

بررسی سینتیک خشک کردن توت سیاه و میزان انرژی مصرفی در آون مایکروویو

مهدی زجاجی^{a*}، امیر فرخ مظاهری^b، سحر نماینده^c، مهدیه ابوالحسنی^d

^a کارشناس پژوهشی آزمایشگاه صنایع غذایی مجتمع آزمایشگاهی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^b استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

^c دانشجوی دکتری صنایع غذایی، دانشگاه تهران، هیئت علمی دانشگاه غیرانتفاعی آبا، تهران، ایران

^d دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۵/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۱

چکیده

مقدمه: توت سیاه جزء میوه های نرم است. این میوه نسبت به آسیب های مکانیکی از قبیل ضربه در هنگام برداشت و آلودگی میکروبی (کپک و مخمر) حساس بوده که نمی توان آن را به طور مناسبی انبار کرد. به دلیل کوتاه بودن فصل برداشت و ماندگاری پایین، از روش خشک کردن برای افزایش ماندگاری استفاده می شود. خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش ها برای نگهداری مواد غذایی است. خشک کردن با کاهش رطوبت از ماده غذایی محافظت کرده و همچنین با کاهش فعالیت میکروبی از فساد در طول مدت نگهداری جلوگیری می کند. در این مطالعه به بررسی سینتیک خشک کردن، ضریب نفوذ حرارتی، تعیین بهترین مدل ریاضی و انرژی فعال سازی برای توت سیاه با استفاده از آون مایکروویو پرداخته شده است.

مواد و روش ها: خشک کردن توت سیاه با استفاده از آون مایکروویو در ۴ سطح توانی (۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات) انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. توزین نمونه ها هر ۳۰ ثانیه توسط ترازوی دیجیتالی (GF600-Japan) انجام شد. برای فرآیند مدل سازی ریاضی، ۹ مدل تجربی بر داده های آزمایشگاهی برازش داده شد و سپس با توجه به بیشترین مقدار (R^2)، کمترین مقدار (χ^2) و (RMSE) بهترین مدل ریاضی با دقت بالا انتخاب شد.

یافته ها: نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل های مورد بررسی، نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده های به دست آمده نشان می دهد. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۵۰۰ وات به میزان $3/28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ رطوبتی موثر در توان ۲۰۰ وات به میزان $9/58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد.

نتیجه گیری: نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که خشک کردن با مایکروویو می تواند روش مناسبی برای کاهش رطوبت مواد غذایی مرطوب به ویژه توت سیاه باشد.

واژه های کلیدی: آون مایکروویو، انرژی مصرفی، توت سیاه، مدل سازی ریاضی، نفوذ رطوبتی

مقدمه

توت از خانواده Moraceae و جنس های مهم آن، Ficus (دارای ۸۰۰ گونه)، Artocarpus (دارای ۵۰ گونه)، Morus (۱۰ گونه) و Cecropia (در حدود ۵۰ گونه) است. که شامل ۲۴ گونه و حداقل ۱۰۰ واریته شناخته شده می باشد (زرگری، ۱۳۷۲). در ایران سه گونه آن با نام های توت سفید (*Morus alba*)، توت سیاه (*Morus nigra*) و توت سرخ (*Morus rubra*) وجود دارد. که گونه مورد تحقیق در این پژوهش توت سیاه (*Morus nigra*) بوده است. توت سیاه، بومی شرق آسیاست و در هند، پاکستان و ایران گسترده شده است (Ertekin & Yaldiz, 2004). توت سیاه (*Morus nigra L.*) درختی است به ارتفاع ۱۰-۴ متر که به حالت طبیعی به ارتفاع ۲۰ متر نیز می رسد که با توجه به زیبایی درختش و میوه خوش طعمش در سراسر جهان پرورش داده می شود. میوه آن از توت سفید، بزرگتر به رنگ ارغوانی سیاه (پس از رسیدن کامل) و دارای طعم ترش و شیرین مطبوع است (زرگری، ۱۳۷۲). توت سیاه با توجه به داشتن مقادیر قابل توجهی از آنتوسیانین و رنگدانه به عنوان یک محصول صنعتی مورد توجه است. توت سیاه را می توان به صورت مربا، ژله، آب میوه، سس میوه، کیک، پودرمیوه، رنگ غذا استفاده نمود (Brijki et al., 2010). توت سیاه از ۸۴/۷ درصد آب، ۹ تا ۲۴ درصد مواد قندی، ۱/۸۶ درصد اسید مالیک، ۰/۴ درصد مواد آلومینوئیدی و مقادیری چربی، پکتیک، صمغ و املاح تشکیل شده است. از خواص درمانی میوه توت سیاه می توان به اثر درمانی آن بر درد گلو و التهاب دهان و آفت (Aphtes) اشاره داشت (زرگری، ۱۳۷۲). توت سیاه جزء میوه های نرم محسوب می گردد. این میوه نسبت به آلودگی میکروبی (کپک و مخمر) حساس بوده، در هنگام برداشت نیز نسبت به ضربه حساس است و دارای ماندگاری پایینی می باشند. میوه های نرم فصل برداشت بسیار کوتاهی داشته و نگهداری آن ها در دوره پس از برداشت، معمولاً به صورت انجماد عمیق می باشد (Ertekin & Yaldiz, 2004). توت های شسته نشده را می توان چند روز در یخچال نگهداری کرد و به دلیل کوتاه بودن فصل برداشت و حساسیت به انبار کردن، غالباً خشک کردن به عنوان روش موثر نگهداری استفاده می شود (Duke, 1983; Kwok et al., 2004).

