

بررسی سینتیک و انرژی مصرفی خشک کردن توت سفید در خشک کن مایکروویو

حمید خفاجه^۱، احمد بناکار^{۲*}، محمد زارعین^۳، محمدهادی خوش تقاضا^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۸)

چکیده

در این مطالعه به بررسی فرآیند سینتیک خشک کردن، به دست آوردن ضریب نفوذ حرارتی موثر، تعیین بهترین مدل ریاضی و به دست آوردن انرژی فعالسازی برای توت سفید با استفاده از آون مایکروویو پرداخته شده است. برای فرآیند مدل سازی ریاضی، ۹ مدل تجربی بر داده های آزمایشگاهی برازش داده شد و سپس با توجه به بزرگترین مقدار ضریب تبیین (R^2)، کمترین مقدار مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بهترین مدل ریاضی با دقت بالا انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل های مورد بررسی، نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده های به دست آمده دارد. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۵۰۰ وات به میزان $5/3 \times 10^{-6}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۲۰۰ وات به میزان $1/42 \times 10^{-6}$ به دست آمد. میزان انرژی فعال سازی و ثابت نفوذ رطوبتی موثر در خشک کردن لایه های توت سفید بر اساس یک رابطه نمایی به ترتیب به میزان $10/83$ وات بر گرم و $1E-5$ به دست آمد. میزان انرژی مصرفی مخصوص برای خشک کردن توت سفید نیز بین $0/7$ تا $2/58$ کیلووات ساعت بر کیلوگرم به دست آمد.

کلید واژگان: توت سفید، آون مایکروویو، مدل ریاضی، ضریب نفوذ رطوبتی موثر، انرژی فعالسازی

*مسئول مکاتبات: ah_banakar@modares.ac.ir

1. Correlation coefficient
2. Chi-square
3. Root mean square error

۱- مقدمه

خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو می‌تواند جانشین مناسبی برای خشک‌کن های هوای گرم محسوب شود. فرآیند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. برخلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می‌یابد [۱۱]. برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن، سینتیک خشک شدن محصول مورد نظر را به دست آورد، یک سری ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، ضریب انتشار موثر رطوبت و نظایر آن مورد نیاز است تا بتوان به کمک آن‌ها خشک کن جدیدی با کارایی مناسب طراحی کرد. به همین دلیل در این بررسی به منظور ارزیابی دستگاه خشک کن مایکروویو، رفتار خشک شده توت سفید، انتخاب مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن، تاثیر توان‌های مختلف مایکروویو بر آهنگ از دست دادن رطوبت در آن مایکروویو مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

توت سفید از بازار محلی شهر تهران تهیه شد و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای $+4$ درجه سلسیوس نگهداری شد. میزان رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آن به دست آمد. نمونه های 40 گرمی در آن در دمای 105 ± 2 درجه سلسیوس قرار گرفته و خشک شد، به طوری که تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این کار در 3 تکرار انجام شد. از فرمول زیر برای تعیین میزان رطوبت اولیه بر پایه تر استفاده شد [۱،۵].

$$100 \times \frac{\text{جرم نمونه بعد از خشک کردن در آن} - \text{جرم اولیه نمونه}}{\text{جرم اولیه نمونه}} = \text{درصد رطوبت بر پایه تر}$$

درصد رطوبت بر پایه تر برای توت سفید 82% به دست آمد. توزین نمونه‌های 40 گرمی توسط ترازوی دیجیتالی بعد از آنکه نمونه‌ها 3 ساعت در دمای محیط قرار گرفتند، انجام شد. فرآیند خشک شدن توت سفید با استفاده از آن مایکروویو

