklu yemişlerden biridir (Kester ve Gradziel, 1991; Yıldırım ve ark., 2008). Türkiye, badem üretimi açısından dünyanın önemli ülkelerindedir. Dünya çapında 2021 yılında küresel badem üretimi 4 milyon tonun üzerindedir. Dünyanın en büyük dört badem üreticisi sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri 2189040 ton, İspanya 365210 ton, Avustralya 285605 ton ve 178000 ton ile Türkiye yer almaktadır (FAO, 2021). Ayrıca, Türkiye Cumhuriyeti İstatistik Kurumu (TÜİK) Aralık 2022 yılında meyve, içecek ve baharat bitkilerini içeren en son raporuna göre; Türkiye 2021 yılında 178000 ton badem üretimine sahipken 2022 yılında 190000 ton badem üretimi gerçekleştirmiştir. Böylece bir önceki sezona göre toplam badem üretiminde yaklaşık %6.7 oranında artış meydana gelmiştir (TÜİK, 2021; TÜİK, 2022).

Badem E vitamini, K vitamini, bakır, fosfor, manganez ve magnezyum açısından zengindir (Khalid ve ark., 2021). Bunun yanısıra; badem çekirdeği, son derece düşük su içeriği (%4-6), yüksek düzeyde protein (%18), yağ (%54) ve karbonhidrat (%20) ile çok besleyicidir ve antioksidan içeriği açısından da değerli bir tohumdur (Wareing ve ark., 2000; Safary ve Chayjan, 2016). Badem, yenilebilir ve çiğ veya işlenmiş olarak tüketilebilirken, şekerleme sanayinde, şekerleme, kek ve şeker kaplı badem üretiminde değerlendirilmektedir (Yıldırım ve ark., 2008).

Diğer birçok tarım ürünü gibi badem de hasat edildikten sonra önemli miktarda hasat sonrası işlemeye ihtiyaç duymaktadır. Türkiye'de badem hasat sonrası uygulanan mekanizasyon işlemleri genellikle yıkama, ayırma, kurutma, ayırma, kırma, kavurma ve paketlemedir (Bilim ve Polat, 2008). Farklı işleme aşamaları arasında kurutma, badem endüstrisindeki en önemli süreçtir (Mokhtarian ve ark., 2017). Badem, ekşimeyi önlemek ve kaliteyi korumak için hızlı bir şekilde hasat edilmeli ve 24 saat içinde kurumaya hazırlanmalıdır (Gazor ve ark., 2009).

Kurutma, ürün kalite kontrolü ve tarım

ürünlerinin muhafazası için hayati önem taşımaktadır. Kurutma işlemi, ürünlerin nem içeriğini ve su aktivitesini belirli bir düzeye kadar düşürebilmektedir (Oliveira ve ark., 2010). Çok yüksek nem içeriği ve su aktivitesi mikroorganizmaların üremesine ve üründe fermantasyona neden olarak ürünün kalitesini bozabilirken, çok düşük nem içeriği ve su aktivitesi ise aşırı enerji tüketimine ve ürün kalitesinde bozulmalara neden olabilmektedir (Correa, 2010; Oliveira ve ark., 2011).

Hasattan sonra bademler, %6'dan (y.b.) daha az su içeriğine ulaşana kadar birkaç hafta veya ay boyunca kurutulur (Monteiro ve ark., 2003), bu da 0.7'den düşük a_w 'ye karşılık gelmektedir. Bu şekilde, bademler, yeterli çevre koşulları (esas olarak nem) korunursa, gözle görülür bir değer kaybı olmadan en uzun depolama sürelerine dayanan meyveler olarak kabul edilmektedir (Campbell ve ark., 2003; Schade ve ark., 1975; Schatzki ve Ong, 2001).

Termodinamik parametreler, biyolojik sistemlerde suyun özelliklerinin anlaşılması ile ısı ve kütle transferi için gerekli olan enerjinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Iglesias ve ark., 1976; Dalgıç ve ark., 2012). Kurutma işlemleri sırasında tarım ürünlerinin termodinamik özelliklerini anlamak, bu süreçte gerekli enerjiyi hesaplamak, adsorbe edilen suyun özelliklerini incelemek ve gıdanın mikro yapısını ve yüzeyinde meydana gelen fiziksel olayları değerlendirmek için de önemlidir (Corrêa ve ark., 2010; Silva ve ark., 2019). Ayrıca, entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi gibi termodinamik özelliklerin iyi anlaşılması, nem içeriğini güvenli depolama seviyelerine indirmek için mümkün olan en az enerjiyle sağlarken, uzun süre saklanabilen bir ürün elde etmek için tarımsal ürünlerin kurutulması gereken son noktayı tahmin etmede gerekli olmaktadır (Resende ve ark., 2017). Entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi, sırasıyla suyun bileşenlerle etkileşiminin, su-kuru madde ilişkisinin mekansal düzenlenmesinin ve ürünün bileşenleriyle suya olan ilgisini yansıtmaktadır (Junior ve ark., 2021).

Sert kabuklu yemişlerin kalite özellikleri genellikle kurutma koşullarına duyarlıdır. Önceki çalışmalar

incelendiğinde, badem (Nakariyakul ve Casasent, 2011; Rogel-Castillo ve ark., 2016) ve macadamia fındıklarının (Nakariyakul ve Casasent, 2011; Le Lagadec, 2009; Walton ve ark., 2013) kurutma sırasında bazı sorunları ortaya çıkmıştır. Kalite kusurları, kurutma sıcaklığı ve kurutma hızları ile ilgili olabilmektedir. Daha düşük kurutma sıcaklığının üründe meydana gelen kusurları azaltabileceğini öne sürmüştür (Pearson, 1998). 55°C'nin altında kurutulan yüksek nemli bademlerin, daha yüksek sıcaklıklarda kurutulanlara göre daha kusurlu olduğunu ifade etmiştir (Rogel-Castillo ve ark., 2017). Kotiledonların (çenek) bölünmesini önlemek için bademler 40°C'nin üzerinde ısıtılmamalı ve kurutulmaması gerektiğinden bahsetmiştir (Coates, 2018). Bununla birlikte, kurutulmuş bademlerin kalite kusurları ile sıcak hava kurutma koşulları arasındaki ilişki henüz net olarak belirlenmemiştir.

Ceviz, badem ve antep fıstığı gibi kuruyemişler için sıcak hava (Chen ve ark., 2020), kızılötesi (Venkitasamy ve ark., 2018; Yang ve ark., 2010), radyo frekansı (Li ve ark., 2018) ve fırın ısıtması (Fu ve ark., 2016) gibi farklı kurutma teknolojileri çalışılmıştır. Bu yöntemler arasında, yüksek kurutma kapasitesi ve nispeten düşük işletme maliyeti nedeniyle (Chen ve ark., 2020), sıcak hava ile derin yataklı silo kurutma, ceviz ve tahıllar için yaygın olarak uygulanmaktadır (Jia ve ark., 2016). Bademlerin tek tabaka kurutma özellikleri literatürde konveksiyonlu fırın tipi kurutucularda çalışılmış olmasına rağmen (Rogel-Castillo ve ark., 2017), kurutma sistemlerinin tasarımı ve kurutma koşullarının seçimi ve güvenli depolanması için termodinamik özellikler ile su aktivitesi (a_w) değerleri hakkında az bilgi mevcuttur. Bu çalışmada, yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu bademlerin konvektif bir sıcak hava kurutucusunda kuruma karakteristikleri araştırılmış ve farklı ortam hava sıcaklıklarında

kurutulmuş badem örneklerinin kuruma kinetikleri ile su aktivitesi değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, kızılötesi kurutucu ile hurma örneklerinin kurutulmasında Henderson ve Pabis, Newton, Page, Logarithmic, Two-term, Two-term exponential, Wang ve Singh, Approximation of diffusion, Midilli ve ark. ince tabaka matematiksel kurutma modelleri kullanılarak en uygun model araştırılmış (Taşkın ve İzli, 2017), kiraz domatesi iki farklı yöntem kurutucu ve mikrodalga kullanılarak elde edilen deneysel veriler, literatürde yer alan 13 farklı modele uyarlanmış olup Logarithmic, Wang ve Singh ve Midilli ve ark modelleri en iyi uyum göstermiştir (Kutlu ve Aslı, 2016). Çalışmamızda deneysel nem oranı verileri, yaygın olarak kullanılan beş matematiksel eşitlikle modellenmiş ve bademlerin efektif difüzyon katsayısı, aktivasyon enerjisi ile entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi gibi termodinamik parametreleri bu çalışmada belirlenmiştir.

