

مدل سازی خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی در خشک‌کن مایکروویو و تعیین پارامترهای انتقال جرم

هادی عظیمی نژادیان^{۱*} و محمود محمودی اشکفتکی^۲

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه جهرم، جهرم، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۸/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۸/۱۸

چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر ضریب‌های انتقال جرم ورقه‌های سیب‌زمینی بررسی شده است. داده‌های تجربی از خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت‌های ۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر با چهار سطح توان مایکروویو ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ وات به دست آمد. از مدل تحلیل دینسر و داست برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن و تخمین ضریب‌های انتقال جرم در نمونه‌ها استفاده شد. عدد بایوت در محدود ۱/۲۹۹ تا ۴/۰۹۶ به دست آمد و با افزایش توان مایکروویو و کاهش ضخامت نمونه‌ها بهبود یافت. ضریب‌های انتشار رطوبت و انتقال جرم سطحی ورقه‌های سیب‌زمینی به ترتیب از $2/389 \times 10^{-8}$ تا $14/681 \times 10^{-8}$ متر مربع بر ثانیه و از $2/246 \times 10^{-5}$ تا $7/116 \times 10^{-5}$ متر بر ثانیه متغیر و به‌طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) با افزایش توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها افزایش یافتند. انرژی‌های فعال‌سازی انتشار رطوبت و تبخیر رطوبت سطحی به ترتیب در محدوده‌های ۱/۷۴۶-۱/۴۵۱ وات بر گرم و ۱/۷۱۲-۱/۳۲۳ وات بر گرم به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی

مدل تحلیلی، عدد بایوت، ضریب انتشار رطوبت، انتقال جرم سطحی، انرژی فعال‌سازی

مقدمه

درون لوله‌های مویین و منافذ وجود دارد. آبی که در ماده زمین‌های (دیواره سلول‌ها) یا در ریزساختار محصول موجود است و در دمای مشابه دارای فشار بخاری کمتر از آب خالص است رطوبت پیوندی نامیده می‌شود (Tiwari, 2016). هنگامی که ماده‌ای جامد در معرض خشکاندن حرارتی قرار می‌گیرد، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت به صورت همزمان رخ می‌دهند. گرما از محیط اطراف به صورت‌های مختلف مانند همرفتی، هدایتی و یا الکترومغناطیسی

فرآیند حذف آب از محصول به واسطه عامل حرارتی را خشک کردن می‌نامند و به عنوان یکی از مهم‌ترین عملیات واحد در صنایع مختلف به‌کارگرفته می‌شود (McMinn, 2004). آب موجود در هر ماده به سه گروه رطوبت سطحی، رطوبت پیوندی و رطوبت آزاد تقسیم‌بندی می‌شود. رطوبت سطحی آبی است که به دلیل وجود نیروهای کشش سطحی روی محصول را می‌پوشاند. رطوبت آزاد آبی است که

انتقال یکنواخت و سریع حرارت، این روش خشک کردن منجر به حذف رطوبت سریع تر و راندمان بالاتر مصرف انرژی می شود (Wang & Xi, 2005).

مطالعه انتقال جرم و بررسی تأثیر روش ها و شرایط مختلف خشک کردن بر پارامترهای انتقال جرم برای طراحی سیستم های جدید خشک کردن، کنترل فرآیند، بهبود راندمان انرژی و دستیابی به کیفیت بهتر محصول نهایی لازم است (Sadeghi *et al.*, 2012; Yao *et al.*, 2013). برای توصیف پدیده های انتقال جرم و حرارت، برخی مدل های تئوری پیچیده توسعه یافته است و برخی از محققان از آنها استفاده کرده اند. با این حال، در عمل و برای فرآیندهای خشک کردن صنعتی، مهندسان نیازمند مدل های تحلیلی ساده و دقیقی هستند که با داده های تجربی تأیید شده باشند (Mrkić *et al.*, 2007). در حین فرآیند خشک کردن، انتشار مایع یا بخار اصلی ترین مکانیسم حذف رطوبت از میوه ها و سبزی ها است. معمولاً، برای تحلیل ساده خشک شدن لایه نازک، از معادله انتشار یک بعدی فیک استفاده می شود. در منابع، برای تحلیل خشک شدن و محاسبه ضریب های انتقال جرم محصولات زیستی، حل های مختلفی برای معادله انتشار فیک ارائه و به کار گرفته شده است. دینسر و داست (Dincer & Dost, 1995; Dincer & Dost, 1996) با در نظر گرفتن هر دو مقاومت داخلی و خارجی در مقابل انتقال رطوبت، مدلی تحلیلی با قابلیت استفاده برای اجسام با هندسه های مختلف ارائه کردند. بنا به گزارش محققان مختلف مانند آکپینار و دینسر (Akpınar & Dincer, 2005)، صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2013)، و ترکی هرچگانی و همکاران (Torki-Harchegani *et al.*, 2015)، مدل تحلیلی ارائه شده توسط دینسر و داست در میان

به محصول منتقل می شود و انرژی لازم را برای حرکت آب درون محصول و تبخیر آن فراهم می کند. در پدیده انتقال جرم، رطوبت داخلی به واسطه مکانیسم انتشار به سطح محصول می رسد، پس از آن به روش انتقال همرفتی تبخیر و از محصول جدا می شود (Beigi, 2016). حرکت آب درون محصول و انتشار آن اساساً تابع ویژگی های فیزیکی و شیمیایی و مقدار رطوبت محصول است. در واقع، انتشار آب درون محصول تحت تأثیر مقاومت داخلی قرار دارد (Darvishi *et al.*, 2016). این در حالی است که سرعت تبخیر رطوبت از سطح به شرایط خارجی مانند دما و رطوبت نسبی محیط اطراف، سرعت جریان هوا، سطح مشترک ماده با محیط، و فشار بستگی دارد (Tiwari, 2016).