توت از خانواده *Moraceae* و جنس *Morus* است که شامل 24 گونه و حداقل 100 واریته شناخته شده می‌باشد. در ایران سه گونه‌ی آن با نام‌های توت سفید (*Morus alba*)، توت سیاه (*Morus nigra*) و توت سرخ (*Morus rubra*) با واریته‌های متعدد وجود دارد. توت سفید، بومی شرق آسیاست و در هند، پاکستان و ایران گسترده شده است. توت سفید جزء میوه‌های نرم است و این میوه نسبت به کپک و مخمر حساس بوده، در هنگام برداشت نیز نسبت به ضربه حساس است و نمی‌توان آن‌ها را به طور مناسبی انبار کرد. میوه‌های نرم فصل برداشت بسیار کوتاهی داشته و نگهداری آن‌ها در دوره پس از برداشت، معمولاً به صورت انجماد عمیق می‌باشد [۱]. یکی از مهم‌ترین مشکلات در رابطه با نگهداری توت سفید، قهوه‌ای شدن آن است که به خصوص در اثر ضربه این عمل تشدید می‌شود و موجب بد رنگ شدن محصول و تغییر طعم آن می‌گردد. این واکنش در هنگام خشک شدن نیز مشاهده می‌گردد. نگهداری توت در دمای یخچال و سرد کردن سریع آن بلافاصله پس از جمع‌آوری تا حد زیادی سرعت قهوه‌ای شدن را کاهش می‌دهد [۲]. توت‌های شسته نشده را می‌توان چند روز در یخچال نگهداری کرد و به دلیل کوتاه بودن فصل برداشت و حساسیت به انبار کردن، غالباً خشک شدن به عنوان روش موثر نگهداری استفاده می‌شود [۳،۴]. متأسفانه در ایران توت خشک به صورت بازار پسندی بسته‌بندی نمی‌شود [۱]. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های محافظت محصولات غذایی می‌باشد و از آنجایی که باعث کاهش فعالیت‌های آبی محصولات، کاهش فعالیت‌های میکروبیولوژی محصولات و موجب کمترین تغییرات فیزیکی و شیمیایی در طی فرآیند نگهداری می‌شود، یکی از عمومی‌ترین روش‌هایی است که در بهبود نگهداری مواد غذایی از جمله توت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۵،۶]. استفاده موفقیت آمیز خشک کردن محصولات غذایی با تکنولوژی مایکروویو خلاء برای بسیاری از محصولات غذایی و گیاهی از جمله زغال اخته، هویج، پونه کوهی و انواع توت گزارش شده است [۷،۸،۹،۱۰].

سه معیار ضریب همبستگی R^2 ، مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی RMSE برای تعیین بهترین برازش استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,t} - \overline{MR}_{pre})(MR_{exp,t} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,t} - \overline{MR}_{pre})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{exp,t} - \overline{MR}_{pre})^2}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,t} - \overline{MR}_{pre})^2}{n - z}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,t} - \overline{MR}_{pre})^2}$$

در روابط فوق $MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی آم، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده آم، n تعداد مشاهدات و z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن لایه‌های توت سفید را توصیف کند، مدل دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی R^2 و کمترین مقدار مربع میانگین خطای نسبی RMSE و مربع کای χ^2 می‌باشد.

۲-۲- ضریب نفوذ حرارتی موثر

برای به دست آوردن ضریب نفوذ حرارتی موثر از معادله زیر استفاده می‌شود [۵].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2 D_{eff} t}{4a^2}\right]$$

که در آن a نصف ضخامت نمونه به (m)، t زمان خشک شدن به (s)، n تعداد مشاهدات و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی موثر به (m^2/s) می‌باشد. معادله (۷) در مدت زمان‌های طولانی خشک شدن به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4a^2}\right]$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله بالا و رسم نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان، نمودار خطی حاصل می‌شود که از شیب نمودار به دست آمده با استفاده از رابطه زیر می‌توان D_{eff} را به دست آورد.

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2}$$

(Samsung-M945) در ۴ سطح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. توزین نمونه‌ها هر ۳۰ ثانیه توسط ترازوی دیجیتال (-GF600 Japan) با دقت ± 0.01 گرم انجام شد.

۲-۱- خشک کردن نمونه‌های توت سفید

توزین نمونه‌ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه تر به ۲۰٪ برسد ادامه می‌یابد. کسر رطوبتی توت سفید در طول خشک کردن با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) و M_0 محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) می‌باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_t کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن صرف نظر کرد و معادله را به صورت زیر ساده کرد [۱۲].