Material and Method

Materyal

Yeşil dış kabuklu badem örnekleri Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ayaş Bahçe Kùltürleri Araştırma Uygulama temin edilmiştir. Yeşil dış kabukları henüz açılmaya başlamış badem örnekleri ağaçtan elle hasat edilmiştir. Daha sonra nemlerini kaybetmemeleri için özel bir kutu içerisinde hemen laboratuvara taşınmış ve kurutma deneylerine kadar 4°C'de buzdolabında saklanmıştır. Kurutma deneylerinden en az 12 saat önce buzdolabından çıkarılarak ortam sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Kurutma denemeleri hem yeşil dış kabuklu hem de yeşil dış kabukları elle soyularak elde edilen sert kabuklu badem ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



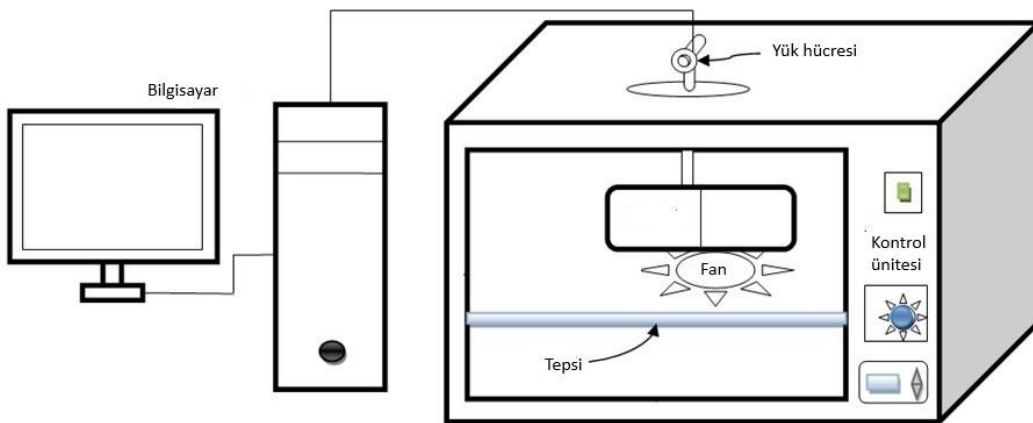
Şekil 1. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem
Figure 1. In-hull and in-shell almond

Örneklerin başlangıç nem içeriği, 105°C'ye ayarlanmış Halojen Nem Tayin Cihazı HB43-S (Mettler Toledo-AG, Zürih, İsviçre) kullanılarak belirlenmiştir. Bu deneyler, kabul edilebilir bir ortalama elde etmek için en az üç kez tekrarlanmıştır. Kurutmadan sonra, yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerin yaş baza (y.b.) göre başlangıç nem içerikleri ortalaması sırasıyla %40.48 ve %22.48 olarak bulunmuştur.

Deney düzeneği

Kurutma deneyleri, daha önce detayları Sacilik ve ark., 2010 verilen sıcak hava akışlı konvektif bir kurutucuda gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli konvektif sıcak hava kurutucu, 57 cm

yükseğinde, 68 cm genişliğinde ve 57 cm derinliğindedir (Şekil 2). Bu kurutucu, hava akışını sağlayan fan, elektrikli ısıtıcı, sıcaklık ve bağıl nem ölçüm sistemi ile tartı sisteminden oluşmaktadır. Fan hızı bir hız değiştirici ile ayarlanarak hava akış hızı değiştirilmiştir. Tüm kurutma deneyleri için hava hızı 1 ms⁻¹de sabit tutulmuştur. Örnekler 12 cm yüksekliğinde 576 cm²'lik delikli bir sepet içinde kurutulmuştur. Kurutma sepetindeki örneklerden nem kaybı, bir yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm sistemi ile tartım sisteminden elde edilen veriler, kurutma işlemi boyunca özel olarak geliştirilmiş bir yazılım yardımıyla sürekli olarak bir bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan sıcak hava akışlı kurutma sistemi
Figure 2. The schematic diagram of hot-air drying system used in experiments

Kurutma işlemleri kontrollü olarak 45, 50, 55 ve 60°C hava sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir.

Kurutucu en az 30 dakika çalıştırılarak çalışma sıcaklıkları için stabil şartlara ulaşması sağlanmıştır.

Ardından bademler, örnek sepetine ince bir tabaka halinde eşit bir biçimde yerleştirilmiştir. Her deneyde yaklaşık 100 g badem örneği kullanılmıştır. Kurutma işlemi sırasında örneklerin kütlesi, yazılım tarafından sürekli olarak 10 dakika aralıklarla bir bilgisayara kaydedilmiştir. Kurutma işlemleri, kütlelerinde başka bir değişiklik gözlemlenmeyene kadar sürdürülmüştür. Kurutulan örnekler 10 dakika soğutulduktan sonra aynı gün içerisinde su aktivitesi (aw) ölçümleri, Rotronic HygroLab II su active cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Cihaz, su aktivitesi ölçüm sistemi 0-0.99 aw aralığında ve ölçüm sıcaklığı -10 ile 55°C arasında ölçüm yapabilmektedir. 20, 25, 30, 35 ve 40°C ortam sıcaklıklarını elde etmek için su aktivitesi ölçerin ölçüm probu ve örnek kutusu, konvektif bir sıcak hava kurutucusuna yerleştirilmiştir. Denge bağıl nemi ve denge sıcaklığına ulaşıncaya kadar denemeler devam etmiştir.

Matematiksel modelleme

Deneysel nem oranı verileri (M_R), literatürde yaygın olarak kullanılan beş matematiksel eşitlikle

modellenmiştir (Çizelge 1). Deneysel nem oranı verileri (M_R), Eşitlik 1’de gösterilmektedir:

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Burada, M_R boyutsuz nem oranıdır, M , M_e ve M_0 sırasıyla herhangi bir andaki nem içeriği, denge nem içeriği ve % w.b. cinsinden başlangıç nem içeriğidir.

Kuruma hızı (DR), Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$DR = \left(\frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

Burada, M_t herhangi bir t anında ürünün nem içeriğidir (%w.b.), $M_{t+\Delta t}$, $t+\Delta t$ (%w.b.) anındaki nem içeriğidir ve t (dakika), kuruma süresidir.

Çizelge 1. Badem kurutmada kullanılan beş ince tabakalı kurutma modelleri

Table 1. Five thin-layer drying models used in almond drying

Model adı	Model	Referans
Page	$M_R = \exp(-kt^m)$	El-Mesery ve ark. (2022)
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$	Tarafdar ve ark. 2021
Two-term	$M_R = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0t)$	Sahoo ve ark. (2022)
Approximation of diffusion	$M_R = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Meerasri ve Sothornvit (2022)
Midilli et al.,	$M_R = a \exp(-kt^m) + bt$	Polat ve Izli (2022), Midilli ve ark. (2002)

Modellerin parametreleri doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. En uygun modeli seçmek için belirleme katsayısı R^2 , ortalama bağıl hata E_{MD} , kare köklerinin standard hatası E_{RMS} ve indirgenmiş ki-kare χ^2 kullanılmıştır. Bu karşılaştırma kriterleri yöntemleri Eşitlik 3-5’e göre hesaplanmıştır (Sacilik ve ark., 2010; Yurtlu, 2011):

$$E_{MD} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_{R,ex,i} - M_{R,pre,i}|}{M_{R,ex,i}} \quad (3)$$

$$E_{RMS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{R,ex,i} - M_{R,pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,ex,i} - M_{R,pre,i})^2}{N - z} \quad (5)$$

Burada, M_R, ex,i ; i’inci deneysel boyutsuz nem oranıdır, M_R, pre,i ; i’inci tahmin edilen boyutsuz nem oranıdır, N gözlem sayısıdır ve z sabitlerin sayısıdır. En iyi modeli seçmek için birincil karşılaştırma kriteri olarak R^2 dikkate alınmıştır. Ayrıca badem örneklerinin kuruma kinetiklerini açıklayan en uygun modeli seçmek için E_{MD} , E_{RMS} ve χ^2 ’nin en düşük değerleri kullanılmıştır (Sacilik ve ark., 2006).

Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi

Gıda kurutma işleminde, belirli kurutma koşulları altında gıdadan yüzeye hareket eden ürün neminin hareketi, nem difüzyonu olarak tanımlanmaktadır. Efektif difüzyon katsayısı, nem içeriği ve kuruma süresinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmekte ve kurutma sıcaklığı ile değişmektedir (Daş ve ark., 2021). D_{eff} , Fick Difüzyon denkleminin Eşitlik 6'da küre için verilen basitleştirilmiş formu kullanılarak hesaplanmıştır (Yurtlu ve ark., 2022):

$$\ln(M_R) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{R_e^2}\right) \quad (6)$$

Burada R_e , m cinsinden kurutulan bademin eşdeğer yarıçapıdır ve D_{eff} $m^2 s^{-1}$ cinsinden etkin yayılmadır.

Efektif difüzyon değerleri, $\ln(M_R)$ grafiğinin eğimine karşı kuruma süresinden (t) belirlenmiştir.

Efektif nem difüzyonunun sıcaklığa bağlılığı, Arrhenius tip bağıntı kullanılarak Eşitlik 7 ile tanımlanmıştır. Aktivasyon enerjisi (E_a) değerleri, $\ln(D_{eff})$ ile mutlak sıcaklığın (T_a) tersi grafiğinden hesaplanmıştır (Taraftar ve ark., 2021).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (7)$$

Burada, D_0 , Arrhenius denkleminin $m^2 s^{-1}$ cinsinden ön üstel faktörüdür, E_a , $kJ mol^{-1}$ cinsinden aktivasyon enerjisidir, R , $kJ molK^{-1}$ cinsinden evrensel gaz sabitidir ve T_a , K cinsinden mutlak hava sıcaklığıdır.

Termodinamik özellikler

Kurutulan bademlerin termodinamik özellikleri olan entalpi (ΔH), entropi (ΔS) ve Gibbs serbest enerjisi (ΔG) sırasıyla Eşitlik 8, 9 ve 10 kullanılarak hesaplanmıştır (Yıldırım, 2021; Moura ve ark., 2021):

$$\Delta H = E_a - RT_a \quad (8)$$

$$\Delta S = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_b}{h_p} - \ln T_a \right) \quad (9)$$

$$\Delta G = \Delta H - T_a \Delta S \quad (10)$$

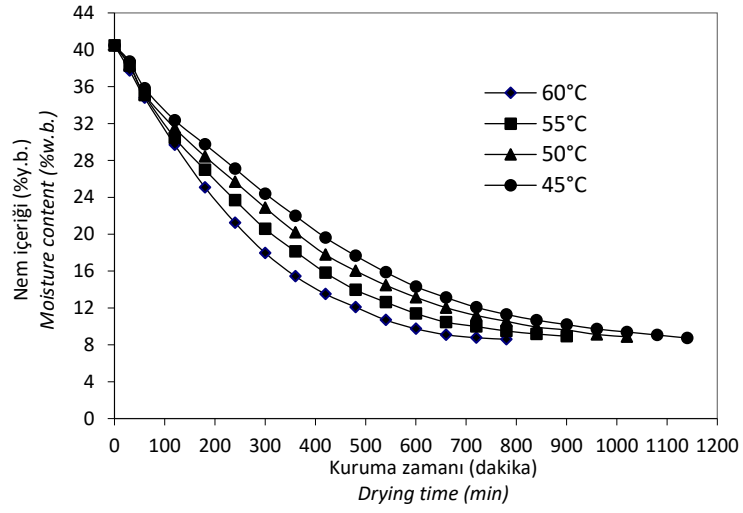
Burada ΔH , ΔS , ΔG , k_b ve h_p sırasıyla entalpi

değişimi ($kJ mol^{-1}$), entropi değişimi ($kJ molK^{-1}$), Gibbs serbest enerjisi değişimi ($kJ mol^{-1}$), k_b ise Boltzmann sabiti ($1.38 \times 10^{-23} J K^{-1}$) ve h_p , Planck sabitidir ($6.626 \times 10^{-34} J s^{-1}$).

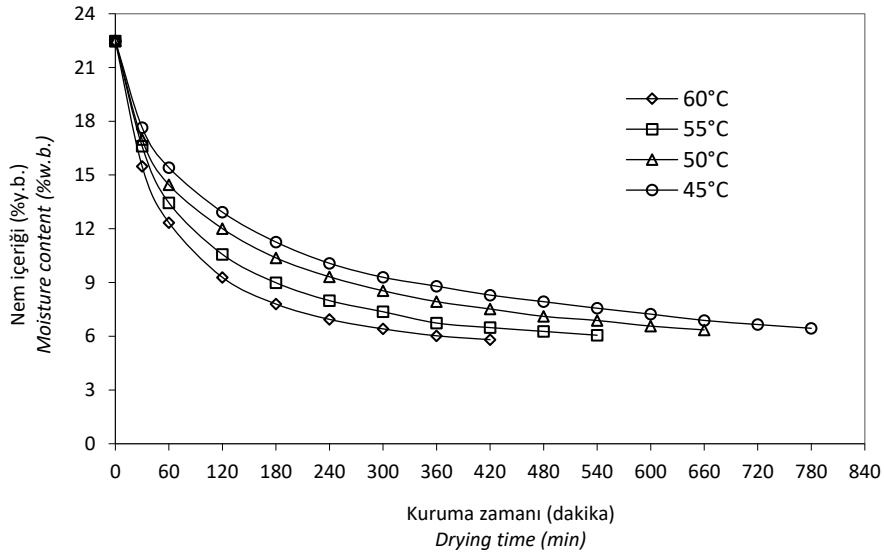
Araştırma Bulguları ve Tartışma

Kurutma kinetiği

Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin değişik hava sıcaklıklarında kurutulmasında nem içeriğinin kuruma süresi ile değişimleri sırasıyla Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Ortalama başlangıç nem içeriği yaklaşık %40.48 ve %22.48 (y.b.) olan yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örnekleri kütlelerinde herhangi bir değişiklik gözlenmeyene kadar sırasıyla yaklaşık %9 ve %6 (y.b) son nem içeriğine kadar kurutulmuştur. Bu eğrilerden, örneklerin nem içeriğinin kuruma süresi ile sürekli olarak azaldığı ve tüm durumlarda daha yüksek sıcaklıklarda daha hızlı olduğu açıkça görülmektedir. Başlangıçta nem içeriği hızla azalmış ve ardından nem içeriğindeki düşüş beklendiği gibi önemli ölçüde yavaşlamıştır.



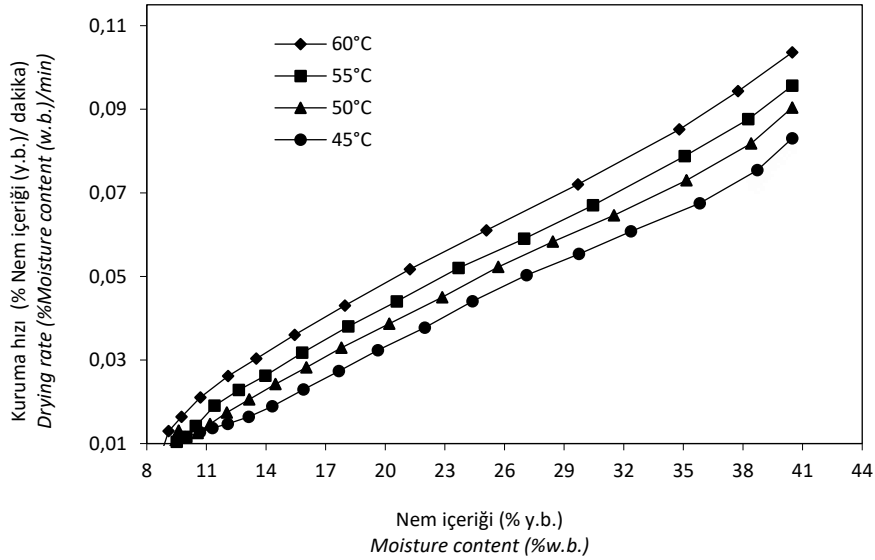
Şekil 3. Yeşil dış kabuklu badem örneklerinin nem içeriğindeki değişimler
Figure 3. Changes in moisture content with the drying time for in-hull almond samples



Şekil 4. Sert kabuklu badem örneklerinin nem içeriğindeki değişimler
Figure 4. Changes in moisture content with the drying time for in-shell almond samples