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری محصولات غذایی می باشد که با کاهش فعالیت آبی می تواند باعث کند شدن فعالیت های میکروارگانیسم ها در محصول گردد. با توجه به زمان کوتاه خشک شدن در روش مایکروویو نسبت به سایر روش های رایج در خشک کردن، کمترین آسیب فیزیکی و شیمیایی در طی فرآیند ایجاد می گردد که می توان جهت افزایش ماندگاری مواد غذایی از جمله توت استفاده کرد (Arslan et al., 2004). انواع توت ها از جمله توت سفید می توانند جایگزین خوبی برای قندها باشند، علاوه بر این توت سیاه در مقایسه با توت سفید بدلیل تفاوت عمده در رنگ و مزه از اهمیت بیشتری در صنعت غذا برخوردار است که از آن می توان جهت طعم و رنگ دادن استفاده کرد بنابراین می توان فرضیه ای مبتنی بر وجود اختلاف بین آهنگ خشک شدن، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی خشک شدن بنا نهاد. 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 (Yongsawatidigul & Gunasekaran, 1996; Liu & Bakker-Arkema, 1971; Yousif et al., 2000; Doymaz, 2004; Ozkan et al., 2005). خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو می تواند جانشین مناسبی برای خشک کردن در جریان هوای گرم محسوب شود. فرآیند خشک کردن با مایکروویو در مقایسه با روش های مرسوم و هوای گرم ارزان بوده و امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. برخلاف سامانه های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می یابد (Wang & Singh, 1978). این امواج الکترو مغناطیس دارای پهنای باند ۳۰۰ MHz تا ۳۰۰ GHz می باشد. اما معمول ترین بسامدهای مورد استفاده ۹۱۵ و ۲۴۵۰ MHz است. گرمایش مایکروویو دارای مزایای متعددی از قبیل افزایش سرعت گرم کردن، کنترل ساده تر سرعت گرمادهی، افزایش بازده تبدیل انرژی می باشد. از آنجا که کاربرد امواج الکترومغناطیس و به ویژه امواج مایکروویو در صنایع غذایی، شیمیایی و دارویی روز افزون می باشد، لازم است که رفتار این امواج و به ویژه زمانی که مواد غذایی در

شد. فرآیند خشک شدن توت سیاه با استفاده از آون مایکروویو (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 داخلی (GF600-Japan) با دقت ± 0.1 گرم انجام شد توزین تا زمانی انجام می‌گرفت که به ۲۰ درصد رطوبت خود برسد.

- مدل سازی

درصد رطوبت بر پایه تر در توت سیاه ۸۵٪ به دست آمد و توزین نمونه‌ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه تر به ۲۰٪ برسد ادامه می‌یابد. نسبت رطوبتی توت سیاه در طول خشک کردن با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

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

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)، 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_t و M_0 کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن صرف نظر کرد و معادله به (۳) ساده می‌شود (Kassem, 1998).