میزان حذف رطوبت از هر ماده مرطوب معمولاً با سرعت انتقال جرم و حرارت کنترل می شود. انتقال انرژی (به صورت حرارت) از محیط به جسم می تواند به صورت همرفتی، هدایتی، تابشی یا ترکیبی از چند روش باشد. با توجه به روش انتقال حرارت، سیستم های مختلف خشک کردن از نظر ساختار و عملکرد متفاوت هستند (Kaya *et al.*, 2008; Kaya *et al.*, 2010). در گرمایش دی الکتریک (مانند استفاده از توان مایکروویو)، حرارت درون محصول ایجاد می شود و پس از آن به نواحی بیرونی محصول گسترش می یابد. گرمایش مایکروویو در محدوده بسامدی ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز اتفاق می افتد. در فرآیند خشک کردن به کمک توان مایکروویو، مولکول های دوقطبی (آب) انرژی ساطع شده را جذب و جسم به صورت حجمی گرم می شود و گرادیان فشار به وجود آمده باعث جریان آب درون محصول به سمت سطح و خشک شدن محصول می شود (Torki-Harchegani *et al.*, 2016). به دلیل

مدل‌های مختلف در توصیف نمودارهای خشک شدن و تخمین پارامترهای انتقال جرم دقیق‌تر است. خشک کردن سیب‌زمینی را محققان بسیاری بررسی کرده‌اند، اما اغلب مطالعات گزارش شده بر رفتار خشک شدن، کیفیت، مدل‌سازی نمودارهای خشک شدن با استفاده از مدل‌های ریاضی نیمه‌تئوری یا تجربی و محاسبه ضریب انتشار رطوبت با حل مرسوم قانون دوم فیک متمرکز شده‌اند. بنابراین، در این تحقیق، برای مدل‌سازی تحلیل داده‌های تجربی و محاسبه ضریب‌های انتشار موثر رطوبت و انتقال جرم سطحی ورقه‌های سیب‌زمینی در حین فرآیند خشک کردن به روش مایکروویو، از مدل دینسر و داست استفاده و دقت مدل در توصیف نمودارهای خشک شدن ارزیابی شده‌است.

مبانی نظری مدل تحلیلی

فرآیند انتشار رطوبت به‌هنگام خشک شدن هر جسم جامد مرطوب، شبیه هدایت حرارت در آن جسم است. معادله حاکم فیک دقیقاً به شکل معادله فوریر انتقال حرارت است که در آن دما و انتشار حرارت به ترتیب با رطوبت و انتشار رطوبت جایگزین شده‌اند. دینسر و داست (Dincer & Dost, 1995) و Dincer & Dost, 1996) با فرض ۱) ثابت بودن ویژگی‌های فیزیکی-حرارتی جسم جامد و سیال عامل، ۲) ناچیز و قابل اغماض بودن تأثیر انتقال حرارت بر انتقال جرم و ۳) انتشار تک بعدی رطوبت (در اجسام استوانه و کره‌ای شکل تنها در جهت شعاع آنها و در اجسام ورقه‌ای تنها در راستای ضخامت)، یک حل منحصر به فرد را برای معادله انتشار وابسته به زمان و برای هندسه‌های مختلف (کره، استوانه و ورقه) اجسام جامد ارائه کردند.

مواد و روش‌ها

داده‌های تجربی

سیب زمینی‌های تازه برداشت شده از فروشگاه‌های در شهر شیراز خریداری و تا شروع آزمایش‌های خشک کردن در سردخانه در دمای ۴ درجه سلسیوس انبار شدند. قبل از هر آزمایش، حدود دو کیلوگرم از نمونه‌های تازه از سردخانه خارج، با آب شسته، پوست آنها با دقت کنده و به کمک یک اسلایسر به صورت ورقه‌هایی با ضخامت دلخواه در آورده شدند. برای اجرای آزمایش‌های خشک کردن، از یک دستگاه اجاق مایکروویو خانگی تجاری (LG MG-4012، ساخت کشور کره) استفاده شد. به منظور بررسی تأثیر توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر ضریب‌های انتقال جرم ورقه‌های سیب‌زمینی، چهار سطح ضخامتی (۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر) و چهار سطح مختلف توان مایکروویو

$$\begin{cases} A_n = \frac{2\sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n)\cos(\mu_n)} & 0.1 < Bi < 100 \\ A_n = \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu_n} & Bi > 100 \end{cases} \quad (7)$$

$$Bi > 0.1 \quad (8)$$

$$B_n = \exp(-\mu_n^2 Fo)$$

در روابط ۷ و ۸، Fo عدد فوریر است که برای ورقه‌ای با ضخامت L به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fo = \frac{D \times t}{\left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (9)$$

برای اعداد فوریر بزرگ‌تر از ۰/۲، با دقت خوبی، می‌توان رابطه ۵ را به جمله اول سری ساده کرد:

$$MR \cong A_1 B_1 \quad (10)$$

که، A₁ و B₁ به صورت زیر تعریف می‌شوند (Beigi, 2017):

$$A_1 = G = \exp\left(\frac{0.2533Bi}{1.3 + Bi}\right) \quad (11)$$

$$B_1 = \exp(-\mu_1^2 Fo) \quad (12)$$

در رابطه ۱۱، G فاکتور تأخیر نام دارد و با برآزش نمودارهای تجربی نسبت رطوبت (MR) در مقابل زمان فرآیند بر معادله‌ی نمایی به دست می‌آید:

$$MR = G \exp(-St) \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، μ₁ ریشه اول معادله ویزگی است

معادله‌های تک بعدی انتشار وابسته به زمان رطوبت و شرایط اولیه و مرزی برای ورقه‌ای نامتناهی به صورت زیر هستند (Darvishi et al., 2018):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) = \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1)$$

$$M(x, 0) = M_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} (0, t) = 0 \quad (3)$$

$$-D \frac{\partial M\left(\frac{L}{2}, t\right)}{\partial x} = k \left[M\left(\frac{L}{2}, t\right) - M_e \right] \quad (4)$$

که در آنها،

D = ضریب انتشار (متر مربع بر ثانیه)؛ k = ضریب انتقال جرم سطحی (متر بر ثانیه)؛ L = ضخامت محصول (متر)؛ M = مقدار رطوبت لحظه‌ای محصول (بر پایه خشک)؛ M_e = مقدار رطوبت تعادلی محصول (بر پایه خشک)؛ t = زمان فرآیند (ثانیه)؛ و x = راستای انتشار رطوبت درون محصول.

