



## مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن پسته با استفاده از روش میکروویو تناوبی

علی ماشاءاله کرمانی

استادیار گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، a\_m\_kermani@yahoo.com

### چکیده

در این تحقیق سینتیک خشک‌شدن سه رقم پسته قزوینی به روش میکروویو تناوبی (پالسی) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های خشک‌کردن توسط دستگاه میکروویو خانگی با حداکثر توان خروجی ۸۰۰ وات در فرکانس لامپ مگنترون ۲۴۵۰ MHz در سه وزن مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرم به صورت تناوبی (۶ ثانیه روشن و ۷۰ ثانیه خاموش) با سه تکرار انجام شد. برای مدل‌سازی خشک‌شدن به روش میکروویو پنج مدل خشک‌کردن پیچ، هندرسون و پاییس، لگاریتمی و دو جمله‌ای از بین مدل‌های ریاضی استاندارد ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انتخاب بهترین مدل از سه شاخص آماری مربع کای ( $\chi^2$ )، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) با هم مقایسه شدند. از بین مدل‌های مورد بررسی، مدل لگاریتمی با مقادیر  $R^2$  بزرگ‌تر از ۰/۹۹۲۲ و مقادیر RMSE و  $\chi^2$  به ترتیب کوچک‌تر از ۰/۰۲۸۱ و ۰/۰۰۰۸۱ بهترین برآزش را ارائه کرد.

**واژه‌های کلیدی:** پسته، خشک‌کردن، مدل‌سازی ریاضی، میکروویو.

### مقدمه

پسته یکی از مهم‌ترین محصولات باغی کشور است که ارزش اقتصادی بالایی دارد و صادرات آن بر اهمیت فرآوری و بسته‌بندی آن افزوده است. تسریع در فرآوری بعد از برداشت به ویژه عملیات پوست‌گیری و خشک‌کردن، اهمیت بالایی در کیفیت آن دارد. از این‌رو، بهینه‌سازی مراحل مختلف فرآوری پسته نقش قابل توجهی در دستیابی به کیفیت مطلوب، افزایش صادرات و درآمد ارزی کشور دارد (رفیعی و کاشانی‌نژاد، ۱۳۸۴). مرحله خشک‌کردن از مهم‌ترین مراحل فرآوری پسته است که در آن رطوبت محصول از حدود ۵۰ درصد به ۶ درصد (بر پایه خشک) کاسته می‌شود و قابلیت انبارداری آن افزایش می‌یابد (Kader et al., 1982). با توجه به ارزش زمان در فرآوری پسته در جلوگیری از گسترش آلودگی احتمالی، زمان بر بودن و مصرف انرژی فرآیند خشک‌کردن و نقشی که در حفظ کیفیت محصول ایفا می‌کند، ارزیابی دستگاه‌ها و روش‌های مختلف خشک‌کردن در راستای تولید محصول با کیفیت بالا ضروری است. در خشک‌کن‌های هوای گرم به دلیل پائین بودن هدایت حرارتی مواد، انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی آن محدود شده، راندمان انرژی حرارتی پائین آمده، مدت طولانی‌تری برای خشک‌کردن لازم است. نیاز به خشک‌کن‌های جدید که از نظر اقتصادی کارآمد باشند به شدت احساس می‌شود. خشک‌کردن محصولات غذایی با استفاده از



میکروویو روشی نسبتاً ارزان و سریع است که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. میکروویو از ترکیب دو واژه میکرو<sup>۱</sup> به معنی کوچک و ویو<sup>۲</sup> به معنی موج تشکیل شده است و به معنی امواج با طول موج کوتاه و تعداد بسامد (فرکانس) بسیار بالا می‌باشد. میکروویو امواج الکترومغناطیسی در محدوده امواج رادیویی از ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز است. مکانیزم ایجاد گرما توسط میکروویو بدین صورت است که این امواج هنگام بر خورد به ماده موجب می‌شود مولکول‌های قطبی دوران کنند تا در راستای قطبیتی که به سرعت در حال تغییر است قرار گیرند. این چرخش مولکول‌ها منجر به ایجاد اصطکاک با محیط اطراف و تولید گرما می‌شود (Schiffmann, 1992). در این میان نقش آب به عنوان مولکول‌های قطبی در درون ماده غذایی بارزتر است. انرژی الکترومغناطیس در فرکانس‌های ۹۱۵ و ۲۴۵۰ مگاهرتز توسط مواد موادی که محتوی آب هستند جذب شده و به گرما تبدیل می‌شود (Maskan, 2000). بر خلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، امواج میکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می‌یابد. امروزه کاربردهای میکروویو در خشک کردن، گستره وسیعی از صنایع غذایی، شیمیایی، اتومبیل‌سازی و غیره را در بر می‌گیرد. در هر یک از این موارد سیستم‌های خشک کردن میکروویو زمان خشک کردن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است بدون این که اثر منفی بر کیفیت محصول داشته باشد. در خشک کردن به روش میکروویو، گرمای حاصل از تبدیل انرژی امواج میکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب، فشار و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع فراهم می‌کند. کاهش زمان فرآوری (خشک کردن) به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی محصولات را کاهش داده است. گرمایش ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل نموده است (میرنظامی ضیابری و همکاران، ۱۳۷۵) و تحقیقات متنوعی در خصوص بکارگیری آن در سامانه‌های خشک‌کن در حال انجام است.

