



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



مطالعه خشک کردن برگ کلپوره (*Teucrium polium*) با خشک کن مایکروویو: مدل‌سازی، سینتیک خشک کردن و جنبه‌های انرژی

محسن خواجه‌پور^۱، برات قبادیان^۲، محمد زارین^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ایمیل مکاتبه کننده: m.zarein@modares.ac.ir

چکیده

کلپوره با نام علمی *Teucrium polium* گیاهی دارویی است که در نواحی مختلف ایران می‌روید. سامانه‌های خشک‌کن مایکروویو، زمان خشک کردن را به طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون این‌که اثر منفی بر روی کیفیت محصول داشته باشند. در این مطالعه به بررسی پارامترهای مختلف خشک کردن، تعیین بهترین مدل ریاضی و به دست آوردن انرژی فعال‌سازی برای برگ کلپوره با خشک کن مایکروویو از نوع خانگی با محدوده توان ۱۰۰-۱۰۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز در چهار سطح توان ۲۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ وات پرداخته شده است. از بین مدل‌های برازش شده، مدل میدیلی به عنوان بهترین مدل با توجه به معیارهای R^2 ، χ^2 و RMSE انتخاب شد. سطوح توان مایکروویو بر مدت زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، تأثیر داشت، به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۴/۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۱۵/۲۵ دقیقه به دست آمد. بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان $3/5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن برگ‌های کلپوره بر اساس یک رابطه نمایی به میزان $16/35 \text{ W/g}$ و $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مایکروویو، مدل‌سازی ریاضی، انرژی فعال‌سازی، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، برگ کلپوره



مقدمه

گیاه کلپوره با نام علمی *Teucrium polium* گیاهی است در خانواده نعنائیان بومی منطقه مدیترانه و خاورمیانه که ارتفاع آن به ۳۵-۱۰ سانتیمتر می‌رسد بیش از ۲۰۰۰ سال است که به‌عنوان گیاهی دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طب سنتی ایران از چای به دست آمده از این گیاه برای درمان بسیاری از بیماری‌های مانند دردهای شکمی، سرماخوردگی‌های معمولی، سوءهاضمه و دیابت نوع دو استفاده می‌شود. برگ‌های آن مصرف خوراکی و دارویی دارد، به خصوص برای درمان دل دردهای مزمن استفاده می‌شود. طبع این گیاه گرم و خشک است. این گیاه مدر، معرق، تقویت‌کننده، ضد تب و ضد صفرا است (Menges & Ertekin, 2006). خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های محافظت محصولات غذایی می‌باشد و از آنجایی که باعث کاهش فعالیت‌های آبی محصولات، کاهش فعالیت‌های میکروبیولوژی محصولات و کمترین تغییرات فیزیکی و شیمیایی در طی فرایند نگهداری می‌شود، یکی از عمومی‌ترین روش‌هایی است که در بهبود نگهداری مواد غذایی از جمله گیاهان دارویی استفاده می‌شود (Menges & Ertekin, 2006). سامانه‌های خشک‌کن مایکروویو، زمان خشک کردن را به طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون این‌که اثر منفی بر روی کیفیت محصول داشته باشند. در خشک کردن مایکروویو، گرما حاصل از تبدیل انرژی مایکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب است و فشار و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع مواد فراهم می‌کند. گرمایش حجمی ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل کرده است. زمان‌های کوتاه‌تر فرآوری، به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی محصولات را کاهش می‌دهد (Zarein et al., 2014). توجه برای از بین بردن این مشکل، و جلوگیری از افت قابل توجه کیفیت محصول و انتقال سریع حرارت و کاهش زمان خشک شدن نگاه‌ها را به سمت استفاده از خشک‌کن مایکروویو کرده است. خشک کردن با مایکروویو سریع‌تر، یکنواختی بهتر فرایند خشک شدن و بازده انرژی بیشتر در مقایسه با خشک کردن با جریان هوا گرم می‌باشد. همچنین به دلیل انرژی متمرکز شده توسط امواج مایکروویو به فقط به ۲۵-۲۰ درصد فضا برای خشک کردن نسبت به روش‌های معمول احتیاج دارد (Zarein et al., 2014; Yongsawatdigul & Gunasekaran, 1996). پژوهش‌های مختلفی برای خشک کردن محصولات غذایی با خشک‌کن مایکروویو انجام شده است. درویشی و همکاران لایه‌های هویج را در خشک‌کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو - همرفتی خشک کرده و اثرات آن را بر زمان خشک کردن، آهنگ تبخیر و تغییرات رنگ مورد بررسی و مقایسه قرار دادند (Darvishi et al., 2012). زارعین و همکاران مدل‌سازی ریاضی را برای خشک کردن لایه‌های سیب با خشک‌کن مایکروویو به دست آورده‌اند (Zarein et al., 2015). همچنین اثرات دما، نرخ جریان هوا و ضخامت نمونه‌ی مکعبی هویج در سینتیک خشک کردن و مقادیر ضریب انتشار برای کاهش نرخ خشک شدن مورد مطالعه قرار گرفت (Darvishi et al., 2012; Darvishi & Zarein, 2012). وانگ و همکاران مدل‌سازی ریاضی را برای خشک کردن سیب با خشک‌کن مایکروویو با و بدون پیش خشک کردن با جریان هوای داغ به دست آورده‌اند (Wang et al., 2007). هدف از این تحقیق بررسی رفتار خشک شدن برگ‌های کلپوره، تأثیر شرایط خشک شدن بر از دست دادن رطوبت، ارائه بهترین مدل خشک شدن، به دست آوردن میزان انرژی مصرفی و ضریب نفوذ حرارتی با استفاده از خشک‌کن مایکروویو می‌باشد.