میانگین نسبت رطوبتی جسم ورقه‌ای شکل با حل معادله حاکم تحت شرایط مرزی مذکور به صورت رابطه ۶ به دست می‌آید (Torki-Harchegani et al., 2015):

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \quad (5)$$

در رابطه ۵، MR بیانگر رطوبت نسبتی محصول (بدون بعد) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

که در آن،

M₀ = مقدار رطوبت اولیه محصول (بر پایه خشک).

A_n و B_n در رابطه ۵ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

مدل سازی خشک شدن ورقه‌های سیب زمینی در خشک کن...

داده‌های مقدار رطوبت با استفاده از رابطه ۱۸ به نسبت رطوبت تبدیل شدند:

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (18)$$

- با برازش رابطه ۱۳ بر داده‌های تجربی در نرم افزار MATLAB، فاکتور تأخیر (G) و ضریب خشک شدن (S، یک بر ثانیه) به دست آمدند،
- عدد بایوت (Bi) و μ_1 به ترتیب با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۴ محاسبه و
- ضریب‌های انتشار رطوبت و انتقال جرم سطحی به ترتیب با استفاده از روابط ۱۵ و ۱۶ به دست آمدند.

تحلیل آماری

در این پژوهش، تمامی آزمایش‌ها در چهار تکرار به انجام رسید و نتایج به دست آمده به صورت میانگین گزارش شد. به منظور بررسی ضخامت نمونه‌ها و توان مایکروویو بر پارامترهای مورد مطالعه، از نرم افزار SPSS (V.19) و آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. همچنین، به منظور ارزیابی عملکرد مدل، سه شاخص آماری شامل ضریب تبیین (R^2)، مجموع مربعات خطا (SSE) و ریشه میانگین مربعات خطای برآورد (RMSE) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp.i} - MR_{pre.i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp.i} - \overline{MR})^2} \quad (19)$$

$$SSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp.i} - MR_{pre.i})^2 \quad (20)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp.i} - MR_{pre.i})^2 \right]^{0.5} \quad (21)$$

که در آنها، $MR_{exp.i}$ و $MR_{pre,i}$ = به ترتیب مقادیر نسبت رطوبت

و برای هندسه ورقه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \mu_1 = \tan^{-1}(0.60443Bi + 0.38039) & 0.1 < Bi < 100 \\ \mu_1 = \frac{\pi}{2} & Bi > 100 \end{cases} \quad (14)$$

با هم‌ارز قرار دادن روابط ۱۰ و ۱۳، قرار دادن $A_1=G$ و استفاده از روابط ۹ و ۱۲، ضریب انتشار رطوبت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$D = \frac{S \times \left(\frac{L}{2}\right)^2}{\mu_1^2} \quad (15)$$

ضریب انتقال جرم سطحی (k) توسط عدد بایوت (Bi) با ضریب انتشار رطوبت (D) مرتبط است و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$k = \frac{Bi \times D}{\left(\frac{L}{2}\right)} \quad (16)$$

در این تحقیق، برای تعیین پارامترهای فرآیند و ضریب‌های انتقال جرم با استفاده از مدل دینسر و داست، روند زیر طی شد:

- مقدار رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها در طی فرآیند خشک شدن به صورت زیر محاسبه شد (Ghanbarian et al., 2016):

$$M = \left[\frac{(M_0 + 1) \times m_0}{m_i} - 1 \right] \quad (17)$$

که در آن، m_0 و m_i = به ترتیب جرم اولیه (گرم)؛ و جرم لحظه‌ای (گرم) نمونه‌ها.

- با توجه به ناچیز و قابل اغماض بودن مقدار رطوبت تعادلی در مقایسه با رطوبت اولیه و نهایی،

واقعی و پیش‌بینی شده؛ و \overline{MR} = میانگین نسبت رطوبت و N تعداد مشاهدات.

آمده برای نسبت رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی $Gexp(-St)$ بر داده‌های آزمایشگاهی به دست برآزش داده شد و مقادیر مربوط به ثابت‌های مدل در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین، نتایج تحلیل آماری نیز در این جدول آورده شده است که بیانگر برآزش مطلوب مدل نمایی بر داده‌های تجربی در تمامی تیمارهای مورد مطالعه هستند.

نتایج و بحث

فاکتور تأخیر (G) و ضریب خشک شدن (S)

با استفاده از نرم‌افزار (MATLAB (V.R2011a و روش رگرسیون غیرخطی، مدل نمایی ($MR =$

جدول ۱- نتایج تحلیل آماری برآزش مدل نمایی بر نمودارهای خشک شدن تجربی ورقه‌های سیب‌زمینی

