



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون  
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران  
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## بررسی تغییرات آهنگ تبخیر، مدل‌سازی ریاضی و انرژی فعال‌سازی خشک‌کردن گل پونه کوهی (*Origanum vulgare*) در خشک‌کن مایکروویو

محسن خواجه‌پور<sup>۱</sup>، برات قبادیان<sup>۲</sup>، محمد زارین<sup>۳\*</sup>

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](mailto:m.zarein@modares.ac.ir)

### چکیده

پونه کوهی با نام علمی *Origanum vulgare* گیاهی دارویی و معطر است که در نواحی مختلف کوهستانی ایران می‌روید. مایکروویو، یک روش سریع خشک کردن مواد غذایی است. در این پژوهش، گل‌های پونه کوهی به وسیله خشک‌کن مایکروویو خشک گردید. به منظور تخمین و انتخاب مناسب‌ترین مدل ریاضی، ضریب مؤثر انتشار رطوبت و مقادیر انرژی فعال‌سازی، آزمایش‌های خشک کردن گل‌های پونه کوهی در چهار سطح توان مایکروویو انجام شد. برای فرآیند مدل‌سازی ریاضی، ۹ مدل تجربی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد و سپس نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل‌های مورد بررسی، نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده‌های به دست آمده دارد. سطوح توان مایکروویو (۲۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰ وات) بر مدت زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، تأثیر داشت، به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۷/۷۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۲۴/۷۵ دقیقه به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن گل‌های پونه کوهی بر اساس یک رابطه نمایی به میزان  $۸/۴۴۱ \text{ W/g}$  و  $۵ \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان  $۱/۵۶۷ \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان  $۴/۱۴۵ \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مایکروویو، سینتیک خشک کردن، گیاه دارویی، مدل‌سازی ریاضی، گل پونه کوهی



## مقدمه

گیاه پونه کوهی با نام علمی *Origanum vulgare* گیاهی است پایا که بین ۳۰ تا ۹۰ سانتیمتر رشد می‌کند و برگ‌ها متقابل، از نظر اندازه متغیر و در پایین بسیار بزرگ‌تر است. اما هرچه به طرف رأس گیاه می‌رود کوچک‌تر شده و به شکل تخم مرغی یا بیضوی درمی‌آید. حاشیه برگ‌ها صاف یا کنگره‌ای است. گل‌ها به طول ۴ - ۷ میلی‌متر به رنگ صورتی یا سرخ به شکل خوشه افشان روی شاخه‌ها قرار دارد. زمان گل دادن بین تیر تا شهریور است. تمام قسمت‌های گیاه بوی مطبوع معطری دارد (خسروشاهی اصل و همکاران، ۱۳۹۲). خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری غذا است (Menges & Ertekin, 2006). در خشک‌کن‌های با هوای گرم به دلیل این‌که هدایت حرارتی پایین است و انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی ماده غذایی محدود شده است، راندمان انرژی پایین آمده، مدت زمان طولانی‌تری برای خشک کردن لازم است (Arslan et al., 2004). خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از میکروویو می‌تواند جانسین مناسبی برای خشک‌کن‌های هوای گرم محسوب شود. فرایند خشک کردن با میکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای ۳۰۰ مگاهرتز و ۳۰۰۰ گیگاهرتز نشان‌گر امواج میکروویو است. برخلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، امواج میکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می‌یابد. چرخش دوقطبی مکانیسم مهمی است که تولید گرما را در ماده‌ای که در میدان میکروویو قرار می‌گیرد توضیح می‌دهد. مواد غذایی حاوی مولکول‌های قطبی مانند آب هستند. این مولکول‌ها عموماً دارای جهت‌گیری تصادفی می‌باشند اما هنگامی که میدان الکتریکی اعمال می‌شود مولکول‌ها خودشان را با قطبیت میدان هم‌جهت می‌کنند به عبارت دیگر در یک میدان میکروویو، قطبیت به سرعت (۲۴۵۰۰۰۰ بار در ثانیه) تغییر می‌کند در نتیجه مولکول‌های قطبی دوران می‌کنند 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 (Schiffman, 1992; Yongsawatdigul & Gunasekaran, 1996). پژوهش‌های مختلفی برای خشک کردن محصولات غذایی با خشک‌کن میکروویو انجام شده است. درویشی و همکاران لایه‌های هویج را در خشک‌کن میکروویو، همرفتی و ترکیب میکروویو - 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 میکروویو به دست آورده‌اند (Zarein et al., 2014). کاراسلان و تونسر برگ‌های اسفناج را در خشک‌کن میکروویو، همرفتی و ترکیب میکروویو - همرفتی خشک کرده و اثرات آن را بر زمان خشک کردن، نسبت خشک کردن و تغییرات رنگ مورد بررسی و مقایسه قرار دادند (Karaaslan & Tuncer, 2008). برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن، سینتیک خشک شدن محصول مورد نظر را به دست آورد، نیاز به یک سری ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و نظایر آن می‌باشد تا بتوان به کمک آن‌ها خشک‌کن جدیدی با کارایی مناسب طراحی کرد. به همین دلیل در این تحقیق به منظور ارزیابی دستگاه خشک‌کن میکروویو، رفتار خشک شدن گل پونه کوهی، انتخاب مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن، تأثیر توان‌های مختلف میکروویو بر آهنگ از دست دادن رطوبت در آن میکروویو مورد بررسی قرار گرفت.