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

معادله‌های متعددی برای پیش‌بینی روند خشک شدن محصولات وابسته به دمای خشک شدن ارائه شده‌است که در این تحقیق از ۹ مدل استفاده شده است (Duke, 1983). این معادله‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. سه معیار ضریب همبستگی R^2 ، مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی RMSE برای تعیین بهترین برآزش استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}{n-z} \quad (5)$$

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

معرض آنها قرار می‌گیرد و نیز اثرات آن بر مواد غذایی مورد مطالعه قرار گیرد. گرمایش مایکروویو به دلیل ساز و کار خاص تولید و روش انتقال حرارت آن که از کلیه روش‌های دیگر انتقال حرارت (هدایت، جابجایی و تابش) متمایز بوده و دارای ویژگی‌ها و توانایی‌های منحصر بفردی است که باعث می‌شود تا استفاده از آن برای انجام فرآیندهای گوناگونی چون گرم کردن و خشک کردن محدودیت‌های خاصی را نداشته باشد.

برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن، سینتیک خشک شدن محصول مورد نظر را به دست آورد، نیاز به دانستن ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصول کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت و ضریب انتشار موثر رطوبت است که با داشتن این اطلاعات می‌توان رفتار خشک شدن آن محصول را بهینه سازی کرد. به همین دلیل در این بررسی رفتار خشک شدن توت سیاه و تاثیر توان‌های مختلف مایکروویو بر آهنگ خروج رطوبت به منظور ارزیابی دستگاه خشک‌کن مایکروویو مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین مناسب‌ترین مدل ریاضی جهت توصیف سینتیک خشک شدن آن بیان گردیده است.

مواد و روش‌ها

میوه توت مورد آزمایش از واریته (*Morus nigra*) یا توت سیاه است. آزمایشات بلافاصله بعد از تهیه نمونه از بازار محلی شهر تهران، در آزمایشگاه شروع شد و حداکثر ۲۴ ساعت در دمای یخچال (در حدود ۴ درجه سانتی‌گراد) جهت ادامه آزمایشات نگهداری شد. میزان رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون به دست آمد. نمونه‌های ۴۰ گرمی در آون (Memmert - UNB400) در دمای 105 ± 2 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و خشک شد، به طوریکه تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این کار در ۳ تکرار انجام شد. از فرمول (۱) برای تعیین میزان رطوبت اولیه بر پایه تر استفاده شد (Ertekin & Yaldiz, 2004).

$$100 \times \frac{\text{جرم نمونه بعد از خشک کردن در آون} - \text{جرم اولیه نمونه}}{\text{جرم اولیه نمونه}} = \text{درصد رطوبت بر پایه تر} \quad (1)$$

توزین نمونه‌های ۴۰ گرمی توسط ترازوی دیجیتالی بعد از آنکه نمونه‌ها ۳ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند، انجام

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی فرآیند خشک شدن

| شماره مدل | نام مدل | معادله مدل |
|-----------|---|--------------------------------------|
| ۱ | مدل نیوتون (Mohsenin, 1986) و (Schiffman, 1992) | $MR = \exp(-kt)$ |
| ۲ | مدل پیچ (Westerman <i>et al.</i> , 1973) و (Zhang & Itchfield, 1991) | $MR = \exp(-kt^n)$ |
| ۳ | مدل اصلاح شده پیچ ۱ (Singh <i>et al.</i> , 1999) و (Yagcioglu <i>et al.</i> , 1991) | $MR = \exp(-(kt)^n)$ |
| ۴ | مدل وانگ و سینگ (White <i>et al.</i> , 1981) | $MR = 1 + a.t + bt^2$ |
| ۵ | مدل هندرسون و پابیس (Doymaz, 2004) | $MR = a.\exp(-kt)$ |
| ۶ | مدل لگاریتمی (Yousif <i>et al.</i> , 2000) | $MR = a.\exp(-kt) + c$ |
| ۷ | مدل تقریبی انتشار (Lin <i>et al.</i> , 1998) | $MR = a.\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$ |
| ۸ | مدل اصلاح شده پیچ ۲ (Doymaz, 2004) | $MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$ |
| ۹ | مدل میدیلی (Midilli <i>et al.</i> , 2002) | $MR = a.\exp(-kt^n) + b.t$ |

در روابط فوق $MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی i ام، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده i ام، n تعداد مشاهدات و Z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن لایه‌های توت سیاه 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.