مواد و روش‌ها

برگ‌های کلپوره مورد آزمایش از دامنه کوه‌های اطراف شهر کرمان تهیه شد و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای +۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای 105 ± 1 درجه سلسیوس به میزان $27/24\%$ بر پایه تر به دست آمد. بطوری‌که تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این کار در ۳ تکرار انجام شد. رابطه ۱ برای میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک استفاده شد (Ertekin & Yaldız, 2004).

$$M(\% \text{ d. b.}) = \frac{m_0 - m_f}{m_f} \times 100 \quad (1)$$

که در آن M درصد رطوبت بر پایه خشک (بدون بعد)، m_0 جرم اولیه نمونه (گرم)، m_f جرم نمونه بعد از خشک کردن در آون مایکروویو (گرم) می‌باشد. برای انجام فرآیند خشک کردن، برگ‌های کلپوره به ضخامت متوسط ۱ میلی متر انتخاب شد و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل (GF-600, Japan) با دقت $\pm 0/01$ گرم، در نمونه‌های ۲۵ گرمی توزین شد.

فرآیند خشک کردن برگ‌های کلپوره با استفاده از خشک‌کن مایکروویو (ME9114ST-Samsung) از نوع خانگی با محدوده توان ۱۰۰-۱۰۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز در چهار سطح توان ۲۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ وات انجام شد. توزین نمونه‌ها هر ۱۵ ثانیه توسط ترازوی دیجیتال با دقت $\pm 0/01$ گرم انجام شد.

ضریب نفوذ حرارتی مؤثر

برای به دست آوردن ضریب نفوذ از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Menges & Ertekin, 2006).

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

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، L نصف ضخامت نمونه به (m)، t زمان خشک شدن به (s)، n تعداد مشاهدات و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی مؤثر به m^2/s می‌باشد.

رابطه ۲ در مدت زمان‌های طولانی خشک شدن به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4a^2} \right] \quad (3)$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه ۳ و رسم نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان از شیب نمودار (k) می‌توان D_{eff} را به دست آورد.



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

(۴)

انرژی فعال‌سازی

برای به دست آوردن انرژی فعال‌سازی در مایکروویو، وابستگی بین ضریب نفوذ حرارتی مؤثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه بر اساس مدل آرنیوس، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chhninman, 1984).

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

(۵)

که در آن، P توان مایکروویو (W)، m جرم نمونه (g)، D عرض از مبدأ (m^2/s)، E_a انرژی فعال‌سازی (W/g) و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی مؤثر (m^2/s) می‌باشد.