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

معادله‌های متعددی برای پیش‌بینی روند خشک شدن محصولات وابسته به دمای خشک شدن ارائه شده‌است [۳]. این معادله‌ها در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی فرآیند خشک شدن.

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل
۱	مدل نیوتون	$MR = \exp(-kt)$
۲	مدل پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$
۳	مدل اصلاح شده پیچ ۱	$MR = \exp(-(kt)^n)$
۴	مدل وانگ و سینگ	$MR = 1 + a.t + bt^2$
۵	مدل هندرسون و پابیس	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
۶	مدل لگاریتمی	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
۷	مدل اصلاح شده پیچ ۲	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$
۸	مدل میدیلی	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b.t$
۹		

۳-۲- انرژی فعال سازی

از آنجایی که اندازه‌گیری دما در خشک‌کن میکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه‌گیری نبود، برای به دست آوردن انرژی فعال‌سازی از شکل اصلاح شده معادله آرنیوس استفاده شد. برای به دست آوردن انرژی فعال‌سازی در میکروویو می‌توان از وابستگی بین ضریب نفوذ رطوبتی موثر و نسبت توان خروجی میکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه استفاده نمود [۱۳]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right)$$

که در آن p توان میکروویو (W)، m جرم نمونه (g)، E_a انرژی فعال‌سازی (W/g) و D_0 ضریب نفوذ رطوبتی موثر (m^2/s) می‌باشد.

۳-۲-۴- انرژی مصرفی در میکروویو

انرژی مصرفی در میکروویو از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$t \times E_t = P$$

که در آن P توان خروجی از میکروویو (W) و t مدت زمان خشک شدن (h) می‌باشد.

۳-۲-۵- انرژی مخصوص خشک‌کردن به روش میکروویو

میزان انرژی مخصوص خشک کردن توت سفید برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم توت سفید که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$E_{kg} = \frac{E_t}{w_0}$$

E_{kg} انرژی مخصوص مورد نیاز (kWh/kg) و w_0 وزن اولیه نمونه آزمایشی (kg) است. در نهایت برای مدل‌سازی داده‌های حاصل از آزمایشات، از نرم افزار MATLAB 7.12 استفاده شد.

۳- نتیجه گیری و بحث

۳-۱- بررسی سینتیک خشک شدن

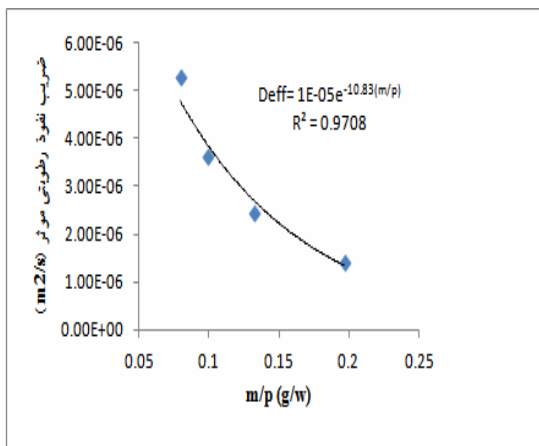
شکل (۱) نمودار مربوط به نسبت رطوبت و زمان خشک شدن می‌باشد. با توجه به شکل، با افزایش توان میکروویو سرعت خروج رطوبت از توت سفید سریعتر شده و زمان خشک‌شدن کاهش می‌یابد. این روند در توان‌های بالاتر با شدت بیشتری رخ می‌دهد. در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن زیاد می‌باشد اما با افزایش توان از ۲۰۰ به ۳۰۰ وات، بین زمان‌های خشک کردن اختلاف زیادی وجود دارد. مدت خشک کردن نمونه‌ها در توان‌های مختلف متفاوت بود. توان بیشتر از ۵۰۰ وات سبب ایجاد پدیده سوختگی در توت سفید و عدم ادامه آزمایش شد. از آنجا که وزن اولیه نمونه‌ها، ۴۰ گرم به طور یکسان در شروع هر آزمایش بود لذا آزمایش‌ها تا آنجا ادامه پیدا می‌کرد که اختلاف وزنی بین دو وزن‌گیری متوالی وجود نداشت و وزن تقریبی نمونه‌ها در انتهای هر آزمایش با هم برابر بود. افزایش توان خروجی میکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد؛ زیرا این‌گونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از میکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای میکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت نمونه می‌شود. به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. مدت زمان خشک شدن توت سفید در توان ۲۰۰ وات حدود ۳/۸۷ برابر بیشتر از توان ۵۰۰ وات به دست آمد. در شروع روند خشک کردن، رطوبت اولیه توت سفید زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با گذشت زمان، میزان رطوبت محصول کاهش پیدا کرده و نرخ کاهش رطوبت به طور طبیعی کاهش می‌یابد. نمونه‌ها، بیشتر رطوبت خود را در اوایل فرایند خشک شدن از دست می‌دهند و در نتیجه زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده لازم است.