به منظور کنترل فرآیند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی، بایستی آن‌را مدل‌سازی نمود تا بتوان بر اساس الگوی بدست آمد از مدل، روند خشک شدن محصول را پیش‌بینی کرد. هدف از استخراج مدل خشک شدن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه خشک شدن محصولات می‌باشد. از این رو مدل‌سازی خشک شدن لایه نازک هوای داغ برای محصولات مختلف از جمله محصولات خشک‌باری مثل پسته (Tavakolipour, 2011; Balbay *et al.*, 2013)، فندق استرالیایی (ماکادامیا<sup>۳</sup>) (Palipane and Driscoll, 1994)، شاه‌بلوط<sup>۴</sup> (Guine *et al.*, 2002)، زردآلو (Bozki, 2006)، آلو (Goyal *et al.*, 2007) انجام شده است.

در مطالعه سینتیک خشک کردن لایه نازک دانه‌های انار شیرین و ترش و میزان انرژی مصرفی در خشک کردن به روش میکروویو در سه سطح توان خروجی امواج میکروویو مدل پیچ بهترین برازش را ارائه کرد (متولی و همکاران، ۱۳۸۹). در بررسی مدل‌سازی سینتیک و بررسی جنبه‌های انرژی خشک کردن برگ جعفری توسط یک دستگاه اجاق میکروویو از بین ۱۱ مدل مورد

1. Micro

2. Wave

3. Macadamia

4. Chestnut



بررسی مدل میدلی بهترین برازش را ارائه نمود (Soysal et al., 2006). در مطالعه سینتیک خشک کردن دو رقم پسته ترکیه توسط یک دستگاه خشک کن آزمایشگاهی الحاقی به میکروویو طراحی شده شش مدل ریاضی مورد بررسی قرار گرفت که مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده بهترین برازش را ارائه نمود (Balbay and Sahin, 2013). مدل سازی خشک کردن لایه نازک دو رقم پسته ایرانی خانی و عباسعلی توسط یک خشک کن آزمایشگاهی توسعه داده شده میکروویو-همرفتی با توان ۵۰۰ وات مطالعه شد (Kouchakzadeh and Shafeei, 2010). از هفت مدل خشک شدن مورد بررسی، مدل پیچ بهترین برازش را ارائه نمود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مطابقت مدل لگاریتمی با داده‌های آزمایشی کم تر از مدل پیچ بود. در بررسی خشک کردن حبه‌های سیر به روش ترکیبی میکروویو - هوای داغ ضرایب معادله پیچ تعیین گردید.

علی‌رغم مزایای استفاده از میکروویو در فرآیند خشک کردن به منظور بهبود کیفیت محصول خشک شده به روش میکروویو راهبردهایی شامل روش‌های ترکیبی با هوای داغ، خلاء و تناوبی (پالسی یا نوبه‌ای<sup>۱</sup>) استفاده شده است (Gunasekaran, 1999). تاکنون تحقیقی پیرامون بکارگیری روش خشک کردن میکروویو تناوبی برای محصول پسته صورت نگرفته است. از این رو، با توجه به اثرات این روش در کاهش زمان خشک کردن بررسی و اهمیت کیفیت محصول نهایی اثر بکارگیری این تکنولوژی بر کیفیت پسته هدف این تحقیق بررسی مدل سازی خشک کردن محصول پسته به روش میکروویو تناوبی (پالسی) بوده است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق سه رقم پسته قزوینی شامل ارقام کال خندان، کله‌بزی و قرمز که دارای بیشترین سطح زیر کشت هستند، برای آزمایش‌ها انتخاب شدند. پسته‌ها از باغی در شهرستان بوئین‌زهرها برداشت شد. پس از پوست‌گیری، تمیز کردن، شستشو و نم‌گیری در کیسه‌ها پلاستیکی در یخچال نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه ارقام مختلف پسته با قرار دادن سه نمونه ۱۰۰ گرمی از هر رقم در دستگاه آن در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و زمان ۲۴ ساعت تعیین شد (Kashaninejad et al., 2006).