## مواد و روش‌ها

گل‌های پونه کوهی مورد آزمایش از دامنه کوه‌های اطراف شهر کرمان تهیه شد و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای  $+4$  درجه سلسیوس نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای  $105 \pm 1$  درجه سلسیوس به میزان  $63/4\%$  بر پایه تر به دست آمد. به طوری که 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)،  $m$  جرم اولیه نمونه (گرم)،  $m_f$  جرم نمونه بعد از خشک کردن در آون مایکروویو (گرم) می‌باشد. برای انجام فرآیند خشک کردن، گل‌های پونه کوهی به ضخامت متوسط ۴ میلی متر انتخاب شد و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل (GF-600, Japan) با دقت  $\pm 0/01$  گرم، در نمونه‌های ۵۰ گرمی توزین شد.

فرآیند خشک کردن گل‌های پونه کوهی با استفاده از خشک‌کن مایکروویو (ME9114ST-Samsung) انجام شد. در روش مایکروویو از چهار سطح توانی (۲۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ وات) برای خشک کردن استفاده 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.



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

### 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).

$$D_{eff} = D \cdot \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right) \quad (5)$$

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.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (6)$$

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  $M_i$  و  $M_t$  کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و معادله به صورت زیر ساده می‌شود (Kassem, 1998).

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (7)$$

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.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون  
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران  
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



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

شماره مدل	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  $\chi^2$  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 گل‌های پونه کوهی را توصیف کند، مدل دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی  $R^2$  و کمترین مقدار مربع میانگین خطای نسبی RMSE و مربع کای  $\chi^2$  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 خشک کردن به روش مایکروویو

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

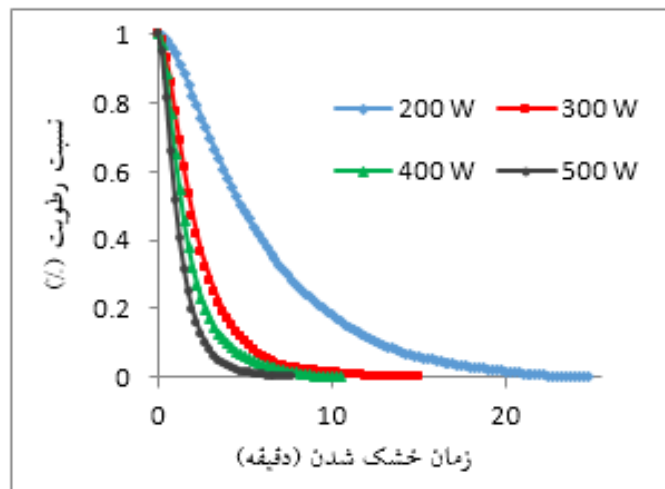
$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0} \quad (12)$$