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2} \quad (9)$$

- انرژی فعال‌سازی

از آنجایی که اندازه‌گیری دما در خشک‌کن میکروویو در هنگام کار به طور دقیق میسر 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 (Chhninman, 1984):

$$D_{eff} = D.\exp\left(-\frac{E_a.m}{p}\right) \quad (10)$$

- انرژی مصرفی در میکروویو

انرژی مصرفی در میکروویو از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود (Chhninman, 1984):

$$E_t = P \times t \quad (11)$$

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

- انرژی مخصوص خشک کردن به روش میکروویو

میزان انرژی مخصوص خشک کردن توت سیاه برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم توت سیاه که با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (Chhninman, 1984):

در روابط فوق $MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی i ام، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده i ام، n تعداد مشاهدات و Z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن لایه‌های توت سیاه 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.

در روابط فوق $MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی i ام، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده i ام، n تعداد مشاهدات و Z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن لایه‌های توت سیاه 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.

- ضریب نفوذ موثر رطوبت

برای به دست آوردن ضریب نفوذ موثر از معادله زیر استفاده می‌شود (Arslan, *et al.*, 2004):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2 D_{eff}t}{4a^2}\right] \quad (7)$$

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:

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

با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله (۸) و رسم نمودار

خشک شدن توت سیاه در توان ۲۰۰ وات حدود ۳/۱۵ برابر بیشتر از توان ۵۰۰ وات به دست آمد.

$$E_{kg} = \frac{E_t}{W} \quad (12)$$

که E_{kg} انرژی مخصوص مورد نیاز (kW.h/kg) و W_0 وزن اولیه نمونه آزمایشی (kg) است.

یافته‌ها

- بررسی سینتیک خشک شدن

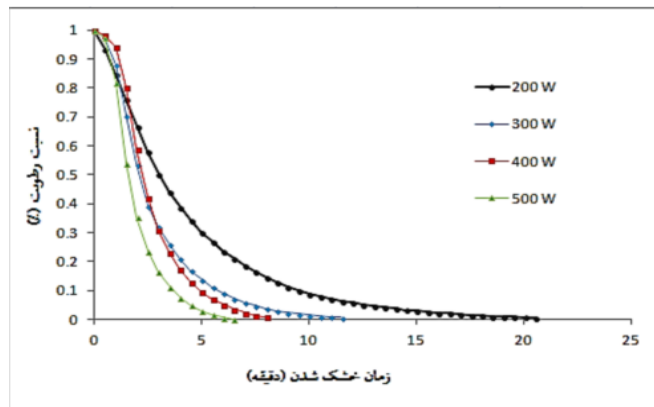
درصد رطوبت بر پایه تر برای توت سیاه ۸۵٪ به دست آمد شکل ۱ نمودار مربوط به نسبت رطوبت و زمان خشک شدن می‌باشد. با توجه به شکل، با افزایش توان میکروویو سرعت خروج رطوبت از توت سیاه بیشتر شده و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. این روند در توان‌های بالاتر با شدت بیشتری رخ می‌دهد. در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن 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 ۵۰۰W سبب ایجاد پدیده سوختگی در توت سیاه و عدم ادامه آزمایش شد. مدت زمان

- ضریب نفوذ موثر رطوبت

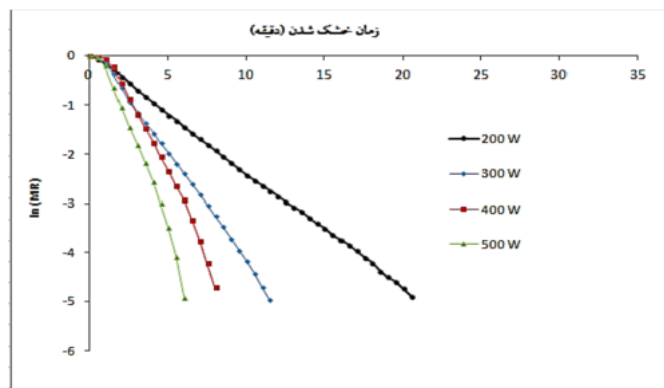
شکل ۲ نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان را در حالت‌های مختلف خشک کردن رانشان می‌دهد. از شیب نمودار خط برازش داده شده بر هر یک از منحنی‌ها، ضریب نفوذ حرارتی موثر به دست می‌آید. در جدول ۲ مقادیر ضریب نفوذ حرارتی موثر و ضریب تبیین در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات آورده شده است. بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان $3/28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان $9/58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد.