## تیمارهای خشک کردن به روش میکروویو

نمونه‌های پسته‌ها در سه وزن مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرمی توسط دستگاه اجاق میکروویو خانگی سانی<sup>۲</sup> مدل SMV-2 با حداکثر توان خروجی ۸۰۰ وات در فرکانس لامپ مگنترون ۲۴۵۰ MHz خشک شدند. ابعاد محفظه قرارگیری نمونه اجاق میکروویو mm ۴۵۸×۳۶۵×۲۹۵ بود. اجاق مورد استفاده دارای یک فن (پنکه) برای جریان هوا در محفظه و خنک کردن لامپ مگنترون بود. رطوبت درون محفظه توسط این فن از طریق روزنه‌های سمت سقف دیواره اجاق به هوای بیرون جابجا می‌شد. درون محفظه اجاق مورد نظر یک صفحه چرخان شیشه‌ای به قطر mm ۳۵۵ وجود داشت. از طریق پنل کنترل دیجیتالی تنظیمات توان خروجی و زمان حرارت‌دهی انجام می‌شد. آزمایش‌های خشک کردن به روش میکروویو برای هر تیمار در سه تکرار انجام گرفت. از

<sup>۱</sup>. Pulsed or intermittent

<sup>۲</sup>. Sunny



این‌رو، با در نظر گرفتن سه رقم پسته و سه وزن نمونه (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرم)، تعداد کل آزمایش‌های خشک‌کردن ۲۷ بود. خشک کردن نمونه‌ها توسط دستگاه میکروویو به صورت دوره‌ای (متناوب) انجام شد. مدت زمان روشن شدن دستگاه ۶ ثانیه و مدت زمان خاموش بودن آن ۷۰ ثانیه بود. در هر آزمایش با توجه به میزان رطوبت اولیه و وزن نمونه‌ها فرآیند تا رسیدن رطوبت به سطح حدود ۶٪ بر پایه‌تر ادامه می‌یافت. در فواصل خاموش بودن دستگاه نسبت به توزین نمونه با ترازوی دیجیتالی AND با دقت ۰/۰۱ گرم و ثبت دما در چند نقطه نمونه توسط دماسنج مادون قرمز اقدام می‌شد.

### سینتیک خشک‌شدن

فرآیند کاهش رطوبت و ارتباط آن با متغیرهای این فرآیند اصطلاحاً سینتیک خشک‌شدن گفته می‌شود. در فواصل زمانی خاموش بودن دستگاه با توزین نمونه توسط ترازوی دیجیتالی مدل AND با دقت ۰/۰۱ گرم اقدام به داده‌برداری ( $W_1$ ) (وزن کشی) گردید و مقدار رطوبت نمونه توسط رابطه ۱ تعیین می‌گردید. این عمل تا زمانی که مقدار رطوبت نمونه به حدود ۶ درصد می‌رسید، ادامه می‌یافت. با استفاده از رابطه ۱ رطوبت نمونه طی آزمایش تعیین شده و با رسم نمودار داده‌ها در مقابل زمان منحنی خشک‌شدن بدست می‌آید.

$$M.C. = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،  $M.C.$  = درصد رطوبت (بر پایه خشک)،  $W_1$  = وزن نمونه پسته در هر زمان آزمایش (گرم)،  $W_2$  = وزن ماده خشک نمونه (گرم)

در اکثر تحقیقات برای ارزیابی سیستم خشک‌کن‌ها مدل سینتیک خشک‌کردن بر اساس نسبت رطوبت<sup>۱</sup> ( $MR$ ) بدست آمده است که در آن رطوبت نمونه در طی خشک‌شدن به طور غیر مستقیم بدست می‌آید. در این تحقیق، بدست آوردن نسبت خشک‌شدن (رابطه ۲) محصول ضروری است. بنابراین، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی جهت پیش‌گویی نسبت خشک‌شدن محصولات مختلف کشاورزی روشی معمول است.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن:  $MR$  = نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  = رطوبت<sup>۲</sup> در هر زمان طی فرآیند خشک‌شدن،  $M_0$  = رطوبت اولیه و  $M_e$  = رطوبت تعادلی.

اگر چه نسبت رطوبت مطابق رابطه ۲ تعریف می‌شود، ولی به دلیل ناچیز بودن مقدار  $M_e$  در مقابل  $M_t$  و  $M_e$  از خطای ناشی از

در نظر نگرفتن آن جزیی بوده و نسبت رطوبت به صورت رابطه ۳ ساده می‌شود (Wang et al., 2007).