مدل‌سازی خشک کردن

در اکثر پژوهش‌ها، مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) به دست آمده است که علت آن کاهش پراکندگی و خوش‌فرم کردن داده‌ها می‌باشد.

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

(۶)

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_i محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد/کیلوگرم آب) می‌باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_t و M_i کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و معادله به صورت زیر ساده می‌شود (Kassem, 1998).

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

(۷)

معادله‌های متعددی برای پیش‌بینی روند خشک شدن محصولات وابسته به دمای خشک شدن ارائه شده است (Duke, 1983). این معادله‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.



جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی فرآیند خشک شدن (Duke, 1983).

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

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

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre})^2}{n - z} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad (10)$$

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 برگ‌های کلپوره 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.



انرژی مصرفی در مایکروویو

انرژی مصرفی در مایکروویو از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Chhninman, 1984).

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

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

انرژی مخصوص خشک‌کردن به روش مایکروویو

میزان انرژی مخصوص خشک کردن برگ کلپوره برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم برگ کلپوره که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Chhninman, 1984).

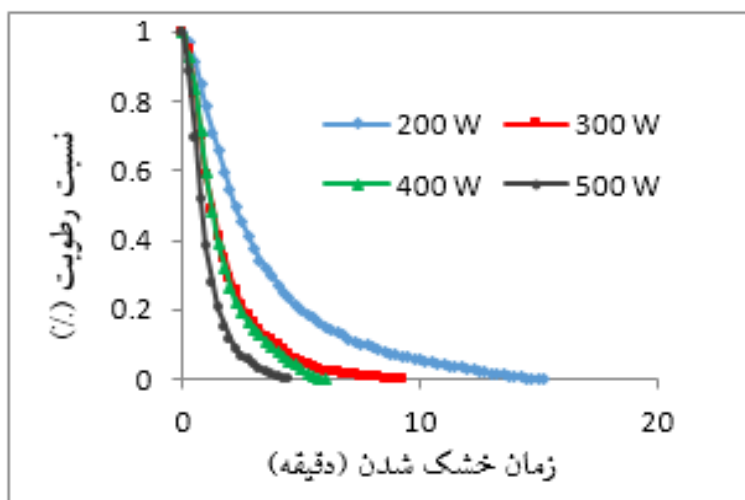
$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0} \quad (12)$$

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

نتایج و بحث

بررسی سینتیک خشک شدن

شکل ۱ تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن برگ‌های کلپوره در توان‌های مختلف مایکروویو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل زمان خشک شدن برگ‌های کلپوره با توجه به توان‌های مختلف مایکروویو متفاوت می‌باشد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، کاهش بیشتری در رطوبت نسبی محصول اتفاق می‌افتد، زیرا این گونه به نظر می‌رسد که افزایش توان خروجی مایکروویو باعث افزایش شدت پرتوهای مایکروویو و دمای درون محفظه و کاهش بیشتر میزان رطوبت برگ‌های کلپوره می‌شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. از طرفی نمودارهای شکل ۱، بیانگر این نکته می‌باشند که با گذشت زمان در طی فرآیند خشک کردن، سرعت خشک شدن و از دست دادن رطوبت کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی را سایر پژوهشگران در خشک کردن لایه‌های هویچ با استفاده از مایکروویو به دست آورده‌اند (Darvishi et al., 2012).



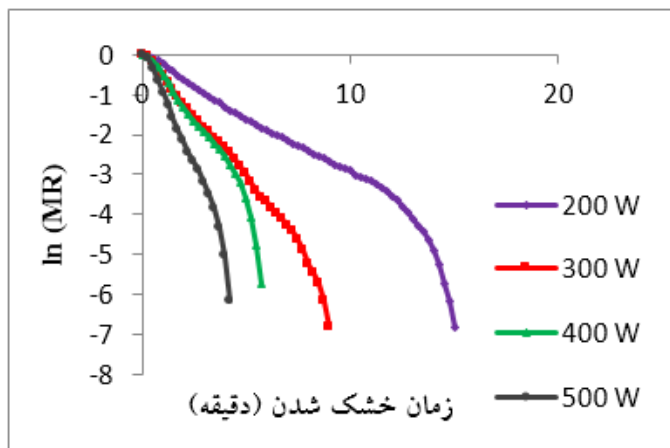
شکل ۱- منحنی‌های نسبت رطوبت خشک شدن برگ کلپوره

در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن زیاد می‌باشد به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۴/۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۱۵/۲۵ دقیقه به دست آمد. با افزایش توان از ۲۰۰ به ۵۰۰ وات، زمان خشک شدن برگ‌های کلپوره، ۷۰/۵٪ کاهش می‌یابد.