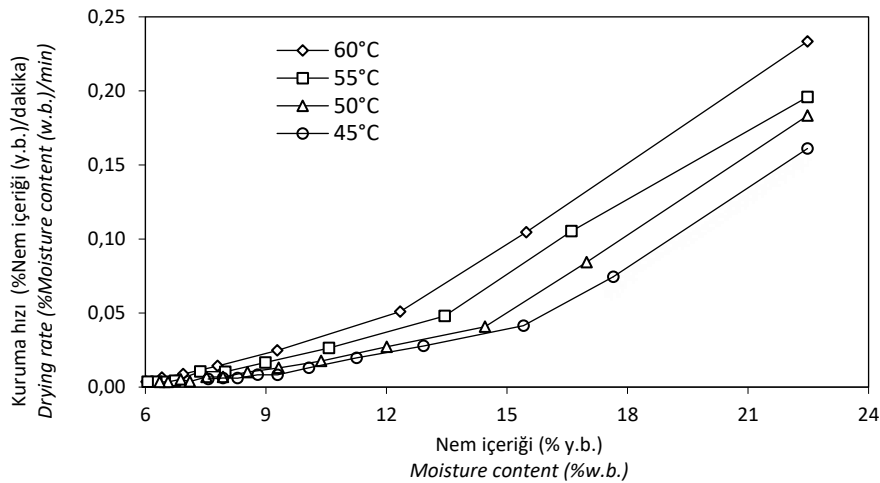
Şekil 3’de görüldüğü gibi yeşil dış kabuklu badem örneklerinin ilk nem içeriğinden son nem içeriğine kadar geçen kurutma süresi, 45, 50, 55 ve 60°C hava sıcaklıkları için sırasıyla 1140, 1020, 900 ve 840 dakika olmuştur. Sert kabuklu badem örnekleri için ise bu süreler aynı sırasıyla 780, 660, 540 ve 420 dakika olmuştur. Hava sıcaklığındaki artış beklendiği gibi badem örneklerin nem içeriği üzerine önemli bir etkiye sahip olmuş ve hava sıcaklığının artması kuruma süresinin

kısalmasına neden olmuştur. Diğer araştırmacılar da benzer yaklaşımları ifade etmişlerdir (Doymaz, 2003; Ertekin ve Yıldız, 2004; Öztekin ve Saçılık, 2020). Şekil 5 ve 6 sırasıyla yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin nem içeriği ile kuruma hızının değişimini göstermektedir. Yeşil dış kabuklu bademlerin sert kabuklu badem örneklerine göre daha yavaş bir kuruma hızı gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Belirtilen hava sıcaklıklarında yeşil dış kabuklu badem örnekleri için nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak kuruma hızının değişimi

Figure 5. Variation of drying rate as a function of moisture content for in-hull almond samples at indicated air temperatures



Şekil 6. Belirtilen hava sıcaklıklarında sert kabuklu badem örnekleri için nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak kuruma hızının değişimi

Figure 6. Variation of drying rate as a function of moisture content for in-shell almond samples at indicated air temperatures

Kuruma hızı eğrilerinde görüldüğü gibi tüm kurutma işlemleri azalan hızda kuruma periyodunda gerçekleşmiştir. Azalan hızda kuruma periyodunda nem içeriği azaldıkça ve kuruma süresi arttıkça kuruma hızı sürekli olarak azalmıştır. Bu da örneklerden nemi uzaklaştırmak için difüzyonun en önemli etken olduğunu göstermektedir (Kayran ve Doymaz, 2021). Daha yüksek kurutma havası sıcaklıkları kuruma hızını artırırken kuruma süresini azaltmıştır. Bunun nedeni, hava ile örnekler arasındaki ısı transferinin artması ve içlerindeki nem transferinin hızlanmasıdır. Sonuçlar diğer

araştırmacıların bulguları ile uyum sağlamaktadır (Eminoğlu ve ark., 2019; Nguyen ve ark., 2019; Tarafdar ve ark., 2021; Dhurve ve ark., 2021; Sahoo ve ark., 2022).

Matematiksel modelleme

Doğrusal olmayan regresyon analizi sonuçlarına göre yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örnekleri için test edilen beş modelin model katsayıları ile kıyaslama kriterleri olan R^2 , E_{MD} , E_{RMS} ve χ^2 kriterleri Çizelge 2'de verilmiştir. Her durumda beş modelin tümünün R^2 değerleri 0.9819 değerinden büyüktür ve

deneysel verilerle yeterli bir uyum sağlamıştır. Her iki badem grubunda E_{MD} değerleri %10'un altında olduğundan tüm modeller kabul edilebilir düzeydedir. Ancak E_{RMS} ve χ^2 kıyaslama kriterlerine göre, her iki badem grubunda test edilen sıcaklıklarda Midilli ve ark. modeli, diğer dört modele göre daha iyi performans göstermiştir. Çizelge 2'de görüldüğü gibi, yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örnekleri için

en yüksek R^2 değerleri ve en düşük E_{MD} , E_{RMS} ve χ^2 değerleri, Midilli ve ark. kurutma modelinde elde edilmiştir. Buna göre Midilli ve ark. modeli, her iki badem grubunda badem örneklerinin sıcak havayla kuruma davranışını temsil etmeye uygun model olarak seçilmiştir.

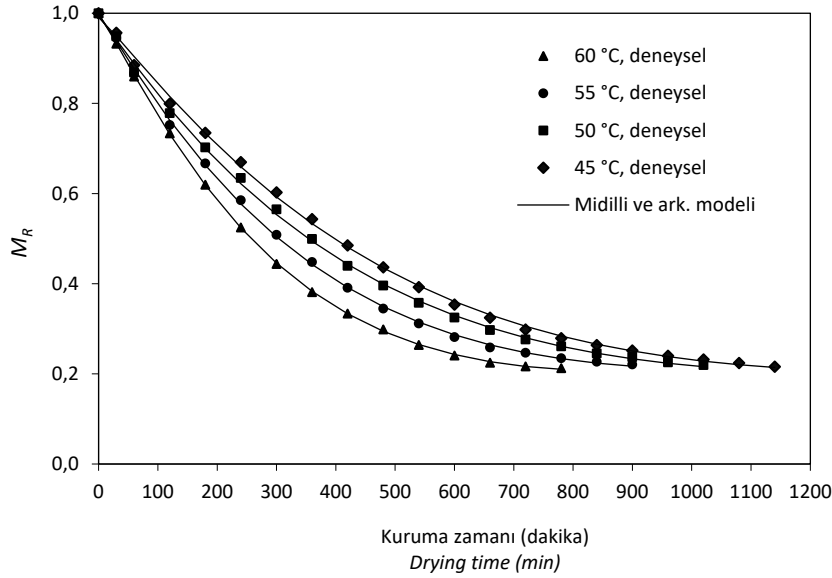
Çizelge 2. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örnekleri için modellerin parametre tahminleri ve karşılaştırma kriterleri
Table 2. Model constants and statistical results of the models for in-hull and in-shell almond samples