<sup>۱</sup>. Moisture ratio

<sup>۲</sup>. مقادیر رطوبت در این روابط بر پایه خشک (dried basis) می‌باشند.

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

### مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های نسبت خشک‌شدن

در این تحقیق برای مدل‌سازی خشک‌شدن پنج مدل خشک‌کردن پیچ<sup>۱</sup>، هندرسون و پابیس<sup>۲</sup>، لگاریتمی<sup>۳</sup> و دو جمله‌ای<sup>۴</sup> مطابق جدول ۱ که از بین مدل‌های کاربردی و ارائه شده در مقالات معتبر دنیا انتخاب شدند و بر داده‌ها با نسبت رطوبت محاسبه‌شده از رابطه<sup>۳</sup> برازش گردید.

ثابت‌ها و ضرایب مدل‌ها از روش رگرسیون غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار Sigma plot 12 تعیین شدند. برای انتخاب بهترین مدل از بین این مدل‌ها سه معیار ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها<sup>۵</sup> (RMSE)، مربع کای<sup>۶</sup> ( $\chi^2$ ) و ضریب تبیین<sup>۷</sup> ( $R^2$ ) استفاده شد (روابط ۴ الی ۶). مقادیر RMSE و  $\chi^2$  از روابط محاسبه و  $R^2$  از خروجی نرم‌افزار بدست آمد.

**جدول ۱.** تعدادی از مدل‌های ریاضی خشک‌شدن لایه نازک مواد بیولوژیکی مورد استفاده در مدل‌سازی (Soysal *et al.*, 2006)

| مرجع                           | مدل  | نام مدل         | ردیف |
|--------------------------------|--|-----------------|------|
| Westerman <i>et al.</i> , 1973 | $MR = \exp(-kt)$                                   | نیوتن           | ۱    |
| Yagcioglu <i>et al.</i> , 1999 | $MR = a \cdot \exp(-kt)$                           | هندرسون و پابیس | ۲    |
| Yaldiz <i>et al.</i> , 2001    | $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$                       | لگاریتمی        | ۳    |
| Rahman <i>et al.</i> , 1998    | $MR = a \cdot \exp(-k_0 t) + b \cdot \exp(-k_1 t)$ | دو جمله‌ای      | ۴    |
| Ozdemir <i>et al.</i> , 1999   | $MR = 1 + at + bt^2$                               | درجه دو         | ۵    |

MR: نسبت رطوبت، t: زمان، ضرایب a, b, c, k, k<sub>0</sub> و k<sub>1</sub> ثابت‌های مدل است.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - p} \quad (5)$$

1. Page  
2. Henderson and Pabis  
3. Logarithmic  
4. Two term  
5. Root mean square error  
6. Chi-square  
7. Coefficient of determination



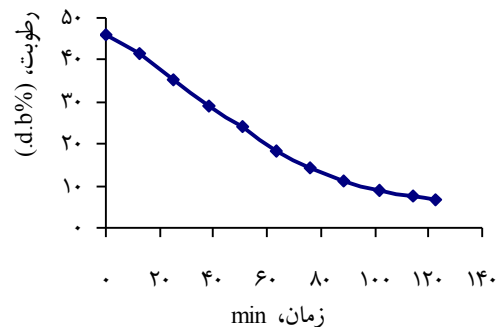
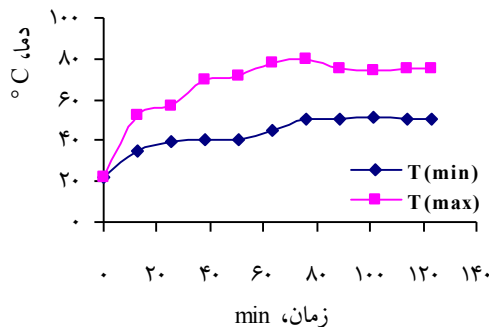
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت بدست آمده در طی  $i$ امین اندازه‌گیری،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل در  $i$ امین اندازه‌گیری،  $\overline{MR}_{pre}$  میانگین مجموع نسبت‌های رطوبتی پیش‌بینی شده،  $N$  تعداد مشاهدات (داده‌ها) و  $p$  تعداد ثابت‌های بکار رفته در مدل می‌باشند. هر چه مقادیر RMSE و  $\chi^2$  کوچک‌تر و مقدار  $R^2$  بزرگ‌تر باشد، میزان تطابق آن مدل با داده‌های آزمایش بهتر است.