- انرژی فعال سازی در میکروویو

انرژی فعال سازی را می‌توان با رسم نمودار (Deff) بر حسب مقادیر (m/p) به دست آورد. مقدار انرژی فعال سازی برای توت سیاه ۹/۸۸۳ وات بر گرم به دست آمد.



شکل ۱- منحنی‌های خشک شدن توت سیاه در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات



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

بررسی سینتیک خشک کردن توت سیاه و میزان انرژی مصرفی در آون مایکروویو

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

| توان (وات) | D_{eff} (m^2/s) | R^2 |
|------------|-----------------------|-------|
| ۲۰۰ | $9/58 \times 10^{-6}$ | ۰/۹۹۹ |
| ۳۰۰ | $1/78 \times 10^{-5}$ | ۰/۹۹۸ |
| ۴۰۰ | $2/43 \times 10^{-5}$ | ۰/۹۷۹ |
| ۵۰۰ | $3/28 \times 10^{-5}$ | ۰/۹۷۶ |

بحث

بررسی سینتیک خشک شدن

از آنجا که وزن اولیه نمونه‌ها، ۴۰ گرم به طور یکسان در شروع هر آزمایش بود لذا آزمایش‌ها تا آنجایی ادامه پیدا می‌کرد که به رطوبت ۲۰٪ برسد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، مشاهده گردید که رطوبت محصول با سرعت بیشتری کاهش یافت؛ زیرا این گونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی مایکروویو، دما در درون محفظه و همچنین شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و در نهایت باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت نمونه می‌شود. به عبارت دیگر در توان‌های بالاتر انتقال جرم و حرارت بیشتر شده و رطوبت با سرعت بیشتری از محصول خارج می‌شود. در ابتدای فرآیند خشک شدن، رطوبت اولیه توت سیاه زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت نیز زیاد است. به تدریج با گذشت زمان، هر چه از رطوبت محصول کاسته شود نمونه‌ها، درصد بیشتری از رطوبت خود را در اوایل فرآیند خشک شدن از دست می‌دهند. در نتیجه برای از دست دادن رطوبت باقی مانده خود نیازمند به زمان طولانی‌تری می‌باشد.

۶۲

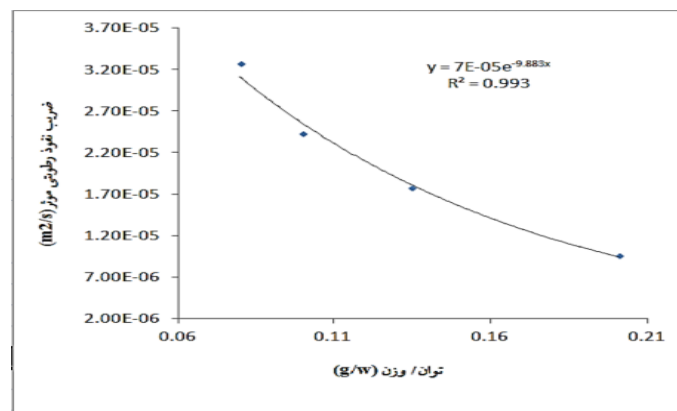
ضریب نفوذ موثر رطوبت

ضریب نفوذ حرارتی موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. از آنجا که توان خروجی در خشک کن مایکروویو افزایش می‌یابد و دمای داخل محفظه زیاد می‌شود در نتیجه میزان ضریب نفوذ حرارتی موثر در توان‌های بالاتر افزایش می‌باشد.

مدل سازی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار متلب ۲۰۱۱a انجام شد. بهترین مدلی که می‌تواند سینتیک خشک شدن توت سیاه 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 توان‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات بود که می‌توانست رفتار خشک شدن توت سیاه را پیش‌بینی کند.

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



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

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 خشک‌کن‌ها مصرف می‌کند. انرژی ویژه، عبارت است از میزان انرژی مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلوگرم محصول تازه. آنالیز انرژی در مراحل مختلف خشک شدن توت سیاه 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 سیاه به دست آمد. شکل ۴ میزان انرژی مصرفی ویژه در مایکروویو در توان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه در سطح معنی داری کاهش می‌یابد. ($P < 0.05$) به طوری که

کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۱/۳ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد.