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 گل‌های پونه کوهی در توان‌های مختلف مایکروویو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زمان خشک شدن نسبت به توان مایکروویو متفاوت می‌باشد. افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد، زیرا این‌گونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از مایکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت گل‌های پونه کوهی می‌شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. با توجه به نمودارهای شکل ۱، سرعت خشک شدن و از دست دادن رطوبت با گذشت زمان در طی خشک کردن کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی را سایر پژوهشگران در خشک کردن لایه‌های سیب و سیب‌زمینی با استفاده از مایکروویو به دست آورده‌اند (Zarein et al., 2014).



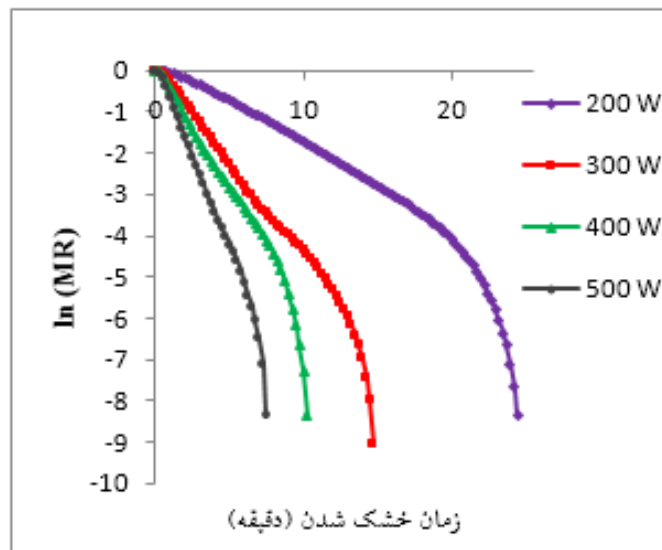
شکل ۱- منحنی‌های نسبت رطوبت خشک شدن گل پونه کوهی

در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن زیاد می‌باشد به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۵۰۰ وات ۷/۷۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۲۴/۷۵ دقیقه به دست آمد. با افزایش توان از ۲۰۰ به ۵۰۰ W، زمان خشک شدن گل‌های پونه کوهی، ۶۸/۶۹٪ 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  $1/567 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان  $4/145 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد.

همان‌گونه که از جدول ۲ ملاحظه می‌گردد، در روش خشک کردن با مایکروویو با افزایش توان مایکروویو، ضریب انتشار مؤثر حرارت، یک روند افزایشی دارد. دلیل وقوع این مسئله تأثیر بارز دما در اثر افزایش توان مایکروویو در ایجاد جنبش مولکولی و گرمای بیشتر و افزایش ضریب مذکور می‌باشد.



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

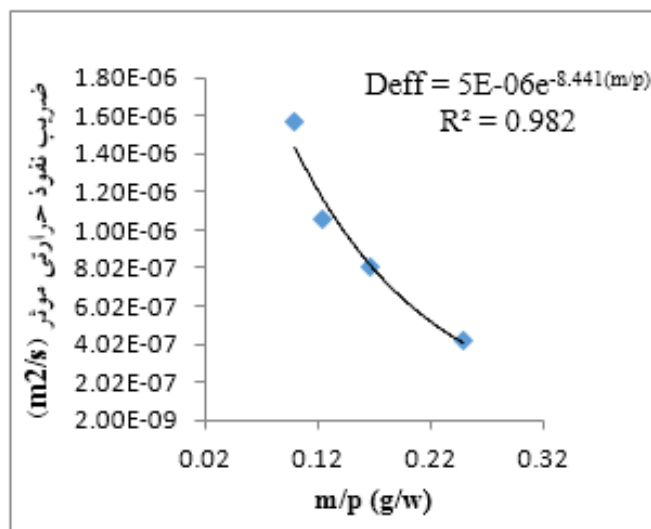
جدول ۲- مقادیر ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در توان‌های مختلف

