



## ارزیابی مدل‌های خشک شدن لایه نازک برای توصیف سینتیک خشک کردن گل ختمی (*Althaeaeofficinalis*)

محسن خواجه‌پور<sup>۱</sup>، محمد زارعین<sup>۲\*</sup>، برات قبادیان<sup>۳</sup>، محمدهادی خوش تقاضا<sup>۴</sup>

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

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

۳ و ۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ایمیل مکاتبه کننده: [m.zarein@modares.ac.ir](mailto:m.zarein@modares.ac.ir)

### چکیده

ختمی با نام علمی *Althaeaeofficinalis* گیاهی دارویی است که قسمت‌های مختلف آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، مایکروویو یک روش سریع خشک کردن مواد غذایی است. در این مطالعه به بررسی پارامترهای مختلف خشک کردن گل ختمی با خشک‌کن مایکروویو از نوع خانگی با محدوده توان ۱۰۰-۱۰۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز در چهار سطح توان ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ وات بر روی زمان خشک کردن، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی ویژه پرداخته شده است. با تحلیل رگرسیونی مدل‌های مختلف ریاضی برای هر سطح توان انتخاب شد. 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 بر مدت زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، تأثیر داشت، به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۶۰۰ وات ۷/۵ دقیقه و برای توان ۳۰۰ وات ۲۰/۰ دقیقه به دست آمد. بیشترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۶۰۰ وات به میزان  $m^2/s$  و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۳۰۰ وات به میزان  $m^2/s$   $1/639 \times 10^{-7}$  به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر بر اساس یک رابطه نمایی به میزان  $W/g$   $8/444$  و  $m^2/s$   $6 \times 10^{-7}$  به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مایکروویو، ارزیابی مدل‌های خشک کردن، انرژی مصرفی ویژه، ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، گل ختمی



## مقدمه

گیاه ختمی با نام علمی *Althaeaeofficinalis* گیاهی است علفی، پایا به ارتفاع تا ۱/۵ متر و بومی مناطق شرق مدیترانه گل‌های این گیاه با پهنک بزرگ و شامل ۵-۳ لب دندانه‌دار است. ختمی گل‌هایی به رنگ سفید مایل به گلی یا ارغوانی دارد که در قسمت‌های انتهایی ساقه اکثراً به صورت ۳ تایی دیده می‌شوند. قسمت‌های مختلف این گیاه از جمله گلبرگ‌ها، برگ، ریشه و ساقه خواص دارویی متفاوتی دارند. گلبرگ‌های گل ختمی را می‌توان به شکل دم‌جوش و عرقیات مصرف کرد که برای درمان انواعی از بیماری‌ها مفید است (ایمانی‌پور و مهربان، ۱۳۹۳). خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روشها برای حفظ محصولات کشاورزی و غذایی می‌باشد. خشک کردن مواد غذایی به خاطر کاهش حجم و وزن بعد از پروسه خشک شدن قابل حمل و نقل می‌سازد (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). برای رفع این مشکل و جلوگیری از کاهش کیفیت و دست‌یابی به یک فرآیند حرارتی مؤثر، از مایکروویو برای خشک کردن مواد غذایی استفاده شده است. مثال‌های متعددی از کاربردهای خشک کردن به وسیله مایکروویو وجود دارد. کاربرد مایکروویو در خشک کردن، گستره‌ی وسیعی از صنایع شامل صنایع غذایی، صنایع شیمیایی، اتومبیل‌سازی و غیره را در برمی‌گیرد. در هر مورد سامانه‌های خشک کردن 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 (Feng & Tang, 1998). مایکروویو، یک روش سریع خشک کردن مواد غذایی است که انرژی آن قابل مقایسه با روش‌های متداول خشک کردن است. در خشک کردن با مایکروویو خروج رطوبت سریع‌تر است و همچنین به دلیل تمرکز انرژی سیستم مایکروویو فقط ۲۰ تا ۳۵ درصد نسبت به سایر روش‌های خشک کردن، نیاز به فضا دارد (Arslan et al., 2004; Zarein et al., 2014). پژوهش‌های مختلفی برای خشک کردن محصولات غذایی با خشک‌کن مایکروویو انجام شده است. آلکنور و همکاران برش‌های کدو تنبل را با سه روش خشک‌کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو-همرفتی خشک کرده و بهترین دوره خشک کردن، رنگ و مصرف انرژی را بدست آوردند (Ilknur, 2007). زارعین و همکاران مدل-سازی 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 & Zarein, 2012). 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 مایکروویو، رفتار