جدول ۲ مقادیر ضریب نفوذ (m^2/s) و ضریب تبیین در سطوح توانی مختلف.

توان (وات)	m^2/s	R^2
۲۰۰	$1/42 \times 10^{-6}$	۰/۹۷۹
۳۰۰	$2/44 \times 10^{-6}$	۰/۹۸۳
۴۰۰	$3/64 \times 10^{-6}$	۰/۹۸۳
۵۰۰	$5/3 \times 10^{-6}$	۰/۹۸۹

۳-۳- انرژی فعال سازی در مایکروویو

انرژی فعال سازی را می توان با رسم نمودار (D_{eff}) بر حسب مقادیر (m/p) به دست آورد. مقدار انرژی فعال سازی برای توت سفید $10/83$ وات بر گرم به دست آمد.

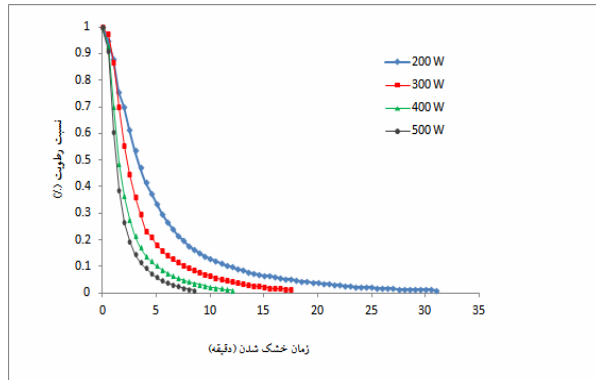


شکل ۳ ارتباط بین ضریب نفوذ رطوبتی موثر و توان خروجی مایکروویو / وزن نمونه برای توت سفید.

۴-۳- مدل سازی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار متلب انجام شد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک شدن توت سفید را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 و RMSE انتخاب شد. در جدول (۳) مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE آمده است. با مقایسه مقادیر R^2 ، χ^2 و RMSE مشخص شد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توان های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات بود که می توانست رفتار خشک شدن توت سفید را پیش بینی کند.

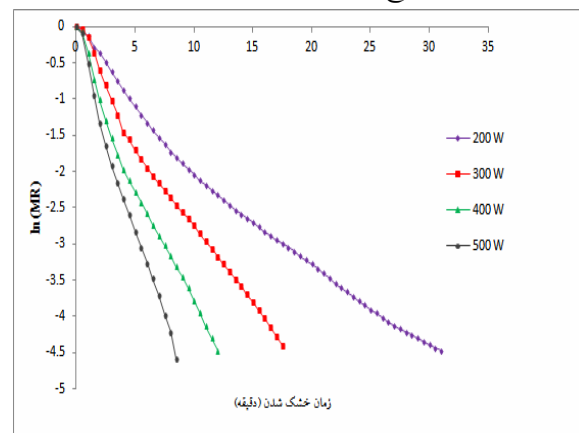
با توجه به اینکه مدل میدیلی ($MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b \cdot t$) برای توان های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات انتخاب شد، ضرایب آن در جدول (۴) آمده است.