$R^2$	ضریب نفوذ حرارتی مؤثر ( $m^2/s$ )	توان (W)
۰/۹۲۳	$4/145 \times 10^{-7}$	۲۰۰
۰/۹۷۲	$8/054 \times 10^{-7}$	۳۰۰
۰/۹۵۳	$1/06 \times 10^{-6}$	۴۰۰
۰/۹۷۸	$1/567 \times 10^{-6}$	۵۰۰

### انرژی فعال‌سازی

تغییرات نفوذ حرارتی مؤثر در مقابل مقدار ( $m/P$ ) در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با نمودار به دست آمده مقدار انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن گل‌های پونه کوهی بر اساس یک رابطه نمایی به میزان  $W/g$   $8/441$  و  $5 \times 10^{-6} m^2/s$  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 گل پونه کوهی را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. در جدول ۳ مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE آمده است. با مقایسه مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE مشخص شد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توان‌های ۲۰۰، ۴۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ وات بود که می‌توانست رفتار خشک شدن گل پونه کوهی را پیش‌بینی کند.

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

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۲۶/۰	$۵/۱۵۲ \times ۱۰^{-۵}$	۰۳۹۰۵/۰
پیچ	۹۹۹۲/۰	$۶/۶ \times ۱۰^{-۵}$	۰۰۸۲۰۸/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۹۲/۰	$۶/۶ \times ۱۰^{-۵}$	۰۰۸۲۰۸/۰
وانگ و سینگ	۹۸۳۷/۰	$۳/۱۴۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰۳۸۰۶/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۳۷/۰	$۲/۵۵ \times ۱۰^{-۵}$	۰۲۳۶۳/۰
لگاریتمی	۹۹۶۵/۰	$۰/۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	۰۱۷۸۱/۰
تقریبی انتشار	۹۹۱۵/۰	$۲/۷۴ \times ۱۰^{-۵}$	۰۲۷۵۲/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۹۲/۰	$۶/۶ \times ۱۰^{-۵}$	۰۰۸۲۵/۰
میدیلی	۰/۹۹۹۶	$۳/۵۱ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۶۰۲۳



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- $R^2$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  برای توان ۳۰۰ وات.

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۳۷/۰	$۸/۱۲۲ \times ۱۰^{-۵}$	۰۳۵۰۵/۰
پیچ	۹۹۷۸/۰	$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$	۰۱۲۹۱/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۷۸/۰	$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$	۰۱۲۹۱/۰
وانگ و سینگ	۸۸۴۳/۰	$۵/۸۷۲ \times ۱۰^{-۵}$	۰۹۴۲/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۲۹/۰	$۵/۵۳ \times ۱۰^{-۵}$	۰۲۳۳۳/۰
لگاریتمی	۹۹۳۳/۰	$۵/۵۰ \times ۱۰^{-۵}$	۰۲۲۸۷/۰
تقریبی انتشار	۹۹۹۹/۰	$۹۷۹/۰ \times ۱۰^{-۵}$	۰۰۳۱۸۲/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۷۸/۰	$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۵}$	۰۱۳۰۳/۰
میدیلی	۹۹۸۷/۰	$۵/۹ \times ۱۰^{-۵}$	۰۱۰۰۵/۰