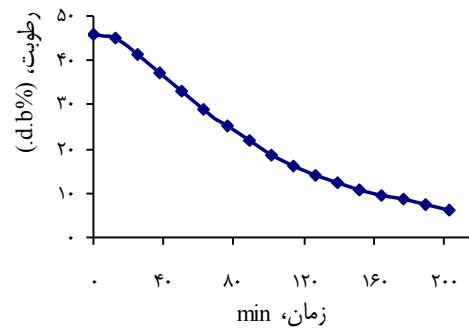
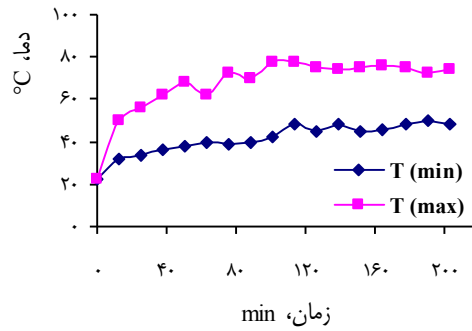
## نتایج و بحث

### منحنی خشک‌شدن و تغییرات دمای پسته

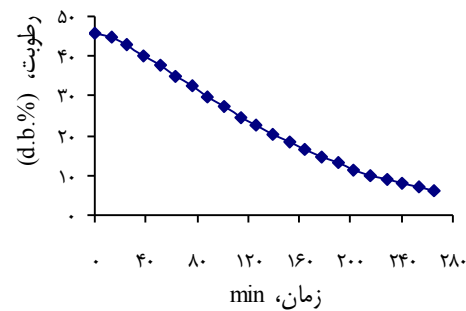
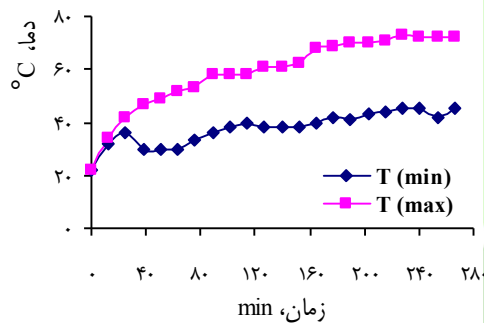
شکل‌های ۱ تا ۳ نمودارهای منحنی خشک‌شدن و تغییرات دمای نمونه در روش خشک‌کردن به روش میکروویو برای نمونه‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرمی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار خشک‌شدن و تغییرات دمای نمونه ۵۰ گرمی در روش خشک‌شدن به روش میکروویو.



شکل ۲. نمودار خشک شدن و تغییرات دمای نمونه ۱۰۰ گرمی در خشک شدن به روش میکروویو.



شکل ۳. نمودار خشک شدن و تغییرات دمای نمونه ۱۵۰ گرمی در خشک شدن به روش میکروویو.

همان طوری که شکل‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهند با افزایش وزن نمونه آزمایشی مدت زمان خشک کردن افزایش می‌یابد. این افزایش به علت افزایش میزان آب (رطوبت) موجود در نمونه آزمایش می‌باشد. دمای نقاط مختلف نمونه‌های آزمایشی در فرآیند خشک کردن به روش میکروویو یکسان نبود به همین دلیل در هر مرحله وزن کنشی دمای چند نقطه از نمونه اندازه‌گیری شد. نمودار تغییرات دمای نمونه‌های آزمایشی نشان می‌دهد که میزان دامنه تغییرات دما برای نمونه‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرمی به ترتیب ۷۵-۵۰ (میانگین ۶۲/۵)، ۷۵-۴۰ (میانگین ۵۷/۵) و ۷۰-۳۰ (میانگین ۵۰) درجه سلسیوس بود.

### نسبت خشک شدن و سینتیک خشک شدن

نتایج حاصل از بررسی پارامترهای آماری محاسبه شده برای بررسی قابلیت برازش تغییرات داده‌های خشک کردن توسط پنج مدل در جدول ۲ نشان داده شده است. داده‌های جدول نشان می‌دهد که از بین تمام مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق مدل لگاریتمی با مقادیر  $R^2$  بزرگ‌تر از ۰/۹۹۲۲ و مقادیر EMRS و  $\chi^2$  به ترتیب کوچک‌تر از ۰/۰۲۸۱ و ۰/۰۰۰۸۱ بهترین برازش را ارائه کرد. از این رو، این مدل به عنوان بهترین مدل برای بیان مقادیر تجربی انتخاب گردید. مدل لگاریتمی دارای سه ضریب