شاخص‌های آماری			ثابت‌های مدل		توان مایکروویو (وات)	ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر)
EMSE	SSE	R ²	S (1/s)	G (-)		
۰/۰۸۸۵	۰/۰۶۲۶	۰/۹۵۰۹	۰/۰۱۶۹	۱/۱۳۵	۸۰۰	۳/۵
۰/۰۸۴۴	۰/۰۹۴۳	۰/۹۵۰۲	۰/۰۱۲۴	۱/۱۴۳	۶۰۰	
۰/۰۶۳۳	۰/۰۶۴۲	۰/۹۶۸۵	۰/۰۰۹۹	۱/۱۴۵	۴۰۰	
۰/۰۶۵۹	۰/۰۹۵۴	۰/۹۶۵۱	۰/۰۰۶۹	۱/۱۵۲	۲۰۰	
۰/۱۰۰۹	۰/۱۳۲۴	۰/۹۳۴۳	۰/۰۱۲۶	۱/۱۴۹	۸۰۰	
۰/۰۷۵۱	۰/۰۹۰۲	۰/۹۵۸۵	۰/۰۰۹۵	۱/۱۵۸	۶۰۰	۵
۰/۰۶۲۷	۰/۰۸۲۵	۰/۹۶۸۳	۰/۰۰۸۰	۱/۱۶۴	۴۰۰	
۰/۰۷۵۷	۰/۱۶۰۵	۰/۹۵۰۷	۰/۰۰۶۱	۱/۱۷۱	۲۰۰	
۰/۰۷۵۰	۰/۰۷۸۸	۰/۹۵۷۱	۰/۰۰۹۲	۱/۱۶۷	۸۰۰	۷
۰/۰۶۸۹	۰/۰۹۰۲	۰/۹۶۱۱	۰/۰۰۷۳	۱/۱۷۴	۶۰۰	
۰/۰۸۲۴	۰/۱۹۶۷	۰/۹۴۳۶	۰/۰۰۶۰	۱/۱۸۳	۴۰۰	
۰/۰۸۷۵	۰/۳۰۶۱	۰/۹۳۶۳	۰/۰۰۴۶	۱/۱۹۵	۲۰۰	
۰/۰۹۴۶	۰/۱۷۰۲	۰/۹۳۰۵	۰/۰۰۷۸	۱/۱۷۲	۸۰۰	۹
۰/۱۰۰۱	۰/۲۵۰۳	۰/۹۲۱۵	۰/۰۰۶۲	۱/۱۸۱	۶۰۰	
۰/۱۰۳۴	۰/۳۸۴۶	۰/۹۱۶۶	۰/۰۰۴۷	۱/۲۰۱	۴۰۰	
۰/۰۹۷۴	۰/۴۲۷۲	۰/۹۱۷۵	۰/۰۰۳۶	۱/۲۱۲	۲۰۰	

دست آمده بیشتر از یک است (Beigi, 2016). این یافته با نتایج گزارش شده برای خشک کردن زعفران در خشک‌کن مادون قرمز (۱/۰۹۶-۱/۱۰۴) (Akhondi et al., 2011)، ورقه‌های کیوی در خشک‌کن هوای گرم (۱/۰۳۸-۱/۰۱۹) و خشک‌کن مایکروویو (۱/۱۱۴-۱/۱۵۶) (Darvishi et al.,

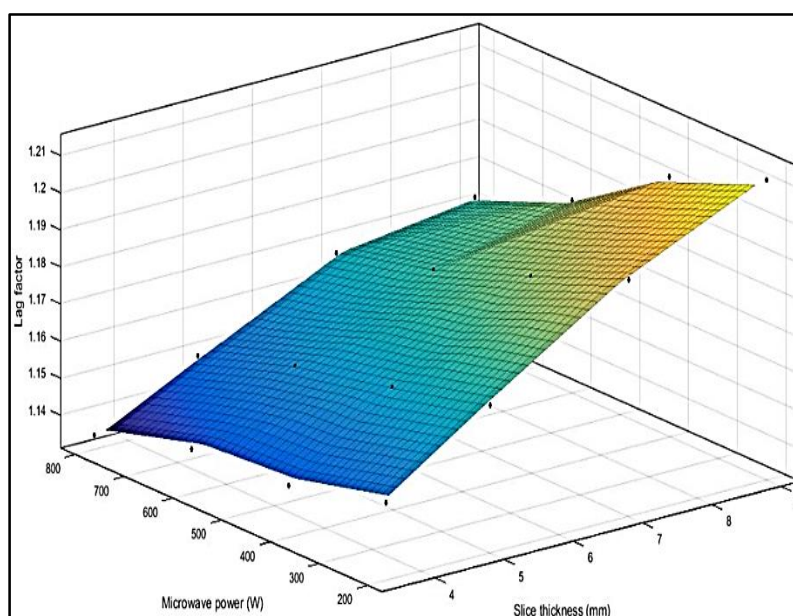
بر اساس نتایج به دست آمده، فاکتور تأخیر برای خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی با استفاده از توان مایکروویو از ۱/۱۳۵ تا ۱/۲۱۲ متغیر است. بنابراین، هم مقاومت داخلی و هم مقاومت خارجی نقش موثری در کنترل فرآیند انتشار رطوبت درون نمونه‌ها داشته‌اند زیرا تمامی فاکتورهای تأخیر به

مدل سازی خشک شدن ورقه‌های سیبزمینی در خشک‌کن...

افزایش ضخامت نمونه‌ها به افزایش آن انجامیده است.

دلیل این مشاهدات را این‌گونه می‌توان بیان کرد که توان بالاتر باعث ایجاد حرارت بیشتر درون محصول و نهایتاً باعث کاهش فاکتور تأخیر می‌شود. همچنین، در نمونه‌های نازک‌تر، فاصله‌ای که رطوبت باید طی کند تا از محصول خارج شود کمتر است که باعث کاهش مقاومت و تسهیل دفع رطوبت از محصول می‌شود.