شکل ۱ منحنی های خشک شدن توت سفید در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات.

۳-۲- ضریب نفوذ حرارتی موثر

شکل (۲) نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان را در حالت های مختلف خشک کردن نشان می دهد. از شیب نمودار خط برازش داده شده بر هر یک از منحنی ها، ضریب نفوذ حرارتی موثر به دست می آید. در جدول (۲) مقادیر ضریب نفوذ حرارتی موثر و ضریب تبیین در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات آورده شده است. بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان $5/3 \times 10^{-6}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان $1/42 \times 10^{-6}$ به دست آمد. ضریب نفوذ حرارتی موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. از آنجا که توان خروجی در خشک کن مایکروویو افزایش می یابد و دمای داخل محفظه زیاد می شود در نتیجه میزان ضریب نفوذ حرارتی موثر در توان های بالاتر افزایش می یابد. کرولیس و همکاران نیز مقادیر ضریب نفوذ حرارتی موثر توت فرنگی را در توان های مختلف بدست آورده اند که با نتایج فوق یکسان می باشد [۴].



شکل ۲ نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات.

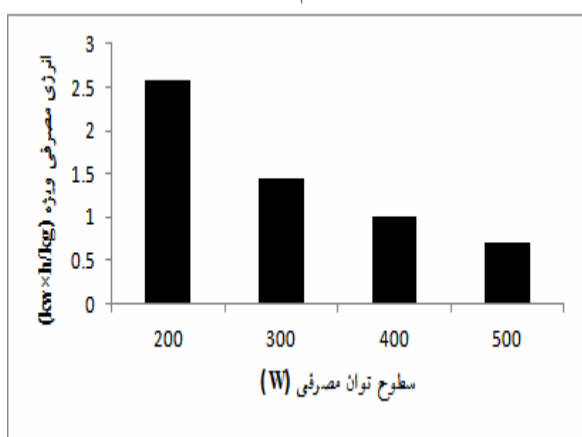
جدول ۳ R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای توان‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات.

E	۵۰۰ وات		۴۰۰ وات			۳۰۰ وات			۲۰۰ وات		مدل	
	χ^2	R^2	RMS E	χ^2	R^2	RMS E	χ^2	R^2	RMSE	χ^2		R^2
۴	2.05×10^{-3}	۰.۹۷۸۳	۰.۰۳۵۶۲	1.26×10^{-3}	۰.۹۸۴۲	۰.۰۳۷۸۹	1.34×10^{-3}	۰.۹۸۱۳	۰.۰۲۰۰۷	4.04×10^{-4}	۰.۹۹۳۳	لوئیس
۳	1.3×10^{-3}	۰.۹۸۶۴	۰.۰۳۳۳	1.06×10^{-3}	۰.۹۸۶۷	۰.۰۳۵۱۶	1.3×10^{-3}	۰.۹۸۴۴	۰.۰۲۰۱۸	4×10^{-4}	۰.۹۹۳۳	پیچ
۵	1.34×10^{-3}	۰.۹۸۳	۰.۰۳۳۳۷	1×10^{-3}	۰.۹۸۱۷۵	۰.۰۳۳۵۹	1.03×10^{-3}	۰.۹۸۶۶	۰.۰۱۹۳۷	3.69×10^{-4}	۰.۹۹۳۸	هندرسون و پاییس
۴	1.59×10^{-3}	۰.۹۸۳۱	۰.۰۳۱۰۳	1.1×10^{-3}	۰.۹۸۹	۰.۰۳۰۳۷	1.64×10^{-3}	۰.۹۸۱۷	۰.۰۱۲۸۷	1.6×10^{-4}	۰.۹۹۷۳	لگاریتمی
۱	1.64×10^{-3}	۰.۹۹۰۹	۰.۰۲۷۵	6.61×10^{-4}	۰.۹۹۱۷	۰.۰۲۷۴۳	6.11×10^{-4}	۰.۹۹۱	۰.۰۱۳۳۶	1.96×10^{-4}	۰.۹۹۶۷	میدیلی
۲	۰.۰۰۱۳	۰.۹۸۶۲	۰.۰۳۳۳	۰.۰۰۱	۰.۹۸۶۷	۰.۰۳۵۱۹	۰.۰۰۱۲	۰.۴۴۹۱	۰.۰۰۲۰۱۸	4×10^{-4}	۰.۹۹۳۳	پیچ اصلاح شده
۱	۰.۰۰۷۴	۰.۹۲۱	۰.۱۰۴۲	۰.۰۰۹۸	۰.۸۷۱	۰.۰۹۷۹۱	۰.۰۰۹۳	۰.۸۷۸۷	۰.۱۱۳۱	۰.۰۱۲۵	۰.۸۹۰۳	وانگ و سینگ
۷	۰.۰۰۲	۰.۹۷۸۸	۰.۰۳۷۲۲	۰.۰۰۱۲	۰.۹۸۴۲	۰.۰۳۹۳۴	۰.۰۰۱۴	۰.۹۸۱۳	۰.۰۲۰۴	4.02×10^{-4}	۰.۹۹۳۳	تقریب پخش شده
۴	۰.۰۰۱۳	۰.۹۸۶۲	۰.۰۳۴۰۵	۰.۰۰۱	۰.۹۸۶۷	۰.۰۳۵۶۹	۰.۰۰۱۲	۰.۹۸۴۴	۰.۰۲۰۳۵	4.1×10^{-4}	۰.۹۹۳۳	مدل اصلاح شده پیچ ۲