	°C	Model no Model number	Model katsayıları Model coefficient	R^2	E_{MD}	E_{RMS}	χ^2
Sert kabuklu badem In-shell almond	45	1	$k=0.3931; n=0.4696$	0.9948	2.76	1.55×10^{-2}	2.84×10^{-4}
		2	$a=0.6301; k=0.4277; c=0.3168$	0.9825	4.94	2.96×10^{-2}	10.53×10^{-4}
		3	$a=0.5403; k_0=0.0516; b=0.4492; k_1=0.9474$	0.9975	1.61	1.14×10^{-2}	1.61×10^{-4}
		4	$a=0.4551; k=0.9913; b=0.0529$	0.9974	1.66	1.14×10^{-2}	1.56×10^{-4}
		5	$a=1.0021; k=0.3900; n=0.5752; b=0.0086$	0.9992	1.24	0.65×10^{-2}	5.20×10^{-5}
	50	1	$k=0.4446; n=0.4597$	0.9951	2.88	1.57×10^{-2}	3.01×10^{-4}
		2	$a=0.6413; k=0.5425; c=0.3118$	0.9819	5.21	3.16×10^{-2}	12.53×10^{-4}
		3	$a=0.4653; k_0=1.1575; b=0.5275; k_1=0.0613$	0.9973	2.18	1.29×10^{-2}	2.14×10^{-4}
		4	$a=0.4697; k=1.1899; b=0.0520$	0.9972	2.22	1.24×10^{-2}	1.94×10^{-4}
		5	$a=1.0012; k=0.4473; n=0.5707; b=0.0104$	0.9996	0.74	0.49×10^{-2}	3.16×10^{-5}
	55	1	$k=0.5079; n=0.4723$	0.9901	4.68	2.44×10^{-2}	7.69×10^{-4}
		2	$a=0.6816; k=0.7205; c=0.2931$	0.9906	4.74	2.52×10^{-2}	8.47×10^{-4}
		3	$a=0.4546; k_0=0.0628; b=0.5415; k_1=1.1397$	0.9987	1.86	0.98×10^{-2}	1.36×10^{-4}
		4	$a=0.5436; k=1.154; b=0.0549$	0.9987	1.86	0.93×10^{-2}	1.15×10^{-4}
		5	$a=1.0020; k=0.5243; n=0.6359; b=0.0173$	0.9989	1.26	0.91×10^{-2}	1.16×10^{-4}
	60	1	$k=0.5896; n=0.4721$	0.9920	4,67	2.37×10^{-2}	7.92×10^{-4}
		2	$a=0.7026; k=0.9375; c=0.2804$	0.9931	4.37	2.38×10^{-2}	8.54×10^{-4}
		3	$a=0.4272; k_0=0.0769; b=0.5695; k_1=1.3604$	0.9990	0.39	0.40×10^{-2}	2.75×10^{-5}
		4	$a=0.5713; k=1,3732; b=0,0564$	0.9990	1.30	0.68×10^{-2}	7.02×10^{-5}
		5	$a=0.9994; k=0.6185; n=0,6092; b=0.0176$	0.9991	0.65	0.36×10^{-2}	2.24×10^{-5}
Yeşil dış kabuklu badem In-hull almond	45	1	$k=0.1242; n=0.8928$	0.9950	4.56	1.87×10^{-2}	3.93×10^{-4}
		2	$a=0.8797; k=0.1294; c=0.1267$	0.9981	2.49	1.16×10^{-2}	1.53×10^{-4}
		3	$a=0.9965; k_0=0.1059; b=0.0027; k_1=-0.1839$	0.9992	1.44	0.78×10^{-2}	7.02×10^{-5}
		4	$a=0.9971; k=0.1062; b=-1.7082$	0.9992	1.42	0.76×10^{-2}	6.59×10^{-5}
		5	$a=0.9910; k=0.0995; n=1.0875; b=0.0109$	0.9990	1.30	0.87×10^{-2}	8.71×10^{-5}
	50	1	$k=0.1424; n=0.8742$	0.9956	4.13	1.76×10^{-2}	3.54×10^{-4}
		2	$a=0.8670; k=0.1474; c=0.1363$	0.9986	2.03	1.00×10^{-2}	1.14×10^{-4}
		3	$a=0.0711; k_0=-0.1532; b=0.9896; k_1=0.1209$	0.9993	1.07	0.73×10^{-2}	6.29×10^{-5}
		4	$a=0.9910; k=0.1224; b=-1.1556$	0.9993	1.02	0.72×10^{-2}	6.01×10^{-5}
		5	$a=0.9939; k=0.1209; n=1.0470; b=0.0071$	0.9991	1.16	0.83×10^{-2}	7.99×10^{-5}
	55	1	$k=0.1614; n=0.8751$	0.9944	4.89	2.06×10^{-2}	4.91×10^{-4}
		2	$a=0.8667; k=0.1760; c=0.1438$	0.9988	2.16	0.09×10^{-2}	1.10×10^{-4}
		3	$a=0.9958; k_0=0.1421; b=0.0072; k_1=-0.1792$	0.9996	0.89	0.05×10^{-2}	3.20×10^{-5}
		4	$a=0.9940; k=0.1406; b=-1.3563$	0.9996	0.89	0.05×10^{-2}	3.11×10^{-5}
		5	$a=0.9982; k=0.1402; n=1.0638; b=0.090$	0.9995	1.03	0.62×10^{-2}	4.68×10^{-5}
	60	1	$k=0.1807; n=0.8954$	0.9936	5.24	2.29×10^{-2}	6.20×10^{-4}
		2	$a=0.8813; k=0.2063; c=0.1351$	0.9987	2.23	1.06×10^{-2}	1.36×10^{-4}
		3	$a=0.0056; k_0=-0.2226; b=1.0035; k_1=0.1681$	0.9997	0.80	0.51×10^{-3}	3.24×10^{-5}
		4	$a=0.9967; k=0.1636; b=-1.5918$	0.9995	1.02	0.62×10^{-2}	4.62×10^{-5}
		5	$a=0.9987; k=0.1592; n=1.1016; b=0.0109$	0.9999	0.47	0.23×10^{-2}	0.65×10^{-5}

Şekil 7 ve 8'de belirtilen hava sıcaklıklarında yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örnekleri

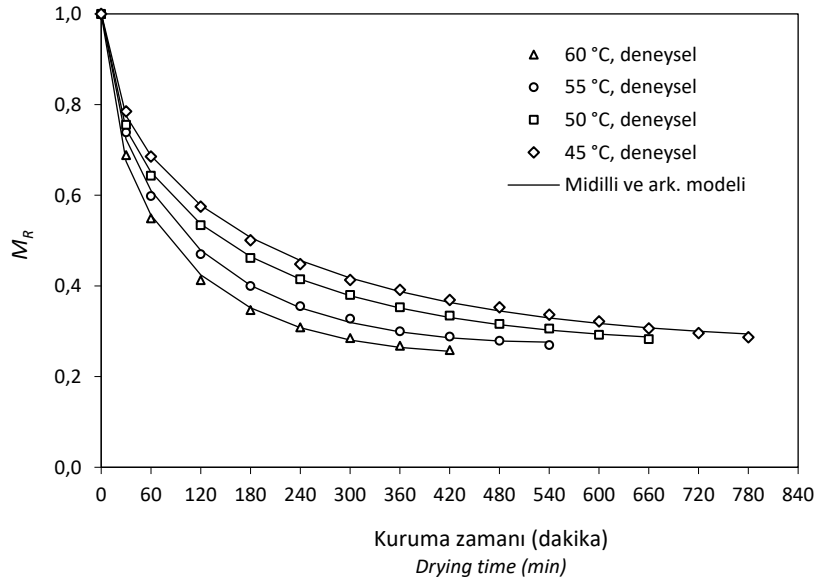
için Midilli ve ark. kurutma modeli kullanılarak elde edilen deneysel ve tahmin edilen nem oranının karşılaştırması göstermektedir. Bu şekillerde görüldüğü gibi, önerilen modeller deneysel ve tahmin edilen nem oranları arasında iyi bir uyum

sağlamıştır. Bunlar, badem örneklerinin kuruma davranışını tanımlamada Midilli ve ark. kurutma modelinin diğer modellere göre üstünlüğünü göstermektedir.



Şekil 7. Yeşil dış kabuklu badem örnekleri için Midilli ve ark. modeli kullanılarak elde edilen deneysel ve tahmin edilen nem oranının karşılaştırılması

Figure 7. Comparison of the experimental and predicted moisture ratio obtained using the Midilli et al. model for in-hull almond samples at indicated air temperatures



Şekil 8. Sert kabuklu badem örnekleri için Midilli ve ark. modeli kullanılarak elde edilen deneysel ve tahmin edilen nem oranının karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of the experimental and predicted moisture ratio obtained using the Midilli et al. model for in-shell almond samples at indicated air temperatures

Su aktivitesi

Kabuklu yağlı yemişler için a_w değerleri, küf oluşumunu ve aflatoxin kontaminasyonunu

önlemek için kısa süreli depolamada 0.82, uzun süreli depolamada 0.70 olmalıdır. Bunun yanısıra kabuklu yemişlerin mikroorganizma gelişimi için a_w limitleri 0.65 ile 0.75 arasında olduğu tespit edilmiştir (Fontana, 2000; Aktas ve Polat, 2007). Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin çeşitli

ortam sıcaklıklarında elde edilen a_w değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Her iki kurutulmuş badem grubunda elde edilen a_w değerlerinin 0.56'dan küçük olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen a_w

değerleri, uzun süreli depolama esnasında mantar ve küf gelişiminin önlenmesi için kritik değer in altında bulunmuştur.