نتیجه‌گیری

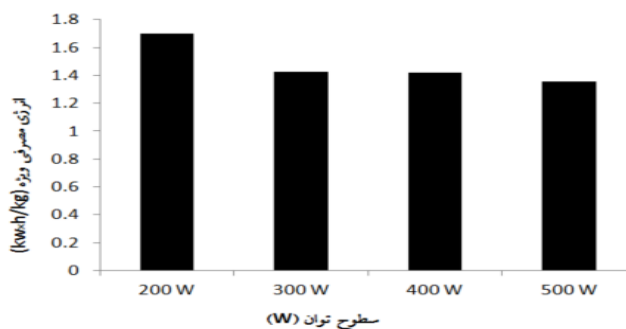
در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر توت سیاه ارائه شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک شدن توت سیاه بیان شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک شدن است که میزان R^2 اغلب در حدود ۰/۹۲۲۴ تا ۰/۹۹۹۲ و میزان مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی RMSE به ترتیب در حدود $5/95 \times 10^{-5}$ تا ۰/۰۱ و ۰/۰۰۸۰۱۳ تا ۰/۰۰۲۶ 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

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

| مدل | ۲۰۰ وات | | | ۳۰۰ وات | | | ۴۰۰ وات | | | ۵۰۰ وات | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------|----------------------|----------|--------|---------|----------|--------|---------|----------|---------|
| | RMSE | χ^2 | R^2 | RMSE | χ^2 | R^2 | RMSE | χ^2 | R^2 | RMSE | χ^2 | R^2 |
| لوتیس | ۰/۱۶۶۱ | $2/74 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۶۴ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۵۷۶۶ | ۰/۹۲۲۴ | ۰/۰۱۰۵ | ۰/۰۱۰۵ | ۰/۹۳۶۷ | ۰/۰۲۶ | ۰/۰۸۵ | ۰/۹۲۶۴ |
| پیچ | ۰/۱۰۴۸ | $1/07 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۸۶ | $8/8 \times 10^{-4}$ | ۰/۰۳۰۴۸ | ۰/۹۹۲۴ | ۰/۰۰۱۰۹ | ۰/۰۳۳۱۵ | ۰/۹۹۲۸ | ۰/۰۳۳۱۵ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۳۲۶۶ |
| پیچ اصلاح شده | ۰/۱۰۴۸ | $1/07 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۸۶ | $8/8 \times 10^{-4}$ | ۰/۰۳۰۴۸ | ۰/۹۹۲۴ | ۰/۰۰۱۰۹ | ۰/۰۳۳۱۵ | ۰/۹۹۲۸ | ۰/۰۳۳۱۵ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۴۱۳۵ |
| وانگ و سینگ | ۰/۰۶۹۰۲ | ۰/۰۰۴۶۷ | ۰/۹۳۹۰ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۰۵۹۲۲ | ۰/۹۶۲۲ | ۰/۰۰۵۵ | ۰/۰۷۳۸۷ | ۰/۹۶۹۴ | ۰/۰۷۳۸۷ | ۰/۰۴۱ | ۰/۰۶۷۱۶ |
| هندرسون و پاییس | ۰/۱۱۱۴۳ | $1/37 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۸۳ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۰۴۵۰۳ | ۰/۹۴۹۸ | ۰/۰۰۶۸ | ۰/۰۸۵۱۲ | ۰/۹۵۶۳ | ۰/۰۸۵۱۲ | ۰/۰۵۹ | ۰/۰۸۰۲ |
| لگاریتمی | ۰/۱۱۱۵۷ | $1/37 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۸۳ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۰۴۴۱۳ | ۰/۹۶۴۴ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۰۷۳۹۸ | ۰/۹۶۸۱ | ۰/۰۷۳۹۸ | ۰/۰۴۳ | ۰/۰۷۱۶ |
| تقریب پخش شده | ۰/۱۶۸۸ | $2/71 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۶۳ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۵۳۵۸ | ۰/۹۵۰۵ | ۰/۰۰۶۷ | ۰/۰۸۷۳ | ۰/۹۵۸۵ | ۰/۰۸۷۳ | ۰/۰۵۶ | ۰/۰۸۱۶۲ |
| مدل اصلاح شده پیچ ۲ | ۰/۱۰۶۱۰ | $1/07 \times 10^{-4}$ | ۰/۹۹۸۶ | $8/8 \times 10^{-4}$ | ۰/۰۳۱۲ | ۰/۹۹۲۴ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۳۳۲۴ | ۰/۹۹۲۸ | ۰/۰۳۳۲۴ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۳۴۱۱ |
| میدیلی | ۵/۹۵ $\times 10^{-5}$ | $5/95 \times 10^{-5}$ | ۰/۹۹۹۲ | $5/9 \times 10^{-4}$ | ۰/۰۲۶۰۶ | ۰/۹۹۴۸ | ۰/۰۰۷۱ | ۰/۰۲۹۳۷ | ۰/۹۹۴۸ | ۰/۰۲۹۳۷ | ۰/۰۲۶ | ۰/۰۳۰۱۹ |