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

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۵۷/۰	۰۰۱۱۲/۰	۰۳۳۴۷/۰
پیچ	۹۹۵۲/۰	۰۰۰۳۷۷/۰	۰۱۹۶۶/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۵۲/۰	۰۰۰۳۷۷/۰	۰۱۹۶۶/۰
وانگ و سینگ	۸۹۵۸/۰	۰۰۸۱۶/۰	۰۹۱۴۳/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۲۸/۰	۰۰۰۵۶۴/۰	۰۲۴۰۳/۰
لگاریتمی	۹۹۲۸/۰	۰۰۰۵۶/۰	۰۲۴۲۵/۰
تقریبی انتشار	۹۸۷۶/۰	۰۰۰۹۷۱/۰	۰۳۱۹۴/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۵۲/۰	۰۰۰۳۷۷/۰	۰۱۹۹۱/۰
میدیلی	۹۹۶۸/۰	۰۰۰۲۴۸/۰	۰۱۶۳۵/۰



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-  $R^2$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  برای توان ۵۰۰ وات.

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۱۷/۰	۰۰۱۵۴۴/۰	۰۳۹۲۹/۰
پیچ	۹۹۷۱/۰	۰۰۰۲۴۱/۰	۰۱۵۷۹/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۷۱/۰	۰۰۰۲۴۱/۰	۰۱۵۷۹/۰
وانگ و سینگ	۹۰۸۴/۰	۰۰۷۷۴۸/۰	۰۸۹۴۸/۰
هندرسون و پاییس	۹۸۹۷/۰	۰۰۰۸۷۲/۰	۰۳۰۰۲/۰
لگاریتمی	۹۹۰۴/۰	۰۰۰۸۰۹/۰	۰۲۹۴۲/۰
تقریبی انتشار	۹۸۶/۰	۰۰۱۱۸۳/۰	۰۳۵۵۵/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۷۱/۰	۰۰۰۲۴۱/۰	۰۱۶۰۶/۰
میدیلی	۹۹۸/۰	۰۰۰۱۶۸/۰	۰۱۳۶۵/۰

با توجه به اینکه مدل میدیلی ( $MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b \cdot t$ ) برای توان‌های ۲۰۰، ۳۰۰، 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.

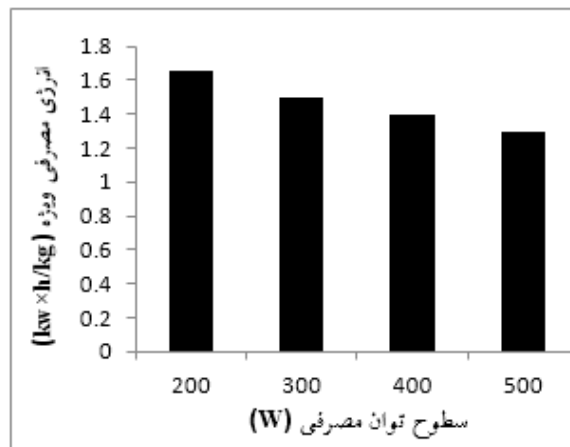
توان (وات)	a	b	k	n	$R^2$
۲۰۰	۱/۰۲۸	$۲/۰۸۶ \times 10^{-6}$	۰/۱۰۱۳	۱/۲۳۸	۰/۹۹۹۶
۳۰۰	۱/۰۳۵	$۵/۵۶۷ \times 10^{-4}$	۰/۳۱۵۹	۱/۲۶۵	۹۹۸۷/۰
۴۰۰	۱/۰۴۱	$۱۲/۹۵ \times 10^{-4}$	۰/۴۸۴۷	۱/۲۱۱	۹۹۶۸/۰
۵۰۰	۱/۰۳	$۱۱/۸۶ \times 10^{-4}$	۰/۶۶۶۹	۱/۳۰۷	۹۹۸/۰

### انرژی مصرفی ویژه

یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی و ارزیابی خشک‌کن‌ها میزان انرژی مصرفی است. خشک کردن به روش میکروویو 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. آنالیز انرژی در مراحل مختلف



خشک شدن گل پونه کوهی 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 میکروویو و وزن نمونه‌های گل پونه کوهی 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 ۱/۲۹۱ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد.