Çizelge 3. Çeşitli ortam sıcaklıklarında taze, sert kabuklu ve yeşil dış kabuklu badem örneklerinin a_w değerleri
Table 3. Water activity values of fresh, in-shell and in-hull almond samples at different temperatures

Ortam sıcaklığı (°C) Air temperature (°C)	Taze Fresh	Sert kabuklu badem - a_w In-shell almond - a_w			
		45°C	50°C	55°C	60°C
20	0.9131	0.4861	0.4793	0.4721	0.4691
25	0.9312	0.4988	0.4805	0.4752	0.4712
30	0.9370	0.5088	0.4983	0.4906	0.4811
35	0.9465	0.5058	0.5005	0.4948	0.4856
40	0.9546	0.5094	0.5024	0.5004	0.4905
Ortam sıcaklığı (°C) Air temperature (°C)	Taze Fresh	Yeşil dış kabuklu badem - a_w In-hull almond - a_w			
		45°C	50°C	55°C	60°C
20	0.9321	0.5145	0.5012	0.4980	0.4896
25	0.9496	0.5225	0.5194	0.5087	0.4998
30	0.9513	0.5304	0.5225	0.5132	0.5054
35	0.9601	0.5413	0.5355	0.5294	0.5167
40	0.9689	0.5547	0.5404	0.5325	0.5255

Efektif difüzyon katsayısı ve aktivasyon enerjisi

Her iki badem örnekleri için D_{eff} değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu bademler için D_{eff} değerleri sırasıyla 2.123×10^{-10} ile 3.643×10^{-10} ve 2.502×10^{-10} ile $3.955 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ arasında değişmiştir. Bu değerler tarımsal ürünler için 10^{-9} – $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ genel aralığındadır. Efektif difüzyon katsayısı, hava sıcaklığından büyük ölçüde etkilenmiştir. D_{eff} değerleri, yüksek sıcaklıklarda suyun hızlı hareket etmesinden dolayı hava sıcaklığındaki artışla birlikte yükselmiştir. Ayrıca, aynı kurutma koşullarında yeşil dış kabuklu bademlerin D_{eff} değerleri, sert kabuklu badem örneklerinden daha

küçük bulunmuştur. Bu çalışmadan elde edilen D_{eff} değerleri, Baru cinsi badem için 50 – 70°C sıcaklık aralığında elde edilen 18.15×10^{-11} ile $37.08 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Teixeira ve ark., 2015) ve 40 – 60°C 'de bulunan 8.02×10^{-10} ile $19.90 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Reis ve ark., 2018) ile karşılaştırılabilir. Bu D_{eff} değerleri, literatürdeki verilerden yüksek bulunmuştur. Değerler arasındaki farklılıklar çeşit, kurutma ekipmanı, kurutma havası ve diğer kontrolsüz parametrelerdeki farklılıklardan kaynaklanabilmektedir.

Çizelge 4. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin çeşitli hava sıcaklıklarındaki efektif difüzyon değerleri
Table 4. Values of diffusion coefficient of in-hull and in-shell almond samples at different temperatures

	Ortam sıcaklığı (°C) Air temperature (°C)	$D_{eff} \times 10^{10}, \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	R^2
Yeşil dış kabuklu badem In-hull almond	45	2.123	0.9717
	50	2.670	0.9859
	55	3.053	0.9791
	60	3.643	0.9775
Sert kabuklu badem In-shell almond	45	2.502	0.8759
	50	2.809	0.8696
	55	3.495	0.8676
	60	3.955	0.8723

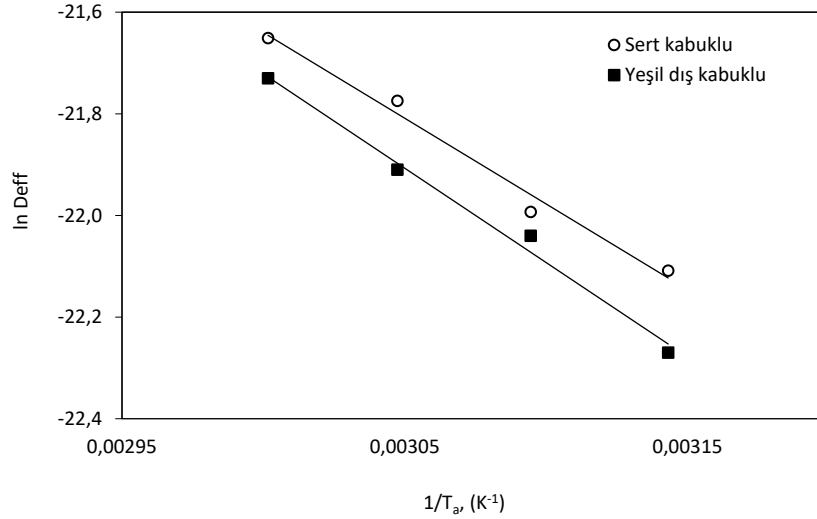
Aktivasyon enerjisi, Şekil 9'da gösterildiği gibi D_{eff} 'in doğal logaritması ile mutlak sıcaklığın tersi çizilerek hesaplanmıştır. Doğrunun eğimi ($-E_a/R$)'dir ve kesişme noktası $\ln(D_0)$ 'ye eşittir. Sonuçlar, Arrhenius tipi bağımlılık nedeniyle doğrusal bir ilişki göstermektedir. Mutlak sıcaklığın yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin D_{eff} üzerindeki etkisi Eşitlik 11 ve 12 verilmiştir:

Yeşil dış kabuklu badem:

$$D_{eff} = 2.532 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{3712.483}{T_a}\right) \quad (11)$$

Sert kabuklu badem:

$$D_{eff} = 9.94 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{3373.669}{T_a}\right) \quad (12)$$



Şekil 9. Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin için efektif difüzyon ve hava sıcaklığı arasındaki Arrhenius tipi ilişki

Figure 9. Arrhenius-type relationship between the effective diffusivity and air temperature for in-hull and in-shell pistachio samples

Eşitlik 11 ve 12'ye göre aktivasyon enerjisi yeşil dış kabuklu badem için 30.87 ve sert kabuklu badem için 28.05 kJ mol^{-1} olarak bulunmuştur. Yeşil dış kabuklu badem örneklerinin aktivasyon enerjisi, sert kabuklu badem örneklerinininkinden daha yüksek olmuştur. Bu, sert kabuklu badem örneklerinden suyu uzaklaştırmak için daha düşük enerjinin gerektirdiğini göstermektedir. 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda kabuklu badem ve yağı alınmış badem örnekleri için bu değeri sırasıyla 22.39 ve 39.37 kJ mol^{-1} olarak elde etmiştir (Reis ve ark., 2018). 60,70 ve 80°C sıcaklıklarda kurutulan kabuklu ve yağı alınmış badem örnekleri için elde edilen aktivasyon enerji değerlerini sırasıyla 39.24 ve 29.01 kJ mol^{-1} olarak tespit etmiştir (Alves ve ark., 2021). Genel olarak tarımsal ürünlerin aktivasyon enerjisi, 12.7-110 kJ mol^{-1} arasında değişmektedir (Zogzas ve ark., 1996).

Termodinamik Özellikler

Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin ΔH , ΔS ve ΔG değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelge 5'te görüldüğü gibi her iki örnek için de ΔH ve ΔS hava sıcaklığı arttıkça azalırken, ΔG hava sıcaklığı arttıkça artmaktadır. Yeşil dış kabuklu badem örneklerinin ΔH değerleri tüm sıcaklıklarda sert kabuklu bademlerinkinden daha yüksek bulunmuştur. Bu, sert kabuklu badem örneklerini kurutmak için daha az enerjiye ihtiyaç duyulduğunu ve daha yüksek hava sıcaklıklarında kurutma için daha düşük miktarda enerjiye gereksinim olduğunu göstermektedir (Costa ve ark., 2016; Moura ve ark., 2021). İncelenen her iki örnek için kurutma havası sıcaklığındaki artış, ΔS değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü sıcaklıktaki düşüşler su moleküllerinin daha az uyarılmasına neden olmaktadır (Silva ve ark., 2020). ΔS 'nin negatif değerleri, kimyasal adsorpsiyon veya yapısal modifikasyonların varlığına bağlanmaktadır (Moreira

ve ark., 2008; Alves ve ark., 2021). Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin ΔG değerleri, 45-60°C sıcaklık aralığında sırasıyla 134.31 ile 139.32 kJ mol⁻¹ ve 133.97 ile 139.09 kJ mol⁻¹ arasında değişmiştir. Artan hava sıcaklığı ile ΔG artmış ve pozitif çıkmıştır. Bu durum badem örneklerinin kurumasının bu çalışma koşullarında kendiliğinden olmadığı anlamına gelmektedir (Silva ve ark., 2019). Ayrıca, bu endotermik bir reaksiyonu tanımlar, yani enerji seviyesini artırmak ve reaktifleri sıvıdan buhar durumuna dönüştürmek için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadır (Ong ve ark., 2013;

Silva ve ark., 2020). Jabuticaba kabuğu (Costa ve ark., 2016), boldo çayı yaprakları (Silva ve ark., 2019), oenocarpus bacaba meyve posası (Morais ve ark., 2019), acı limon (Silva ve ark., 2020), Crataeva tapia L. cinsi meyvenin kabuk ve tohumları (Moura ve ark., 2021), baru cinsi bademden elde edilen un (Alves ve ark., 2021) gibi yapılan çeşitli tarım ürünleri çalışmalarında, artan kurutma havası sıcaklığı ile ΔH ve ΔS değerlerinde azalma ve ΔG değerinde artış gözlenmiştir.