(2018، ورقه‌های قارچ در خشک‌کن هوای گرم (Ghanbarian *et al.*, 2016) (۱/۱۲۱-۱/۰۷۶) و خشک کردن ورقه‌های لیمو در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مایکروویو (Sadeghi *et al.*, 2013) (۱/۱۹۸-۱/۰۳۵) همخوانی کامل دارد. تأثیر توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر فاکتور تأخیر در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده (جدول ۱ و شکل ۱)، افزایش توان مایکروویو باعث کاهش این فاکتور شده در حالی که



شکل ۱- تأثیر توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر فاکتور تأخیر ورقه‌های سیبزمینی

(Demiray & Tulek, 2012) و توت سفید (Evin, 2011) (بر ثانیه) $۵/۳۹ \times ۱۰^{-۳}$ - $۶/۷۵ \times ۱۰^{-۴}$ قابل مقایسه است. اختلاف میان مقادیر گزارش شده برای ثابت سرعت خشک شدن به دلیل تفاوت‌های موجود میان ویژگی‌های ذاتی محصولات و نیز روش‌ها و شرایط خشک کردن است. به طور کلی، در مقایسه با دیگر روش‌ها و سیستم‌های خشک کردن (به ویژه خشک کردن با هوای گرم)، استفاده از توان

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، ثابت سرعت خشک شدن نمونه‌های سیبزمینی از $۰/۰۰۳۶$ تا $۰/۰۱۶۹$ (بر ثانیه) متغیر است که با مقادیر گزارش شده برای ورقه‌های کیوی (Darvishi *et al.*, 2018) لیموی کامل ($۲/۴۴ \times ۱۰^{-۵}$ - $۲/۷۸ \times ۱۰^{-۶}$ بر ثانیه) (Torki-Harchegani *et al.*, 2015)، ورقه‌های گوجه فرنگی ($۱/۸۲ \times ۱۰^{-۴}$ - $۷/۰۰ \times ۱۰^{-۵}$ بر ثانیه)

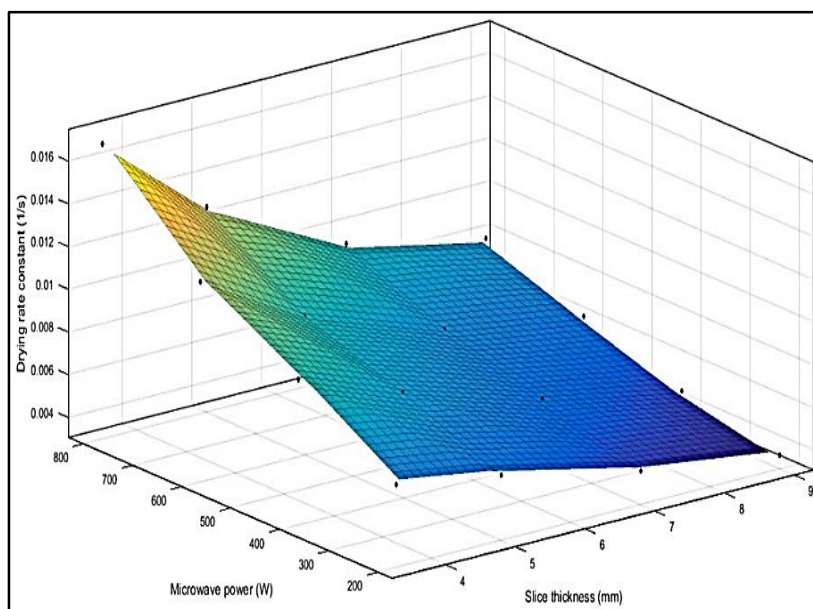
می‌انجامد. این پدیده باعث افزایش سرعت دفع رطوبت می‌شود (Amiri Chayjan *et al.*, 2015). به‌علاوه، بر اساس نتایج به دست آمده و تحلیل واریانس، ثابت سرعت خشک شدن در نمونه‌های نازک‌تر به طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بیشتر از ثابت سرعت خشک شدن در نمونه‌های ضخیم‌تر است. ضخامت کمتر نمونه‌ها باعث افزایش سرعت گرم شدن آنها می‌شود و انتقال رطوبت از محصول به محیط اطراف را سرعت می‌بخشد. نتایج مشابهی در ارتباط با تأثیرات توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر ثابت سرعت خشک شدن در گزارش محققانی چند (Darvishi *et al.*, 2018; Sadeghi *et al.*, چند 2013) دیده می‌شود.

عدد بایوت (Bi)

مقادیر عدد بایوت با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه و نتایج به دست آمده در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

مایکروویو منجر به حذف سریع‌تر رطوبت می‌شود. در روش خشک کردن به کمک توان مایکروویو، انرژی به صورت الکترومغناطیسی منتقل و محصول را گرم می‌کند. در خلال این فرآیند، چرخش مولکول‌های دوقطبی با بسامد زیاد مکانیسم اصلی تولید گرما درون محصول است. بنابراین، سرعت و یکنواختی گرمایش محصول به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد و باعث تسهیل حذف رطوبت از محصول و افزایش سرعت خشک شدن می‌شود.

شکل (۲) تغییرات ثابت سرعت خشک شدن نمونه‌ها با توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، افزایش توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها به ترتیب منجر به افزایش و کاهش این ثابت می‌شود. در واقع، هر گونه افزایش در توان مایکروویو باعث افزایش انرژی جنبشی و انرژی جذب شده در محصول می‌شود و به ایجاد اختلاف فشار بیشتر بخار بین درون و سطح محصول



شکل ۲- تأثیر توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها بر ثابت سرعت خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی

جدول ۲- عدد بایوت برای ورقه‌های سیب‌زمینی در فرآیند خشک شدن با توان مایکروویو

عدد بایوت (-)				ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر)
توان مایکروویو (وات)				
۸۰۰	۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰	
۱/۲۹۹	۱/۴۵۲	۱/۴۹۳	۱/۶۴۵	۳/۵
۱/۵۷۸	۱/۷۸۹	۱/۹۴۶	۲/۱۵۰	۵
۲/۰۳۱	۲/۲۴۵	۲/۶۰۲	۳/۰۸۲	۷
۲/۱۸۱	۲/۵۶۳	۳/۳۹۴	۴/۰۹۶	۹