خشک شدن گل ختمی، انتخاب مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن، تأثیر توان‌های مختلف مایکروویو بر آهنگ از دست دادن رطوبت در آن مایکروویو مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

گل‌های ختمی مورد آزمایش از مزارع اطراف شهر ماهان در استان کرمان تهیه شد و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای  $4 \pm$  درجه سلسیوس نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آن در دمای  $105 \pm 1$  درجه سلسیوس به میزان  $80/8\%$  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 & Yaldiz, 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 آن مایکروویو (گرم) می‌باشد. برای انجام فرآیند خشک کردن، گل‌های ختمی به ضخامت متوسط  $0/2$  میلی متر انتخاب شد و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل (GF-600, Japan) با دقت  $0/01 \pm$  گرم، در نمونه‌های  $50$  گرمی توزین شد.

فرآیند خشک کردن گل‌های ختمی با استفاده از خشک‌کن مایکروویو (ME9114ST-Samsung) با محدوده توان  $100-1000$  وات و فرکانس  $2450$  مگاهرتز انجام شد. در روش مایکروویو از چهار سطح توانی ( $300$ ،  $400$ ،  $500$  و  $600$  وات) برای خشک کردن استفاده شد. توزین نمونه‌ها هر  $15$  ثانیه توسط ترازوی دیجیتال با دقت  $0/01 \pm$  گرم انجام شد.

### ضریب نفوذ حرارتی مؤثر

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

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

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.

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



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

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

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.



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 پابیس	$MR = a.\exp(-kt)$
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.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (۸)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre})^2}{n - z} \quad (۹)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad (۱۰)$$

در روابط فوق  $MR_{exp,i}$  رطوبت نسبی آزمایشگاهی  $\bar{A}_m$ ،  $MR_{pre,i}$  رطوبت نسبی پیش‌بینی شده  $\bar{A}_m$ ،  $n$  تعداد مشاهدات و  $z$  تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن گل‌های ختمی 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 خشک‌کردن به روش مایکروویو

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

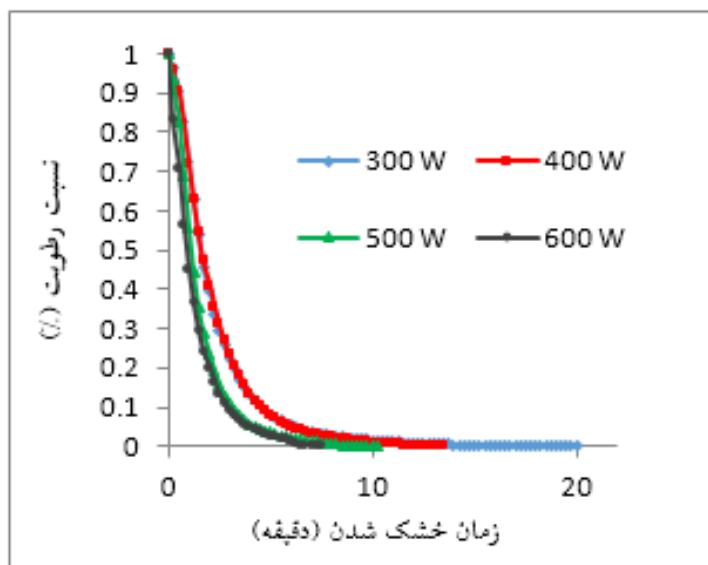
$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0} \quad (12)$$

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

## نتایج و بحث

### بررسی سینتیک خشک‌شدن

شکل ۱ تغییرات نسبت رطوبت خشک‌شدن گل‌های ختمی در توان‌های مختلف مایکروویو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زمان خشک‌شدن 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 ختمی 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 خشک‌شدن و از دست دادن رطوبت با گذشت زمان در طی خشک‌کردن کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی را سایر پژوهشگران در خشک‌کردن لایه‌های سیب و سیب‌زمینی با استفاده از مایکروویو به دست آورده‌اند (Zarein *et al.*, 2014).