Çizelge 5. Çeşitli hava sıcaklıklarında yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin termodinamik özellikleri
Table 5. Thermodynamic properties of in-hull and in-shell almond samples used in the test at different temperatures

	Hava sıcaklığı (°C) Air temperature (°C)	ΔH , kJ mol ⁻¹	ΔS , kJ mol K ⁻¹	ΔG , kJ mol ⁻¹
Yeşil dış kabuklu <i>In-hull</i>	45	28.22	-0.3335	134.31
	50	28.18	-0.3336	135.98
	55	28.14	-0.3337	137.65
	60	28.10	-0.3338	139.32
Sert kabuklu <i>In-shell</i>	45	25.40	-0.3412	133.97
	50	25.36	-0.3414	135.67
	55	25.32	-0.3415	137.38
	60	25.28	-0.3416	139.09

Conclusion

Yeşil dış kabuklu ve sert kabuklu badem örneklerinin konvektif sıcak hava kurutucuda 1 m s⁻¹ hava hızında ve 45-60°C hava sıcaklığında kurutma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Örneklerin deneysel kurutma verileri için Page, Logarithmic, Two-term, Approximation of diffusion ve Midilli ve ark. modelleri kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; deney koşullarının hiçbirinde sabit hızlı kuruma periyodu gözlemlenmemiştir. Badem örneklerinin kuruma kinetikleri hava sıcaklığından etkilenmiş ve hava sıcaklığındaki artış kuruma süresinin kısalmasına ve kuruma hızının artmasına neden olmuştur. Fick'in ikinci kanunundan hesaplanan efektif difüzyon katsayısı, 45-60°C hava sıcaklığı aralığında yeşil dış kabuklu badem örnekleri için 2.123×10^{-10} ile 3.643×10^{-10} ve sert kabuklu bademler için 2.502×10^{-10} ile 3.955×10^{-10} arasında değişmiştir. Aktivasyon enerjisi, Arrhenius tipi bir denklemlerle tahmin edilmiş ve yeşil kabuklu badem örnekleri için 30.87 kJ mol⁻¹ ve

sert kabuklu badem örnekleri için 28.05 kJ mol⁻¹ olarak belirlenmiştir. Test edilen Page, Logarithmic, Two-term, Approximation of diffusion ve Midilli ve ark. kurutma modellerinin tamamında Midilli ve ark. kurutma modeli, deneysel verilerle en iyi uyumu göstermiştir. Kurutulmuş badem için a_w değerleri artan kurutma havası sıcaklığı ile düşmüştür. Bu çalışmada elde edilen a_w değerleri 0.56'dan daha düşük olduğundan uzun süreli depolama için kritik değer altındadır. Yeşil dış kabuklu badem örneklerinin 45-60°C hava sıcaklığı aralığındaki ΔH , ΔS ve ΔG değerleri sırasıyla 28.22 ile 28.10 kJ mol⁻¹, -0.3335 ile -0.3338 kJ molK⁻¹ ve 25.40 ile 25.28 kJ mol⁻¹; sert dış kabuklu badem örneklerinin 45-60°C hava sıcaklığı aralığındaki ΔH , ΔS ve ΔG değerleri ise sırasıyla 134.31 ile 139.32 kJ mol⁻¹, -0.3412 ile -0.3416 kJ molK⁻¹ ve 133.97 ile 139.09 kJ mol⁻¹ arasında değişmiştir.

Çıkar Çatışması: Makale yazarları arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmadığını beyan ederiz.

Yazar Katkısı: Denemenin tasarlanması ve

yürütülmesi, Prof. Dr.Kamil SAÇILIK ve Gizem HET BATTAL tarafından yapılmış olup makale yazma aşamasında tüm yazarların katkısı olmuştur.

References

- Aktas, T., & Polat, R. (2007). Changes in the drying characteristics and water activity values of selected pistachio cultivars during hot air drying. *Journal of Food Process Engineering*, 30(5), 607-624.
- Alves, N., Arruda-Silva, T. A., Santos, S. B. D., Galle, N. B., Silva, I. D., & da Silva, M. I. (2020). Drying kinetics and thermodynamic properties of 'baru' almond flours. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25, 30-36.
- Bilim, H. C., & Polat, R. (2008). Splitting and breaking of pistachio nuts with striking and heating. *Journal of food process engineering*, 31(3), 317-329.
- Campbell, B. C., Molyneux, R. J., & Schatzki, T. F. (2003). Current research on reducing pre-and post-harvest aflatoxin contamination of US almond, pistachio, and walnut. *Journal of Toxicology: Toxin Reviews*, 22(2-3), 225-266.
- Celik, F., Balta, M., JAVIDIPOUR, İ., & Dogan, A. (2010). Analysis of oil composition of native almonds from Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 22(1).
- Chen, C., Weipeng, Z., Venkitasamy, C., Khir, R., McHugh, T., & Pan, Z. (2020). Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics. *Drying Technology*, 38(8), 975-986.
- Coates, M. (2018). Advanced processing of almonds Dehydration. Final Report.
- Correa, P.C., Oliveira, G.H.H., Rodrigues, A.P.L., Campos, S.C., Botelho, F.M. (2010). Hygroscopic equilibrium and physical properties evaluation affected by parchment presence of coffee grain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8, 694-702.
- Costa, C. F., Corrêa, P. C., Vanegas, J. D., Baptestini, F. M., Campos, R. C., & Fernandes, L. S. (2016). Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jaboticaba peel during the drying process. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 576-580.
- Dalgıç, A. C., Pekmez, H., & Belibağlı, K. B. (2012). Effect of drying methods on the moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of mint leaves. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 439-449.
- Daş, M., Aliç, E., & Akpınar, E. K. (2021). Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(1), 236-246.
- Dhurve, P., Tarafdar, A., & Arora, V. K. (2021). Vibro-fluidized bed drying of pumpkin seeds: assessment of mathematical and artificial neural network models for drying kinetics. *Journal of Food Quality*, 2021, 1-12.
- Doymaz, I. (2003). Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 341-346.
- EL-Mesery, H. S., Sarpong, F., Xu, W., & Elabd, M. A. (2022). Design of low-energy consumption hybrid dryer: A case study of garlic (*Allium sativum*) drying process. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101929.
- Eminoğlu, M. B., Yegül, U., & Saçılık, K. (2019). Drying characteristics of blackberry fruits in a convective hot-air dryer. *HortScience*, 54(9), 1546-1550.
- Ertekin, C., Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63(3), 349-359.
- FAO, (2021). Crops and livestock products data. Erişim adresi: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Erişim tarihi: 10.09.2023)
- Ferreira Junior, W. N., Resende, O., Pinheiro, G. K., Silva, L. C. D. M., Souza, D. G., & Sousa, K. A. D. (2020). Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de sementes de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25, 37-43.
- Fontana, A. J. (2000). Understanding the importance of water activity in food. *Cereal foods world*, 45(1), 7-10.
- Fu, M., Qu, Q., Yang, X., & Zhang, X. (2016). Effect of intermittent oven drying on lipid oxidation, fatty acids composition and antioxidant activities of walnut. *LWT-Food Science and Technology*, 65, 1126-1132.
- Gazor, H. R., Bassiri, A. R., & Minaei, S. (2009). Moisture isotherms and heat of desorption of pistachio (Kaleghochi Var.). *International Journal of Food Engineering*, 5(4).
- Iglesias, H. A., Chirife, J., & Viollaz, P. (1976). Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. *International Journal of Food Science & Technology*, 11(1), 91-101.
- Jia, C., Wang, L., Guo, W., & Liu, C. (2016). Effect of swing temperature and alternating airflow on drying uniformity in deep-bed wheat drying. *Applied Thermal Engineering*, 106, 774-783.
- Kayran, S., & Doymaz, İ. (2021). Drying of Cataloglu apricots: The effect of sodium metabisulfite solution on drying kinetics, diffusion coefficient, and color parameters. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 270-283.
- Kester, D. E., Gradziel, T. M., & Grasselly, C. (1991). Almonds (*Prunus*). *Genetic Resources of Temperate Fruit and Nut Crops*, 290, 701-760.
- Khalid, W., Afzal, F., Jha, R. P., Afzal, N., Khalid, M. Z., Shoaib, T., ... & Azhar, A. (2021). *Almond (Prunus Dulcis): A Nutritive Dense Dry Fruit*, 5(7), 38-46.
- Kutlu, N., & Aslı, İ. Ş. C. İ. (2016). Kurutma yöntemlerinin kiraz domatesin kurutma karakteristikleri üzerine etkisi ve matematiksel modellemesi. *Gıda*, 41(4), 197-204.
- Le Lagadec, M. D. (2009). Kernel brown centres in macadamia: a review. *Crop and Pasture Science*, 60(12), 1117-1123.
- Li, R., Kou, X., Hou, L., Ling, B., & Wang, S. (2018). Developing and validating radio frequency pasteurisation processes for almond kernels. *Biosystems Engineering*, 169, 217-225.
- Meerasri, J., & Sothornvit, R. (2022). Artificial neural networks (ANNs) and multiple linear regression (MLR) for prediction of moisture content for coated pineapple cubes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101942.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., & Ashtari, A. K. (2017). Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts. *LWT*, 75, 202-209.
- Monteiro, A. M., Cordeiro, V. P., & Gomes-Laranjo, J. (2003). A