خارجی کنترل می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش توان و کاهش ضخامت نمونه‌ها باعث کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) عدد بایوت شده‌است. در توان‌های بالاتر مایکروویو، نمونه‌ها انرژی حرارتی بیشتری جذب می‌کنند و فعالیت مولکول‌های آب درون آنها افزایش می‌یابد. این پدیده منجر به کاهش مقاومت درونی در مقابل انتقال رطوبت و کاهش مقدار عدد بایوت می‌شود (Darvishi et al., 2018). در نمونه‌های نازک‌تر، مسافتی که رطوبت باید طی کند تا از درون به سطح محصول برسد کمتر است که باعث کاهش مقاومت درونی و نهایتاً کاهش عدد بایوت می‌شود.

ضریب انتشار رطوبت

بر اساس نتایج به دست آمده و تحلیل‌های آماری، ضریب انتشار رطوبت به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) با افزایش توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها افزایش یافته است به طوری که کمترین مقدار این ضریب ($10^{-8} \times 2/389$ متر مربع بر ثانیه) برای شرایط آزمایشی با توان ۲۰۰ وات و ضخامت ۳/۵ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ($10^{-8} \times 14/681$ متر مربع بر ثانیه) برای شرایط آزمایشی با توان ۸۰۰ وات و ضخامت ۹ میلی‌متر به دست آمده‌است. تأثیر مثبت توان مایکروویو بر ضریب انتشار رطوبت به این دلیل است که توان بیشتر باعث گرمایش بیشتر محصول، افزایش دما و

همان‌گونه که مشخص است، اعداد بایوت به دست آمده برای فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی در آن مایکروویو در شرایط مختلف مورد آزمایش در محدوده ۱/۲۹۹-۴/۰۹۶ هستند. عدد بایوت بی بعد و شاخصی است ساده از نسبت مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم یا حرارت در یک جسم جامد به مقاومت خارجی موجود در سطح جسم. عدد بایوت به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود: (۱) کمتر از ۰/۱، (۲) بین ۰/۱ تا ۱۰۰ و (۳) بیشتر از ۱۰۰. عدد بایوت کمتر از ۰/۱ بیانگر آن است که انتقال جرم تحت کنترل مقاومت سطحی موجود در لایه مرزی سیال (مقاومت خارجی) است و گرادیان رطوبتی درون محصول بسیار کوچک و مقاومت داخلی نیز قابل اغماض است. عدد بایوت بیشتر از ۱۰۰ به معنای آن است که مقاومت داخلی در مقایسه با مقاومت خارجی بسیار بیشتر است و نقش اصلی را در کنترل انتقال جرم دارد. حالت دوم نشانگر نقش تأثیرگذار هر دو مقاومت (مقاومت داخلی و خارجی) در پدیده انتقال است و معمول‌ترین حالت برای فرآیند خشک کردن شناخته شده است (Beigi, 2016). با توجه به تعریف و دسته‌بندی معمول عدد بایوت، پدیده انتقال رطوبت و خشک شدن نمونه‌های سیب‌زمینی در فرآیند خشکاندن با توان مایکروویو در تمامی شرایط آزمایش مورد مطالعه با هر دو مقاومت داخلی و

خشک‌کن هوای گرم ($1/46 \times 10^{-7}$ تا $3/39 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه) (Beigi, 2016)، لیمو در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مایکروویو ($7/41 \times 10^{-8}$ تا 7^{-7} $3/68 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه) (Sadeghi et al., 2013)، ریشه کرفس در خشک‌کن خلأ ($4/68 \times 10^{-7}$ تا 6^{-6} $1/01 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه) (Beigi, 2017) و کیوی در خشک‌کن مایکروویو ($5/64 \times 10^{-5}$ تا $6/02 \times 10^{-5}$ متر بر ثانیه) (Darvishi et al., 2018) قابل مقایسه است.

بر اساس نتایج به دست آمده و تحلیل آماری، ضریب انتقال جرم سطحی هم با افزایش توان مایکروویو و هم با افزایش ضخامت نمونه‌ها به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) افزایش یافته است. معمولاً، سرعت حذف رطوبت از سطح مرطوب توسط غلظت لایه حرارتی و مرزی در امتداد سطح مرطوب کنترل می‌شود. این دو عامل به ترتیب از اختلاف دما و غلظت رطوبت بین سطح و جریان آزاد نشئت می‌گیرند. در دماهای بالاتر، قابلیت تبخیر رطوبت محیط مجاور جسمی که در حال خشک شدن است افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت انتقال رطوبت سطحی افزایش می‌یابد. در ارتباط با تأثیر دمای خشک کردن یا توان مایکروویو بر ضریب انتقال جرم سطحی نتایج مشابهی در گزارش محققان، مانند مک‌مین (McMinn, 2004)، کایا و همکاران (Kaya et al., 2008)، صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2013) و همکاران (Torki-Harchegani et al., 2015) دیده می‌شود. به علاوه، افزایش ضریب انتقال جرم سطحی با افزایش ضخامت نمونه‌ها با پدیده سخت‌شدگی سطحی توجیه‌پذیر است (Nguyen & Price, 2007).

کاهش ویسکوزیته آب درون محصول، افزایش فعالیت آبی و نهایتاً تسهیل انتشار مولکول‌های آب می‌شود. نتایج مشابهی برای خشک کردن به روش مایکروویو را محققانی مانند شوfer و همکاران (Süfer et al., 2017)، اوین (Evin, 2011) و ددلی و همکاران (Dadali et al., 2007) گزارش داده‌اند. ضریب‌های انتشار به دست آمده در این تحقیق با مقادیر گزارش شده برای سیب‌زمینی در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-خلأ ($1/17 \times 10^{-9}$ تا $4/73 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه) (Markowski et al., 2009)، در خشک‌کن هوای گرم ($4/55 \times 10^{-10}$ تا $5/32 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه) (Srikiatden & Roberts, 2006) قابل مقایسه است.