است. جدول ۳ مقادیر متوسط ضرایب مدل لگاریتمی را نشان می‌دهد. در مطالعه سینتیک خشک کردن دو رقم پسته ترکیه توسط یک دستگاه خشک کن آزمایشگاهی الحاقی به میکروویو طراحی شده مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده بهترین برازش را ارائه نمود (Balbay and Sahin, 2013). در تحقیق مدل سازی خشک کردن لایه نازک دو رقم پسته ایرانی خانی و عباسعلی توسط خشک کن آزمایشگاهی توسعه داده شده میکروویو- همرفتی مدل پیچ بهترین برازش را ارائه نمود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مطابقت مدل لگاریتمی با داده‌های آزمایشی کم‌تر از مدل پیچ بود.

جدول ۲. نتایج بدست آمده از بررسی مدل‌های مختلف خشک کردن

| مدل             | وزن نمونه (گرم) | تکرار | R <sup>2</sup> | $\chi^2$  | RMSE     |
|-----------------|-----------------|-------|----------------|-----------|----------|
| نیوتن           | ۵۰              | ۱     | -/۰.۹۸۳۸       | -/۰.۰۰۱۵۱ | -/۰.۰۴۱۰ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۷۸۰       | -/۰.۰۰۱۸۶ | -/۰.۰۴۶۹ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۷۹۸       | -/۰.۰۰۱۹۱ | -/۰.۰۴۶۱ |
|                 | ۱۰۰             | ۱     | -/۰.۹۷۱۰       | -/۰.۰۰۲۵۲ | -/۰.۰۵۲۴ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۵۸۳       | -/۰.۰۰۳۷۶ | -/۰.۰۶۳۵ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۶۷۹       | -/۰.۰۰۲۸۸ | -/۰.۰۵۵۴ |
|                 | ۱۵۰             | ۱     | -/۰.۹۶۳۹       | -/۰.۰۰۳۰۱ | -/۰.۰۵۶۲ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۵۸۴       | -/۰.۰۰۳۷۷ | -/۰.۰۶۳۵ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۵۳۷       | -/۰.۰۰۴۰۵ | -/۰.۰۶۵۲ |
| هندرسون و پاییس | ۵۰              | ۱     | -/۰.۹۸۹۶       | -/۰.۰۰۱۰۸ | -/۰.۰۳۲۹ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۸۶۳       | -/۰.۰۰۱۲۹ | -/۰.۰۳۷۱ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۸۶۹       | -/۰.۰۰۱۳۸ | -/۰.۰۳۷۲ |
|                 | ۱۰۰             | ۱     | -/۰.۹۸۶۴       | -/۰.۰۰۱۲۶ | -/۰.۰۳۵۹ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۷۵۹       | -/۰.۰۰۲۳۳ | -/۰.۰۴۸۳ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۸۱۵       | -/۰.۰۰۱۷۷ | -/۰.۰۴۲۱ |
|                 | ۱۵۰             | ۱     | -/۰.۹۸۱۱       | -/۰.۰۰۱۶۵ | -/۰.۰۴۰۷ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۷۵۹       | -/۰.۰۰۲۳۳ | -/۰.۰۴۸۳ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۷۲۳       | -/۰.۰۰۲۵۲ | -/۰.۰۰۷۱ |
| لگاریتمی        | ۵۰              | ۱     | -/۰.۹۹۶۳       | -/۰.۰۰۰۴۳ | -/۰.۰۲۰۶ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۹۷۴       | -/۰.۰۰۰۲۸ | -/۰.۰۱۷۳ |
|                 |                 | ۳     | -/۰.۹۹۷۳       | -/۰.۰۰۰۳۲ | -/۰.۰۱۷۹ |
|                 | ۱۰۰             | ۱     | -/۰.۹۹۲۲       | -/۰.۰۰۰۸۱ | -/۰.۰۲۸۱ |
|                 |                 | ۲     | -/۰.۹۹۵۹       | -/۰.۰۰۰۴۳ | -/۰.۰۲۰۷ |