ضریب نفوذ حرارتی مؤثر

شکل ۲ نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان را در حالت‌های مختلف خشک کردن را نشان می‌دهد. از شیب نمودار خط برازش داده شده بر هر یک از منحنی‌ها، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر به دست می‌آید. در جدول ۲ مقادیر ضریب نفوذ حرارتی مؤثر و ضریب تبیین در سطوح توانی ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات آورده شده است. مشاهده شد که بیشترین ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در توان ۵۰۰ وات به میزان $1/302 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین میزان آن در توان ۲۰۰ وات به میزان $3/5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد.

همان‌طوری که از جدول ۲ مشاهده می‌شود با افزایش توان در خشک‌کن مایکروویو ضریب نفوذ حرارتی افزایش می‌یابد، دلیل وقوع این مسئله ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر می‌باشد.



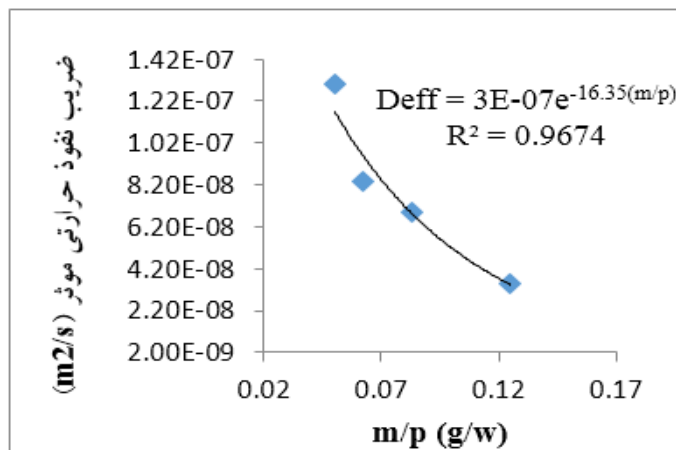
شکل ۲- نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان در سطوح توانی مختلف.

جدول ۲- مقادیر ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در توان‌های مختلف

R^2	ضریب نفوذ حرارتی مؤثر (m^2/s)	توان (W)
۰/۹۴۱	$۳/۵ \times ۱۰^{-۸}$	۲۰۰
۰/۹۸۵	$۶/۸۶۳ \times ۱۰^{-۸}$	۳۰۰
۰/۹۳۷	$۸/۳۶۲ \times ۱۰^{-۸}$	۴۰۰
۰/۹۶۷	$۱/۳۰۲ \times ۱۰^{-۸}$	۵۰۰

انرژی فعال‌سازی

شکل ۳ تغییرات ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در مقابل مقدار m/P را نشان می‌دهد. مطابق با نمودار به دست آمده مقدار انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن برگ‌های کلپوره بر اساس یک رابطه نمایی به میزان $۱۶/۳۵ \text{ W/g}$ و $۳ \times ۱۰^{-۷} \text{ m}^2/s$ به دست آمد.



شکل ۳- تغییرات ضریب نفوذ حرارتی مؤثر برحسب m/p

مدل‌سازی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم‌افزار متلب انجام شد. بهترین مدلی که می‌تواند سینتیک خشک شدن برگ کلپوره 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 برگ کلپوره را پیش‌بینی کند.

جدول ۳- R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای توان ۲۰۰ وات.