چگونگی تأثیر ضخامت نمونه‌ها بر ضریب انتشار، با سخت‌شدگی سطح نمونه‌ها ارتباط دارد. به طور کلی، به دلیل سرعت بیشتر تبخیر رطوبت در فرآیند خشک شدن، سطح نمونه‌های نازک‌تر در مقایسه با نمونه‌های ضخیم‌تر، سریع‌تر سخت می‌شود و انتشار رطوبت از قسمت‌های داخلی محصول به سطح آن را سخت‌تر می‌کند (Nguyen & Price, 2007). این یافته با نتایج گزارش دیگر محققان مانند درویشی و همکاران (Darvishi et al., 2018) برای ورقه‌های کیوی، شوfer و همکاران (Süfer et al., 2017) برای ورقه‌های پیاز و قنبریان و همکاران (Ghanbarian et al., 2016) برای ورقه‌های قارچ همخوانی کامل دارد.

ضریب انتقال رطوبت سطحی

مقادیر میانگین به دست آمده برای ضریب انتقال جرم سطحی از $2/246 \times 10^{-5}$ تا $7/116 \times 10^{-5}$ متر بر ثانیه متغیر است که با مقادیر گزارش شده برای محصولات غذایی و کشاورزی مختلف در فرآیند خشک کردن به روش‌های مختلف مانند سیب در

انرژی فعال‌سازی

نمونه‌ها کاهش یافته‌اند. برای فرآیند خشک کردن، مقادیر کمتر انرژی فعال‌سازی به معنای انتشار راحت‌تر رطوبت یا انتقال آسان‌تر رطوبت سطحی است. در ارتباط با تأثیر ضخامت نمونه‌ها بر انرژی فعال‌سازی انتشار می‌توان گفت که گسست پیوند میان مولکول‌های آب در نمونه‌های ضخیم‌تر نیاز به انرژی کمتری دارد. همچنین، افزایش تبخیر رطوبت از سطح نمونه‌ها نشانگر آن است که مولکول‌های آب با انرژی کمتری از فاز مایع به فاز گاز تبدیل و از سطح نمونه‌ها جدا می‌شوند. برخی محققان مانند درویشی و همکاران (Darvishi *et al.*, 2018) و شوfer و همکاران (Süfer *et al.*, 2017) نتایج مشابهی با یافته‌های این تحقیق در ارتباط با تأثیر ضخامت نمونه‌ها بر انرژی فعال‌سازی به ترتیب برای ورقه‌های کیوی و ورقه‌های پیاز گزارش کرده‌اند.

انرژی مورد نیاز برای شروع انتشار رطوبت از نواحی داخلی محصول و انرژی مورد نیاز برای تبخیر رطوبت از سطح محصول به ترتیب با انرژی فعال‌سازی انتشار (E_{ad}) و انرژی فعال‌سازی انتشار جرم سطحی (E_{am}) تعریف می‌شود. مقادیر به دست آمده برای انرژی فعال‌سازی انتشار و انرژی انتقال جرم سطحی نمونه‌های سیب‌زمینی در فرآیند خشکاندن به روش توان مایکروویو در جدول (۳) آورده شده‌اند. در این جدول می‌بینیم انرژی فعال‌سازی انتشار رطوبت نمونه‌ها از ۱/۴۵۲ تا ۱/۷۴۶ وات بر گرم و انرژی فعال‌سازی انتقال جرم سطحی از ۰/۷۱۲ تا ۱/۳۲۳ وات بر گرم متغیر است. بر اساس نتایج به دست آمده، هر دو انرژی فعال‌سازی ورقه‌های سیب‌زمینی به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) با افزایش ضخامت

جدول ۳- میانگین انرژی‌های فعال‌سازی برای ورقه‌های سیب‌زمینی در فرآیند خشک شدن با توان مایکروویو

R^2	E_{am} (وات بر گرم)	R^2	E_{ad} (وات بر گرم)	ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر)
۰/۹۵۱۴	۱/۳۲۳	۰/۹۲۶۷	۱/۷۴۶	۳/۵
۰/۹۶۷۶	۰/۹۷۸	۰/۹۱۱۳	۱/۶۷۵	۵
۰/۹۲۰۲	۰/۸۱۰	۰/۹۴۵۲	۱/۵۰۳	۷
۰/۹۳۴۶	۰/۷۱۲	۰/۹۳۶۱	۱/۴۵۲	۹

نتیجه‌گیری

مطالعه، هر دو مقاومت داخلی و خارجی نقش موثری در کنترل حذف رطوبت از نمونه‌ها داشتند. ضریب‌های انتشار رطوبت و انتقال جرم سطحی با افزایش توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها افزایش یافت. انرژی مورد نیاز برای شروع انتشار رطوبت در نمونه‌ها از انرژی فعال‌سازی انتقال جرم سطحی بیشتر بود که بیانگر وجود پیوندهای قوی بین ساختار و آب داخلی محصول است.