|        |         |        |   |     |             |
|--------|---------|--------|---|-----|-------------|
| ۰/۰۲۲۲ | ۰/۰۰۴۷  | ۰/۹۹۵۲ | ۳ | ۱۵۰ | وانگ و سینگ |
| ۰/۰۱۸۵ | ۰/۰۰۳۴  | ۰/۹۹۶۳ | ۱ |     |             |
| ۰/۰۰۴۱ | ۰/۰۰۴۳  | ۰/۹۹۵۹ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۱۷۵ | ۰/۰۰۳۳  | ۰/۹۹۶۸ | ۳ |     |             |
| ۰/۰۱۷۸ | ۰/۰۰۲۸  | ۰/۹۹۷۳ | ۱ | ۵۰  | وانگ و سینگ |
| ۰/۰۱۸۹ | ۰/۰۰۲۹  | ۰/۹۹۶۸ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۱۸۱ | ۰/۰۰۲۹  | ۰/۹۹۷۳ | ۳ |     |             |
| ۰/۰۳۳۳ | ۰/۰۰۱۰۵ | ۰/۹۸۹۱ | ۱ | ۱۰۰ | وانگ و سینگ |
| ۰/۰۲۵۹ | ۰/۰۰۶۲  | ۰/۹۹۳۶ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۲۵۰ | ۰/۰۰۶۶  | ۰/۹۹۳۹ | ۳ |     |             |
| ۰/۰۲۳۶ | ۰/۰۰۵۳  | ۰/۹۹۴۰ | ۱ | ۱۵۰ | وانگ و سینگ |
| ۰/۰۲۵۹ | ۰/۰۰۶۲  | ۰/۹۹۳۶ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۲۲۷  | ۰/۹۹۷۳ | ۳ |     |             |
| ۰/۰۳۷۳ | ۰/۰۰۱۳۹ | ۰/۹۸۹۶ | ۱ | ۵۰  | دو جمله‌ای  |
| ۰/۰۴۲۱ | ۰/۰۰۱۶۶ | ۰/۹۸۶۳ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۴۲۱ | ۰/۰۰۱۷۸ | ۰/۹۸۶۹ | ۳ |     |             |
| ۰/۰۳۸۶ | ۰/۰۰۱۴۵ | ۰/۹۸۶۴ | ۱ | ۱۰۰ | دو جمله‌ای  |
| ۰/۰۵۲۲ | ۰/۰۰۲۷۳ | ۰/۹۷۵۹ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۴۵۵ | ۰/۰۰۲۰۷ | ۰/۹۸۱۵ | ۳ |     |             |
| ۰/۰۴۲۹ | ۰/۰۰۱۸۴ | ۰/۹۸۱۱ | ۱ | ۱۵۰ | دو جمله‌ای  |
| ۰/۰۵۲۲ | ۰/۰۰۲۷۲ | ۰/۹۷۵۹ | ۲ |     |             |
| ۰/۰۵۲۹ | ۰/۰۰۲۸۳ | ۰/۹۷۲۲ | ۳ |     |             |

جدول ۳. مقادیر متوسط ضرایب مدل لگاریتمی برای خشک کردن پسته به روش میکروویو

| ضرایب مدل لگاریتمی |        |        | تیمار خشک کردن    |
|--------------------|--------|--------|-------------------|
| b                  | a      | k      |                   |
| -۰/۳۱۴۹            | ۱/۳۴۱۸ | ۰/۰۰۹۵ | میکروویو ۵۰ گرمی  |
| -۰/۵۱۰۹            | ۱/۵۲۷۲ | ۰/۰۰۵۴ | میکروویو ۱۰۰ گرمی |
| -۰/۷۶۹۶            | ۱/۸۱۲۴ | ۰/۰۰۳۳ | میکروویو ۱۵۰ گرمی |



ضرایب مدل لگاریتمی به وزن نمونه  $m$  (بر حسب گرم) بستگی دارند. جهت تعیین این وابستگی و پیدا کردن فرمول‌های مربوط به هر کدام، از رگرسیون چند متغیر استفاده شد و نتایج به صورت روابط ۷ الی ۹ بدست آمد.

$$k = 0.3068 m^{-0.18876} \quad R^2 = 0.992 \quad (7)$$

$$a = 0.4482 m^{0.2749} \quad R^2 = 0.947 \quad (8)$$

$$b = -0.107 m^{0.18509} \quad R^2 = 0.989 \quad (9)$$

### نتیجه گیری کلی

در این تحقیق خشک کردن سه رقم پسته قزوینی در سه وزن مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرمی به روش میکروویو توسط دستگاه اجاق میکروویو خانگی با حداکثر توان خروجی ۸۰۰ وات در فرکانس لامپ مگنترون ۲۴۵۰ MHz با سه تکرار به صورت تناوبی (۶ ثانیه روشن و ۷۰ ثانیه خاموش) خشک شدند و سینتیک شدن مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل سازی خشک شدن به روش میکروویو ۵ مدل خشک کردن پیچ، هندرسون و پاییس، لگاریتمی و دو جمله‌ای از بین مدل‌های ریاضی استاندارد ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفت که مدل لگاریتمی بهترین برازش را ارائه کرد.