مدل	R^2	χ^2	$RMSE$
نیوتون	۹۹۶/۰	۰۰۰۲۹۲/۰	۰۱۶۹۴/۰
بیج	۹۹۶۷/۰	۰۰۰۲۴۱/۰	۰۱۵۵۲/۰
اصلاح شده بیج	۹۹۶۷/۰	۰۰۰۲۴۱/۰	۰۱۵۵۲/۰
وانگ و سینگ	۹۲۲۴/۰	۰۰۵۶۶۳/۰	۰۷۵۲۶/۰
هندرسون و پاییس	۰/۹۹۷۶	۰۰۰۱۷۴/۰	۰۱۳۲/۰
لگاریتمی	۰/۹۹۷۸	۰۰۰۱۵۹/۰	۰۱۲۷/۰
تقریبی انتشار	۹۹۶/۰	۰۰۰۲۹۲/۰	۰۱۷۲۲/۰
اصلاح شده بیج ۲	۹۹۶۷/۰	۰۰۰۲۴۱/۰	۰۱۵۶۵/۰
میدیلی	۹۹۷۸/۰	۰۰۰۱۵۹/۰	۰۱۲۸۴/۰



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



جدول ۴- R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای توان ۳۰۰ وات.

مدل	R^2	χ^2	RMSE
نیوتون	۹۹۳۵/۰	۰۰۰۵۱۲/۰	۰۲۳۳۲/۰
پیچ	۹۹۷/۰	۰۰۰۲۳۸/۰	۰۱۵۴۱/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۷/۰	۰۰۰۲۳۸/۰	۰۱۵۴۱/۰
وانگ و سینگ	۹۰۹۸/۰	۰۰۷۱۰۶/۰	۰۸۴۳/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۶۶/۰	۰۰۰۲۶۵/۰	۰۱۶۲۸/۰
لگاریتمی	۹۹۶۷/۰	۰۰۰۲۶۲/۰	۰۱۶۴۲/۰
تقریبی انتشار	۹۹۴۴/۰	۰۰۰۴۴۲/۰	۰۲۱۳۲/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۷/۰	۰۰۰۲۳۸/۰	۰۱۵۶۳/۰
میدیلی	۹۹۷۸/۰	۰۰۰۱۷۶/۰	۰۱۳۶۳/۰

جدول ۵- R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای توان ۴۰۰ وات.

مدل	R^2	χ^2	RMSE
نیوتون	۹۸۵۹/۰	۰۰۱۳۹۷/۰	۰۳۶۶/۰
پیچ	۹۹۶۱/۰	۰۰۰۳۸۲/۰	۰۱۹۵۳/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۶۱/۰	۰۰۰۳۸۲/۰	۰۱۹۵۳/۰
وانگ و سینگ	۹۷۸/۰	۰۰۲۱۷۹/۰	۰۴۶۶۸/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۱۸/۰	۰۰۰۸۰۹/۰	۰۲۸۴۴/۰
لگاریتمی	۹۹۳۳/۰	۰۰۰۶۶۷/۰	۰۲۶۴۲/۰
تقریبی انتشار	۹۹۰۴/۰	۰۰۰۹۴۸/۰	۰۳۱۴۸/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۶۱/۰	۰۰۰۳۸۲/۰	۰۱۹۹۷/۰
میدیلی	۹۹۶۸/۰	۰۰۰۳۱۹/۰	۰۱۸۶۸/۰



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



جدول ۶- R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای توان ۵۰۰ وات.

مدل	R^2	χ^2	$RMSE$
نیوتون	۹۸۶۵/۰	۰۰۱۴۰۷/۰	۰۳۶۴۵/۰
بیج	۹۹۸۱/۰	۰۰۰۱۹۵/۰	۰۱۳۹۵/۰
اصلاح شده بیج	۹۹۸۱/۰	۰۰۰۱۹۵/۰	۰۱۳۹۵/۰
وانگ و سینگ	۹۶۷۲/۰	۰۰۳۴۱۴/۰	۰۵۸۴۳/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۱۲/۰	۰۰۰۹۱۶/۰	۰۳۰۲۷/۰
لگاریتمی	۰/۹۹۲۷	۰۰۰۷۶۱/۰	۰۲۸۴۲/۰
تقریبی انتشار	۹۹۰۹/۰	۰۰۰۹۵۱/۰	۰۳۱۷۹/۰
اصلاح شده بیج ۲	۹۹۸۱/۰	۰۰۰۱۹۵/۰	۰۱۴۳۸/۰
میدیلی	۹۹۸۶/۰	۰۰۰۱۴۱/۰	۰۱۲۶۵/۰

با توجه به اینکه مدل میدیلی ($MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b \cdot t$) برای توان‌های ۳۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ وات انتخاب شد، ضرایب آن در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- ضرایب و شاخص آماری مربوط به مدل میدیلی برای سطوح توانی مختلف.