جدول ۴ ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل میدیلی برای توان‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات.

مدل میدیلی	a	b	k	n
۲۰۰ وات	۱/۰۶۴	۰/۰۰۱۹۸	۰/۱۸۶۲	۰/۱۹۲۵
۳۰۰ وات	۱/۰۵۶	۰/۰۰۲۱۴	۰/۲۸۱۶	۰/۲۸۱۶
۴۰۰ وات	۱/۰۳۹	۰/۰۰۲۸۷۳	۰/۴۳۴۴	۱/۱۶
۵۰۰ وات	۱/۰۳۴	۰/۰۰۴۲۴۵	۰/۵۲۵۴	۱/۲۸۹

دهد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۰/۷ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۴ انرژی مخصوص مورد نیاز طی خشک کردن توت سفید در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات.

۳-۵- انرژی مصرفی ویژه

یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی و ارزیابی خشک کن‌ها میزان انرژی مصرفی است. خشک کردن به روش مایکروویو یکی از روش‌های نسبتاً ارزان می‌باشد و انرژی کمتری را نسبت به بقیه خشک کن‌ها مصرف می‌کند. از کان و همکاران از روش مایکروویو برای خشک کردن برگ‌های اسفناج استفاده کرده‌اند و نتایج آن‌ها نشان داد که انرژی مصرفی برای خشک کردن برگ‌های اسفناج در این روش نسبت به روش‌های دیگر مرسوم، کمتر می‌باشد [۱۴]. انرژی ویژه، عبارت است از میزان انرژی مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلوگرم محصول تازه. آنالیز انرژی در مراحل مختلف خشک شدن توت سفید با استفاده از داده‌های به دست آمده در طول آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. میزان انرژی مصرفی ویژه در طی زمان خشک شدن، با استفاده از انرژی مصرفی در مایکروویو و وزن نمونه‌های توت سفید به دست آمد. شکل (۴) میزان انرژی مصرفی ویژه در مایکروویو در توان‌های مختلف را نشان می‌-

European Food Research Technology, 221: 803-808.