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 | ۱/۰۱۹ | ۰/۰۰۰۵۷۳۶ | ۰/۲۰۴۷ | ۱/۰۹۷ |
| ۳۰۰ وات | ۱/۰۴۲ | ۰/۰۰۲۱۸۲ | ۰/۲۴۰۲ | ۱/۳۹۴ |
| ۴۰۰ وات | ۱/۰۳ | ۰/۰۰۳۳۳۹ | ۰/۱۴۶۱ | ۱/۸۷۵ |
| ۵۰۰ وات | ۱/۰۳۲ | ۰/۰۰۳۶۷۱ | ۰/۲۹۵ | ۱/۷۴۹ |



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

(2002). New model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513.

Mohsenin, N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*, Gordon and Breach, science publishers.

O'Callaghan, J. R., Menzies, D. J. & Bailey, P. H. (1971). Digital simulation of agricultural dryer performance. *Agricultural Engineering Research*; 16(3), 223–244.

Schiffman, R. F. (1992). Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Technology*, 56, 58–52.

Singh, S., Shivhare, U. S., Ahmed, J. & Raghavan, G. S. V. (1999). Osmotic concentration kinetics and quality of carrot preserve, *Food Research International*, 32(1999), 509-514.

Singha, B., AshrafKhan, M., Dhar, A., Baqua, F. M. & Bindroo, B. B. (2010). Approaches to industrial exploiton of mulberry. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 18(1), 83-99.

Wang, C. Y. & Singh, R. P. (1978). Single layer drying equation for rough rice. ASAE, paper no: 3001.

Westerman, P. W., White, G. M. & Ross, I. J. (1973). Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. *Transactions of the ASAE*, 16, 1136–1139.

White, G. M., Ross, I. J. & Ponekert, R. (1981). Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*, 24, 466–468.

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*, 26–27 May, Adana, Turkey. Faculty of Agriculture, C, ukurova University, 565–569.

Yongsawatidigul, J. & Gunasekaran, S. (1996). Microwave vacuum drying of cranberries: Part II: Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(2), 145–156.

Yousif, A. N., Durance, T. D., Scaman, C. H. & Girard, B. (2000). Headspace volatiles and physical characteristics of vacuum-microwave, air, and freeze-dried oregano (*Lippia berlandieri* Schauer). *Journal of Food Science*, 65(6), 926–930.

Zhang, Q. & Litchfield, J. B. (1991). An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9(2), 383–395.

نفوذ حرارتی موثر در توان ۵۰۰ وات به میزان $۳/۲۸ \times ۱۰^{-۵}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی موثر در توان ۲۰۰ وات به میزان $۹/۵۸۳ \times ۱۰^{-۶}$ به دست آمد. میزان انرژی فعال سازی و ثابت نفوذ رطوبتی در خشک کردن لایه های توت سیاه به میزان $۹/۸۸۳$ وات برگرم دست آمد. با توجه به نتایج این تحقیق به نظر می رسد که خشک کردن با مایکروویو به دلیل زمان کوتاه آن، می تواند به عنوان یک روش کارآمد به ویژه خشک کردن توت سیاه باشد.

منابع

زرگری، م. (۱۳۷۲). گیاهان دارویی. انتشارات دانشگاه

تهران.

Alibas Ozkan, I., Akbudak, B. & Akbudak, N. (2005). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78 (2), 577–583.

Arslan, O., Erzenin, M., Sinan, S. & 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.

Chhninman, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27, 610–615.

Doymaz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry, *Journal of Food Engineering*, 61(3), 341-346.

Doymaz, I. (2004). Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus alba L.*), *Journal of Food Engineering*, 65(2), 205-209.

Duke, J. A. (1983). *Handbook of Energy Crops*, Centrer for New Crops & Plants Products, Purdue University.

Ertekin, C. & Yaldız, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Food Engineering*, 63(3), 349–359.

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(2), 111–117.

Liu, Q. & Bakker-Arkema, F. W. (1971). Stochastic modeling of grain drying. Part2: Model development. *Agricultural Engineering Research*, 66(4), 275–280.

Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. A.