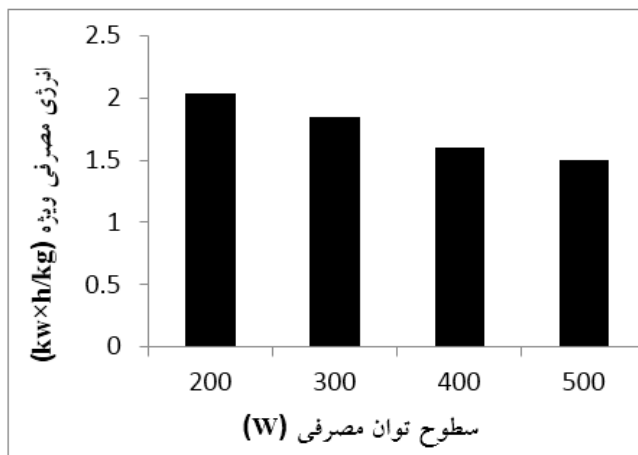
توان (وات)	a	b	k	n	R^2
۲۰۰	۰۴/۱	$۴۹۳/۶ \times ۱۰^{-۴}$	۳۱۷۴/۰	۰۲۳/۱	۹۹۸/۰
۳۰۰	۰۱۵/۱	$۷۰۹/۷ \times ۱۰^{-۴}$	۵۵۶۷/۰	۱۰۳/۱	۹۹۸/۰
۴۰۰	۰۲۲/۱	$۰۸/۲ \times ۱۰^{-۴}$	۵۶۰۹/۰	۲۱۷/۱	۹۹۷/۰
۵۰۰	۰۳۳/۱	$۸۱/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$	۹۵۲۲/۰	۲۷۵/۱	۹۹۹/۰

انرژی مصرفی ویژه

یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی و ارزیابی خشک‌کن‌ها 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 (Ozkan et al., 2007). انرژی ویژه را، میزان انرژی مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلوگرم محصول تازه می‌گویند. با استفاده از داده‌های به دست آمده در طی فرآیند انجام آزمایش، تجزیه و تحلیل انرژی مصرفی در مراحل مختلف خشک شدن برگ کلپوره مورد بررسی قرار



گرفت. میزان انرژی مصرفی ویژه با تقسیم حاصلضرب توان در زمان بر وزن نمونه‌های برگ کلپوره به دست آمد. شکل ۴ میزان انرژی مصرفی ویژه در میکروویو در توان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۱/۵ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۴- انرژی مخصوص مورد نیاز طی خشک کردن برگ کلپوره در سطوح توانی مختلف.

نتیجه گیری

در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر برگ کلپوره ارائه شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک شدن برگ کلپوره بیان شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که از بین مدل‌های برازش شده، مدل میدیلی به عنوان بهترین مدل با توجه به بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر، مربع کای χ^2 و RMSE برای توصیف فرآیند خشک شدن است که میزان R^2 اغلب در حدود ۰/۹۹۶۸ تا ۰/۹۹۸۶ و میزان χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی RMSE به ترتیب در حدود $10^{-4} \times 1/41$ تا $10^{-4} \times 3/19$ و $0/1265$ تا $0/1868$ بود. همچنین مشاهده شد که توان میکروویو برای خشک کردن برگ‌های کلپوره بر مدت زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در یک خشک‌کن میکروویو تأثیر دارد. با افزایش توان خروجی میکروویو، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد، به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۴/۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۱۵/۲۵ دقیقه به دست آمد. از طرفی زمان خشک شدن از توان ۲۰۰ وات تا توان ۵۰۰ وات ۷۰/۵٪ کاهش را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان $7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. میزان انرژی فعال سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن برگ‌های کلپوره بر اساس یک رابطه نمایی به میزان $16/35 \text{ W/g}$ و $7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۱/۵ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. با توجه به نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که خشک کردن با میکروویو به دلیل کاهش زمان خشک شدن، روش مناسبی برای خشک کردن بیشتر گیاهان از جمله گیاهان دارویی برای حفظ کیفیت آن‌ها می‌باشد.