در این مطالعه، ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت‌های مختلف با اعمال توان مایکروویو خشکانده شدند و از مدل دینسر و داست برای تعیین پارامترهای انتقال جرم نمونه‌ها در سطوح مختلف توان اعمالی مایکروویو استفاده شد. با توجه به مقادیر به دست آمده برای فاکتور تأخیر (۱/۱۳۵-۱/۲۱۲) و عدد بایوت (۱/۲۹۹-۴/۰۹۶) برای شرایط آزمایش مورد

تعارض منافع

نویسنده در انتشار این مقاله از اخلاق نشر تبعیت کرده و از موارد سوء اخلاق از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Akhondi, E., Kazemi, A. and Maghsoodi, V. 2011. Determination of a suitable thin layer drying curve model for saffron (*Crocus sativus* L) stigmas in an infrared dryer. *Scientia Iranica*. 18(6): 1397-1401.
- Akpınar, E.K. and Dincer, I. 2005. Moisture transfer models for slabs drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 32(1-2): 80-93.
- Amiri Chayjan, R., Kaveh, M. and Khayati, S. 2015. Modeling drying characteristics of hawthorn fruit under microwave-convective conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(3): 239-253.
- Beigi, M. 2016. Influence of drying air parameters on mass transfer characteristics of apple slices. *Heat and Mass Transfer*. 52(10): 2213-2221.
- Beigi, M. 2017. Mass transfer parameters of celeriac slices during vacuum drying. *Heat and Mass Transfer*. 53(4): 1327-1334.
- Dadali, G., Apar, D.K. and Özbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*. 25(5): 917-924.
- Darvishi, H., Mohammadi, P., Azadbakht, M. and Farhudi, Z. 2018. Effect of different drying conditions on the mass transfer characteristics of kiwi slices. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 20(2): 249-264.
- Demiray, E. and Tulek, Y. 2012. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. *Rio Grande*) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*. 48(5): 841-847.
- Dincer, I. and Dost, S. 1995. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying Technology*. 13(1-2): 425-435.
- Dincer, I. and Dost, S. 1996. A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. *International Journal of Energy Research*. 20(6): 531-539.
- Evin, D. 2011. Microwave drying and moisture diffusivity of white mulberry: experimental and mathematical modelling. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 25: 2711-2718.
- Ghanbarian, D., Baraani Dastjerdi, M. and Torki-Harchegani, M. 2016. Mass transfer characteristics of bisporus mushroom (*Agaricus bisporus*) slices during convective hot air drying. *Heat and Mass Transfer*. 52(5): 1081-1088.
- Jahedi Rad, S., Kaveh, M., Rasooli Sharabiani, V. and Taghinezhad, E. 2018. Fuzzy logic, artificial neural network and mathematical model for prediction of white mulberry drying kinetics. *Heat and Mass Transfer*. 54(11): 3361-3374.
- Kaya, A., Aydın, O. and Dincer, I. 2008. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). *Journal of Food Engineering*. 88(3), 323-330.
- Kaya, A., Aydın, O. and Dincer, I. 2010. Comparison of experimental data with results of some drying models for regularly shaped products. *Heat and Mass Transfer*. 46(5): 555-562.
- Markowski, M., Bondaruk, J. and Błaszczak, W. 2009. Rehydration behavior of vacuum-microwave-dried potato cubes. *Drying Technology*. 27:296-305.
- McMinn, W.A.M. 2004. Prediction of moisture transfer parameters for microwave drying of lactose powder using Bi-G drying correlation. *Journal of Food Engineering*. 37(10): 1041-1047.

- Mrkić, V., Ukrainczyk, M. and Tripalo, B. 2007. Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective drying of broccoli. *Journal of Food Engineering*. 79(2): 640–646.
- Nguyen, M.H. and Price, W.E. 2007. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering*. 79(1): 200–207.
- Sadeghi, M., Mirzabeigi Kesbi, O. and Mireei, S.A. 2013. Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 93(3): 471–478.
- Srikiatden, J. and Roberts, J.S. 2006. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering* 74:143–152.
- Süfer, Ö., Sezar, S. and Demir, H. 2017. Thin layer mathematical modeling of convective, vacuum and microwave drying of intact and brined onion slices. *Journal of Food processing and Preservation*. 41(6): <https://doi.org/10.1111/jfpp.13239>
- Tiwari, A. 2016. A review on solar drying of agricultural produce. *Journal of Food Processing and Technology*. 7(9): 1–12.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi-Pibalouti, A. and Sadeghi, M. 2016. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58: 407–418.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D. and Sadeghi, M. 2015. Estimation of whole lemon mass transfer parameters during hot air drying using different modelling methods. *Heat and Mass Transfer*. 51(8): 1121–1129.
- Wang, J. and Xi, Y.S. 2005. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering*. 68(4): 505–511.
- Yao, Y., Zhang, W., Yang, K., Liu, S. and He, B. 2012. Theoretical model on the heat and mass transfer in silica gel packed beds during the regeneration assisted by high-intensity ultrasound. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55(23–24): 7133–7143.

Original Research

Modeling the Drying of Potato Slices in a Microwave Dryer and Determining the Mass Transfer Parameters

H. Azimi-Nejadian*, M. Mahmoodi-Eshkaftaki²

Corresponding Author: Associate Professor, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: h.aziminejadian@shirazu.ac.ir

Received: 30 November, 2019, Accepted: 8 November, 2020

<http://doi: 10.22092/fooder.2020.128574.1249>

Abstract

In the present work, the influences of microwave power and samples thickness on the mass transfer parameters of potato slices were studied using the analytical model suggested by Dincer and Dost. Four microwave powers of 200, 400, 600 and 800 W were practiced to dry mono layer of the slices with thicknesses of 3.5, 5, 7 and 9 mm. The Biot number was obtained to be in the range of 1.299–4.096; where decreased following the increment in microwave power and increased with increasing samples thickness. The moisture diffusivity and convective mass transfer coefficient were found to be significantly ($P < 0.05$) increased with increasing microwave power and the slices thickness, and varied in the ranges of 2.389×10^{-8} – $14.681 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and 2.246×10^{-5} – $7.116 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, respectively. The activation energies for moisture diffusion and surface mass evaporation were determined to be in the ranges of 1.452–1.746 W g^{-1} and 0.712–1.323 W g^{-1} , respectively. ehydration data.

Keywords: Analytical model, Biot number, Moisture diffusivity, Surface mass transfer, Activation energy