### منابع

- ۱- رفیعی، ش. و م. کاشانی نژاد. ۱۳۸۴. شبیه‌سازی رطوبت در طی خشک شدن دانه پسته (رقم اوحدی) با دما بالا بوسیله روش اجزاء محدود. مجله علوم و صنایع غذایی ایران، دوره ۲، شماره ۱، ص ۱۵-۲۶.
- ۲- متولی، ع.، س. مینایی، ع. احمدی، م. ح. عزیزی و م. ه. خوش تقاضا. ۱۳۸۹. سینتیک خشک کردن دانه‌های انار و میزان انرژی مصرفی در خشک کردن به روش میکروویو. فصلنامه علوم و صنایع غذایی، دوره ۷، شماره ۴: ۴۳-۵۲.
- ۳- میرنظامی ضیابری، س. ح.، ز. حمیدی اصفهانی و م. فائز. ۱۳۷۵. میکروویو در صنایع غذایی و منازل. ناشر: ادبستان. ۳۰۰ ص.
- 4- Balbay, A., and O.Sahin. 2013. Drying of pistachios by using a microwave assisted dryer. *Acta Scientiarum Technology*, Vol 35(2): 263-269.
- 5- Balbay, A., S. Omer and H. Ulker. 2013. Modeling of convective drying kinetics of Pistachio kernels a fixed bed drying system. *Thermal Science*, 17(3): 839-846.
- 6- Bozkir, O. 2006. Thin-layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. *Journal of Food Engineering*, 77, 146-151.
- 7- Drouzas, A. E., and H. Schubert. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28, 203-209.
- 8- Goyal, R. K., A. R. P. Kingsly, M. R. Manikantan and S. M. Ilyas. 2007. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79, 176-180.



- 9- Guine, R. P. F., and R. M. C. Fernandes. 2006. Analysis of the drying kinetics of chesnuts. *Journal of Food Engineering*, 76, 460-467.
- 10- Gunasekaran, S. 1999. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technology*, 17(3): 395-412.
- 11- Kader, A. A., C. M. Heints, J. M. Labavitch and H. L. Rae. 1982. Studies related to the description and evaluation of pistachio nut quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 107 (5), 812-816.
- 12- Kashaninejad, M., A. Mortazavi, A. Safekordi and L. G. Tabil. 2006. Some physical properties of pistachio (*Pistacia vera L.*) nut and its kernel. *Journal of Food Engineering*, 72: 30-38.
- 13- Kouchakzadeh, A., and S. Shafeei. 2010. Modeling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Conversion and Management*, 51: 2012-2015
- 14- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2): 71-78.
- 15- Ozbek, B., and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83, 541-549.
- 16- Palipane, K. B., and R. S. Driscoll. 1994. The thin-layer drying characteristics of macadamia in-shell nuts and kernels. *Journal of Food Engineering*, 23, 129-144.
- 17- Schiffman, R.F. 1992. Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Technology*, 46 (12), 50-52, 56.
- 18- Sharma, G. P., and S. Prasad. 2001. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of food engineering*, 50: 99-105.
- 19- Soysal, Y., S. Oztekin and O. Eren. 2006. Microwave drying of parsley: modeling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, Vol. 93, No. 4, pp. 403-413.
- 20- Tavakolipoor, H. 2011. Drying kinet of pistachio nuts (*Pistacia vera L.*). *World Applied Sciences Journal*, 12(9): 1639-1646
- 21- Wang, Z., J. Sun and X. Liao. 2007. Mathematical modeling of hot air drying of thin-layer of apple pomace. *Food Research International*, 40: 39-46.



## Mathematical modeling of intermittent microwave drying of Pistachio (*Pistacia vera* L.) nuts

Ali mashaallah Kermani\*

\* Asistant Professor, Department of Agro-Technology, College of Aburaihan, Tehran University  
a\_m\_kermani@yaho .com

### Abstract

In this research, the intermittent microwave drying kinetics of three varieties of Qazvinian pistachio nuts were investigated. Drying experiments were performed in a 800 W, 2450 MHz domestic microwave oven with different material loads 50, 100 and 150 g at microwave power cycle of 6 s on/70 s off at 800 W microwave output power with three repeated. As well as control samples were dried in the sun. For modeling microwave drying method was evaluated five drying models including Page, Hendrson and Pabis, Logarithmic and Binomial of the standard mathematical models. The degree of goodness fitting was determined by calculating and comparing the values of  $R^2$  (determination coefficient),  $\chi^2$  (reduced chi-square) and RMSE (root of mean square error) for any of the models, that the logarithmic model gave the best fit.

**Key words:** Drying, Mathematical mod , Microwave, Pistachio nuts.