1. Bahramikia, S. & Yazdanparast, R. 2012. Phytochemistry and Medicinal Properties of *Teucrium Polium* L. (Lamiaceae). *Phytother Res.* Vol. 11(12), 1581-1593.
2. Chhinman, M.S. 1984. Evaluation of Selected Mathematical Models for Describing Thin Layer Drying of In-Shell Pecans. *Transactions of the ASAE.* Vol. 27(11), 610-615.
3. Darvishi, H. & Zarein, M. 2012. Thermal Conductivity of Sunflower Seed as a Function of Moisture Content and Bulk Density. *World App Sci Jou.* Vol. 18(18), 1321-1325.
4. Darvishi, H., Banakar, A. & Zarein, M. 2012. Mathematical Modeling and Thin Layer Drying Kinetics of Carrot Slices. *Glob Jour of Sci Fron Res.* Vol. 12(18), 57-64.
5. Duke, J.A. *Handbook of Energy Crops.* Center for New Crops & Plants Products, Purdue University, 1983.
6. Ertekin, C. & Yaldız, O. 2004. Drying of Eggplant and Selection of A Suitable Thin Layer Drying Model. *Food Eng.* Vol. 63(23), 349-359.
7. Kassem, A.S. 1998. Comparative Studies on Thin Layer Drying Models for Wheat. In 13th International congress on Agricultural Engineering. Morocco Vol. 6, 2-6.
8. Menges, H.O. & Ertekin, C. 2006. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Golden Apples. *Food Engineering.* Vol. 77(12), 119-125.
9. Ozkan, A., Akbudak, B. & Akbudak, N. 2007. Microwave ,Drying Characteristics of Spinach. *Jou of Food Eng.* Vol. 78(43), 577-583.
10. Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. & Hu, X. Mathematical Modelling on Thin Layer Microwave Drying of Apple Pomace with and without Hot Air Pre-Drying. *Food Engineering.* Vol. 80(9), 536-544.
11. Yongsawatdigul, J. & Gunasekaran, S. 1996. Microwave-Vacuum Drying of Cranberries: part ii. Quality Evaluation. *Jour of Food Proc and Preser.* Vol. 20(13), 145-156.
12. Zarein, M., Samadi, S.H. & Ghobadian, B. 2014. Kinetic Drying and Mathematical Modeling of Apple Slices on Dehydration Process, *Food Proc Tech.* Vol. 4(7), 1-4.
13. Zarein, M., Samadi, S.H. & Ghobadian, B. 2015. Investigation of Microwave Dryer Effect on Energy Efficiency During Drying of Apple Slices. *Jour of the Sau Soci of Agri Sci.* Vol. 14(25), 41-47.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Study on Drying of the *Teucrium* Leaves (*Teucrium polium*) using Microwave: Modeling, Drying Kinetics and Energy Aspects

Abstract

Teucrium with scientific name *Teucrium polium* is a medicinal plant that grows in different parts of Iran. Microwave drying systems have decreased drying time significantly without any negative effects on the product quality. In this research, different parameters of drying, determining the best mathematical model and obtaining the activation energy were studied for *teucrium* leaves using domestic microwave oven with frequency of 2450 MHz and power range of 100-1000 watt at power levels of 200, 300, 400 and 500 watts. Based on fitting models, the Midilli model was selected as the best model according to values of R^2 , χ^2 and RMSE. Microwave power levels (200, 300, 400 and 500) watts had significant effect on drying time and the effective thermal diffusivity, so that the drying time was obtained 4.5 and 15.25 minutes for 500 and 200 watts, respectively. The highest effective thermal diffusivity was at power of 500 Watts as $1.302 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ and the lowest was at power of 200 Watts as $3.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. The activation energy and thermal diffusion constant of the *teucrium* dried leaves based on an exponential relation were obtained as 16.35 W/g and $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively.

Keywords: Microwave, Mathematical Modeling, Activation Energy, Effective thermal diffusivity, *Teucrium* Plant