شکل ۴- انرژی مخصوص مورد نیاز طی خشک کردن گل پونه کوهی در سطوح توانی مختلف.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر گل پونه کوهی ارائه شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک شدن گل پونه کوهی 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 ۰/۹۹۶۸ تا ۰/۹۹۹۶ و میزان  $\chi^2$  و مربع میانگین خطای نسبی RMSE به ترتیب در حدود  $3/51 \times 10^{-5}$  تا  $24/8 \times 10^{-5}$  و  $0/06023$  تا  $0/01635$  بود. به عبارت دیگر شاخص ضریب تبیین مدل میدیلی، بیشترین مقدار و دو شاخص دیگر کمترین مقدار را نسبت به مدل‌های دیگر داشتند. همچنین مشاهده شد که توان میکروویو برای خشک کردن گل‌های پونه کوهی 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 ۷/۷۵ دقیقه و برای توان ۲۰۰ وات ۲۴/۷۵ دقیقه به دست آمد. از طرفی زمان خشک شدن از توان ۲۰۰ وات تا توان ۵۰۰ وات ۶۸/۶۹٪ کاهش را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۵۰۰ وات به میزان  $1/567 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۲۰۰ وات به میزان  $7 \text{ m}^2/\text{s}$  - $7$  شد. به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن گل‌های پونه کوهی بر اساس یک رابطه نمایی به میزان  $8/441 \text{ W/g}$  و  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۵۰۰ وات به میزان ۱/۲۹۱ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. 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 و گیاهان دارویی برای حفظ کیفیت آن‌ها می‌باشد.

## منابع و مأخذ

۱. خسروشاهی اصل، ا. حصار، ج. مصطفی یار، پ. ۱۳۹۲. بررسی اثرات ضد میکروبی اسانس‌های گیاهی گلپر و پونه کوهی بر ویژگی‌های کیفی ماست میوه‌ای. مجموعه مقالات دومین همایش ملی علوم و صنایع غذایی.
2. 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 Chem. Vol. 88(3), 479-484.
3. Chhninman, 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.
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. Karaaslan, S. N. & Tuncer, I. K. 2008. Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach. Biosystems Engineering. Vol. 100(16), 44-52.
8. 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.
9. Menges, H.O. & Ertekin, C. 2006. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Golden Apples. Food Engineering. Vol. 77(12), 119-125.
10. Ozkan, A., Akbudak, B. & Akbudak, N. 2007. Microwave ,Drying Characteristics of Spinach. Jou of Food Eng. Vol. 78(43), 577-583.
11. Schiffman, R.F. 1992. Microwave Processing in the U.S. Food Industry. Food Technology. Vol. 56(5), 58-52.
12. 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.
13. 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.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون  
پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران  
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Investigation of Evaporation Rate, Effective Thermal Diffusivity And Activation Energy For Drying Oregano Flower (*Origanum Vulgare*) in the Microwave Oven

### Abstract

Oregano with scientific name of *Origanum Vulgare* is one of pharmaceutical plant which grows in different mountain areas of Iran. Microwave is a quick method for drying of food materials. In this research the drying kinetics, effective thermal diffusivity, determination the best mathematical model and obtaining the activation energy for marshmallow leaves were studied using microwave oven. To process mathematical modeling, 9 models were fitted to the experimental data and the results of the regression analysis models, showed that the model of Midilli et al had best fit to the data. 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 7.75 and 24.75 minutes for 500 and 200 watts, respectively. The highest effective thermal diffusivity was at power of 500 Watts as  $1.567 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  and the lowest was at power of 200 Watts as  $4.145 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . The activation energy and thermal diffusion constant of the marshmallow dried leaves based on an exponential relation were obtained as 8.441 W/g and  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectively.

**Keywords:** Microwave, Evaporation Rate, Medicinal Plant, Mathematical Modeling, Oregano Flower