- amendoeira. *Patrimônio Nacional Transmontano*, Mirandela, 186.
- Morais, M. F. D., dos Santos, J. R., Santos, M. P. D., Santos, D. D. C., Costa, T. N. D., & Lima, J. B. (2019). Modeling and thermodynamic properties of 'bacaba' pulp drying. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 702-708.
- Moreira, R., Chenlo, F., Torres, M. D., & Vallejo, N. (2008). Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 514-521.
- Moura, H. V., de Figueirêdo, R. M. F., de Melo Queiroz, A. J., de Vilela Silva, E. T., Esmero, J. A. D., & Lisbôa, J. F. (2021). Mathematical modeling and thermodynamic properties of the drying kinetics of trapiá residues. *Journal of Food Process Engineering*, 44(8), e13768.
- Nakariyakul, S., & Casasent, D. P. (2011). Classification of internally damaged almond nuts using hyperspectral imagery. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 62-67.
- Nguyen, T. V. L., Nguyen, M. D., Nguyen, D. C., Bach, L. G., & Lam, T. D. (2019). Model for thin layer drying of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) by hot air. *Processes*, 7(1), 21.
- De Oliveira, G. H. H., Corrêa, P. C., Araujo, E. F., Valente, D. S. M., & Botelho, F. M. (2010). Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, 45(3), 546-554.
- Oliveira, G.H.H., Correa, P.C., Santos, E.S., Treto P.C., Diniz, M.D.M.S. (2011). Evaluation of thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans. *International Journal of Food Science & Technology*, 46, 2077-2084.
- Ong, L. K., Kurniawan, A., Suwandi, A. C., Lin, C. X., Zhao, X. S., & Ismadji, S. (2013). Transesterification of leather tanning waste to biodiesel at supercritical condition: Kinetics and thermodynamics studies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 75, 11-20.
- Öztekin, Y. B., & SACILIK, K. (2020). Drying characteristics of 'Ankara' pear slices. *Italian Journal of Food Science*, 32(1), 251-264
- Pearson, T. C. (1998). *Detection and treatment of almonds with concealed damage* (Doctoral dissertation, University of California, Davis).
- Polat, A., & İzli, N. (2022). Drying characteristics and quality evaluation of 'Ankara' pear dried by electrohydrodynamic-hot air (EHD) method. *Food Control*, 134, 108774.
- Reis, D. R., Brum, F. B., Soares, E. J., Magalhães, J. R., Silva, F. S., & Porto, A. G. (2018). Drying kinetics of baru flours as function of temperature. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, 713-719.
- Resende, O., De Oliveira, D.E.C., Costa, L.M., Junior, W.N.F. (2017). Thermodynamic Properties of Baru Fruits (*Dipteryx alata Vogel*). *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 37(4), 739-749.
- Rogel-Castillo, C., Boulton, R., Opastpongkarn, A., Huang, G., & Mitchell, A. E. (2016). Use of near-infrared spectroscopy and chemometrics for the nondestructive identification of concealed damage in raw almonds (*Prunus dulcis*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(29), 5958-5962.
- Rogel-Castillo, C., Luo, K., Huang, G., & Mitchell, A. E. (2017). Effect of drying moisture exposed almonds on the development of the quality defect concealed damage. *Journal of agricultural and food chemistry*, 65(40), 8948-8956.
- Sacilik, K., Elicin, A.K., Unal, H.G. (2006). Drying kinetics of Üryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76(3), 362-368.
- Sacilik, K., Yurtlu, Y.B., Unal, H.G. (2010). Thin layer convective drying and mathematical modeling of einkorn. *Conference Proceeding - 4th International Conference, TAE 2010: Trends in Agricultural Engineering Prague; Czech Republic; 7-10 September 2010*, pp. 540-548.
- Safary, M., & Chayjan, R. A. (2016). Optimization of almond kernels drying under infrared vacuum condition with microwave pretreatment using response surface method and genetic algorithm. *Jast*, 18, 1543-1556.
- Sahoo, M., Titikshya, S., Aradwad, P., Kumar, V., & Naik, S. N. (2022). Study of the drying behaviour and color kinetics of convective drying of yam (*Dioscorea hispida*) slices. *Industrial Crops and Products*, 176, 114258.
- Schade, J. E., McCreevy, K., King, A. D., Mackey, B., & Fuller, G. (1975). Incidence of aflatoxin in California almonds. *Applied Microbiology*, 29, 48-53.
- Schatzki, T. F., & Ong, M. S. (2001). Dependence of aflatoxin in almonds on the type and amount of insect damage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 4513-419.
- Silva, D. P. D., dos Santos, S. G., Silva, I. L., Silva, H. W. D., & Rodvalho, R. S. (2020). Drying kinetics and thermodynamic properties of bitter melon (*Momordica charantia* L.) leaves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 707-712.
- Silva, N.C.B., Santos, S.G.F., Silva, D.P., Silva, I.L., Rodvalho, R.S. (2019). Drying kinetics and thermodynamic properties of boldo (*Plectranthus barbatus* Andrews) leaves. *Cientifica*, 47(1), 01-07.
- Tarafdar, A., Jothi, N., & Kaur, B. P. (2021). Mathematical and artificial neural network modeling for vacuum drying kinetics of *Moringa olifera* leaves followed by determination of energy consumption and mass transfer parameters. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 24, 100306.
- Taşkın, O., & Nazmi, İzli. (2017). Kızılötesi kurutucu ile hurmanın kurutulması ve matematiksel modellenmesi. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 34(Ek Sayı), 10-15.
- Teixeira, P. C., Zuniga, A., & Ribeiro, L. (2015). Modelagem matemática e cinética da secagem da amendoa do baru (*Dipteryx alata vog*). *Enciclopédia Biosfera*, 11(21), 1309-1324.
- TÜİK, (2021). Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2021-37249> (Erişim tarihi: 18.07.2023).
- TÜİK, (2022). Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2022-37249> (Erişim tarihi: 18.07.2023).
- Venkitasamy, C., Zhu, C., Brandl, M. T., Niederholzer, F. J., Zhang, R., McHugh, T. H., & Pan, Z. (2018). Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354. *LWT*, 95, 123-128.
- Walton, D. A., Randall, B. W., Le Lagadec, M. D., & Wallace, H. M. (2013). Maintaining high moisture content of macadamia nuts-in-shell during storage induces brown

- centres in raw kernels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(12), 2953-2958.
- Wareing, P. W., Nicolaidis, L., & Twiddy, D. R. (2000). Nuts and nut products. *The microbiological safety and quality of food*, 1, 919-940.
- Yang, J., Bingol, G., Pan, Z., Brandl, M. T., McHugh, T. H., & Wang, H. (2010). Infrared heating for dry-roasting and pasteurization of almonds. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 273-280.
- Yıldırım, A. (2021). Moisture diffusivity, hardness, gelatinization temperature, and thermodynamic properties of ultrasound assisted soaking process of cowpea. *Journal of Food Process Engineering*, 44(11), e13863.
- Yıldırım, N. A., Koyuncu, F., Tekintaş, E., & Yıldırım, A. F. (2008). Fatty acid content and some chemical properties of selected almond (*Prunus amygdalus* Batsch.) genotypes in Isparta province. *Journal of Adnan Menderes University Agricultural Faculty (Turkey)*.
- Yurtlu, Y.B. (2011). Drying characteristics of bay laurel (*Laurus nobilis* L.) fruits in a convective hot-air dryer. *African Journal of Biotechnology*, 10(47), 9593-9599.
- Yurtlu, Y.B., Aktaş, M., Dolgun, E.C., Bilim, H.I.C., Sacilik, K. (2022). Drying kinetics and thermodynamic properties of Uzun pistachios dried by convective drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), e17035.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225-2253.