- [5] Arslan, O., Erzengin, M., Sinan, S. and Ozensoy, O. (2004). Purification of mulberry (*Morus alba* L.) polyphenol oxidase by affinity chromatography and investigation of its kinetic and electrophoretic properties, *Food chemistry* 88(3): 479-484.
- [6] Banakar A., Karimi Akandi S. R. (2012). Comparison of Mathematical and Artificial Neural Network Modeling for Rosa Petals using Hot Air Drying Method, *International Journal of Computational Intelligence and Applications* 11(2): 1250014-1-13.
- [7] Lin, T.M., Durance, T.D., Scaman, C.H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air-dried and freeze-dried carrot slices. *International Food Research Journal* 31: 111-117.
- [8] Liu Q, Bakker-Arkema F. W. (1971). Stochastic modeling of grain drying. Part 2: Model development. *Agricultural Engineering Research* 1971; 66: 275-280. *Agricultural Engineering Research* 66: 275-280.
- [9] White G.M, Ross I.J, Ponekert, R. (1981). Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE* 24: 466-468.
- [10] Yagcioglu A, Degirmencioglu A, Cagatay F. (1991). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In A. Bascetincelik (Ed.), *Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy*, Adana, Turkey, 565-569.
- [11] Schiffman, R.F. (1992). Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Technology* 58:52-56.
- [12] Kassem A.S. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. 13th international congress on agricultural engineering, Morocco, vol 6.
- [13] Chhinnman M.S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE* 27: 610-615.
- [14] Ozkan. A., Akbudak. B., Akbudak. N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering* 78 : 577-583

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر توت سفید ارائه شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک شدن توت سفید بیان شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک شدن است که میزان R^2 اغلب در حدود ۰/۹۹۰۹ تا ۰/۹۹۶۷ و میزان مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی RMSE به ترتیب در حدود 1.06×10^{-4} تا 1.06×10^{-4} و 0.1436 تا 0.3241 بود. به عبارت دیگر شاخص ضریب تبیین مدل میدیلی، بیشترین مقدار و دو شاخص دیگر کمترین مقدار را نسبت به مدل‌های دیگر داشتند. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی موثر در توان ۵۰۰ وات به میزان $5/3 \times 10^{-6}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی موثر در توان ۲۰۰ وات به میزان $1/42 \times 10^{-6}$ به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ رطوبتی در خشک کردن لایه‌های توت سفید بر اساس یک رابطه نمایی به ترتیب به میزان $10/83$ وات بر گرم و $1E-5$ به دست آمد. با توجه به نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که خشک کردن با مایکروویو به دلیل زمان کوتاه آن، روش مناسبی برای خشک کردن بیشتر مواد غذایی با رطوبت بالا به ویژه توت سفید باشد.

۵- منابع

- [1] Ertekin C., Yaldız O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Food Engineering*;63: 349-359.
- [2] Diamante L.M, Munro P.A. (1991). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*;51: 271-276.
- [3] Duke, J, A. (1983). *Handbook of Energy Crops*, Centre for New Crops & Plants Products, Purdue University.
- [4] Krulis, M., Kuhnert, S. Leiker M. and Rohm, H. (2005). Influence of energy input and initial moisture on physical properties of microwave-vacuum dried strawberries.

Investigation of mulberry drying kinetics and moisture Diffusivity under microwave oven

Khafajeh H.¹, Banakar A.^{2*}, Zarein M.³, Khoshtaghaza M. H.⁴

1. M.Sc Student of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Assistant Prof. of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3. Ph.D Student of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
4. Associate Prof. of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received: 90/6/20 Accepted: 91/2/8)

In this research drying kinetics, moisture diffusivity, determination of most appropriate mathematical modeling and activation energy of white mulberry were studied under microwave oven. For determination of most appropriate model, the highest value of R^2 and the lowest values of χ^2 and RMSE were used. For mathematical modeling, nine empirical models were fitted on experimental data and the best model was selected. The result of regression analysis showed that Midilli model has the best fitting with data. Moreover, the highest and lowest values of moisture diffusivity were obtained as 5.3×10^{-6} and 1.42×10^{-6} at power of 500 W and 200 W, respectively. Also the values of activation energy and moisture diffusivity in the drying of white mulberry were obtained as 10.83 and $1E-5$ respectively, based on an exponential relationship. Finally, the value of specific energy consumption for drying of white mulberry was found between 0.7 to 2.58.

Keywords: White mulberry, Microwave oven, Mathematical modeling, Moisture diffusivity, Activation energy

* Corresponding Author E-Mail Address: ah_banakar@modares.ac.ir