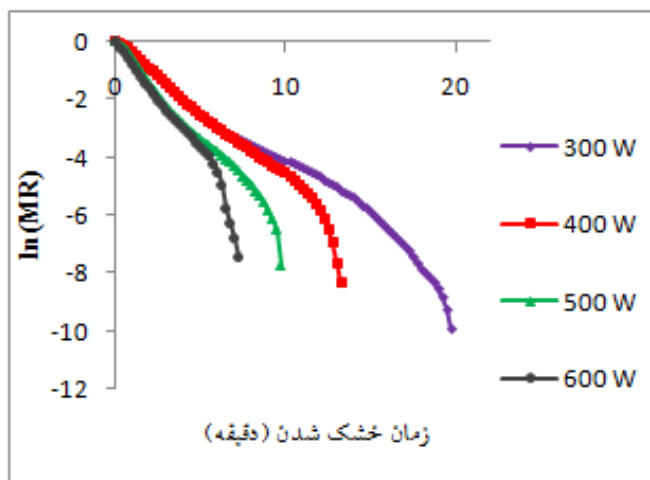
شکل ۱- منحنی‌های نسبت رطوبت خشک شدن گل ختمی

در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن زیاد می‌باشد به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۶۰۰ وات ۷/۵ دقیقه و برای توان ۳۰۰ وات ۲۰/۰ دقیقه به دست آمد. با افزایش توان از ۳۰۰ به ۶۰۰ وات، زمان خشک شدن گل‌های ختمی، ۶۲/۵٪ کاهش می‌یابد.

#### ضریب نفوذ حرارتی مؤثر

شکل ۲ نمودار  $\ln(MR)$  برحسب 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 ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ وات آورده شده است. مشاهده شد که بیشترین ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در توان ۶۰۰ وات به میزان  $3/434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمترین میزان آن در توان ۳۰۰ وات به میزان  $1/639 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  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. نتایج بدست آمده مشابه نتایج بدست آمده از تحقیقات زارعین و ارتکین است (Zarein et al., 2014; Ertekin & Yaldız, 2004).



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

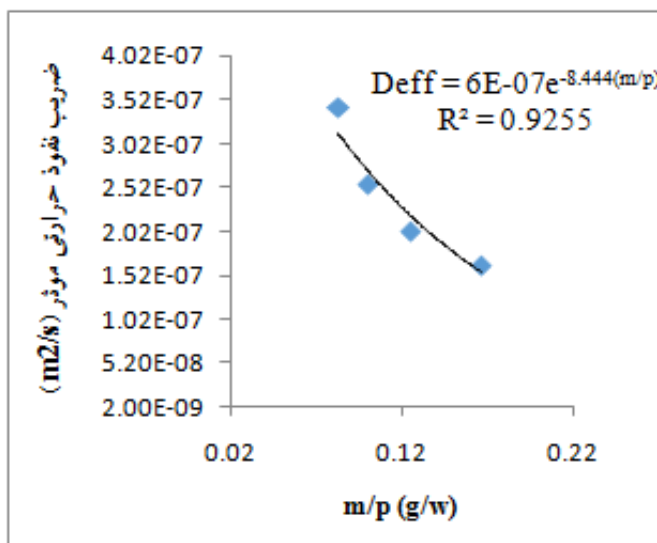
جدول ۲- مقادیر ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در توان‌های مختلف

$R^2$	ضریب نفوذ	
	توان (W)	حرارتی مؤثر ( $m^2/s$ )
۰/۹۷۶	۳۰۰	$۱/۶۳۹ \times 10^{-۷}$
۰/۹۷۰	۴۰۰	$۲/۰۲ \times 10^{-۷}$
۰/۹۷۸	۵۰۰	$۲/۵۶۴ \times 10^{-۷}$
۰/۹۴۷	۶۰۰	$۳/۴۳۴ \times 10^{-۷}$

### 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 ختمی بر اساس یک رابطه نمایی به میزان  $۸/۴۴۴ \text{ W/g}$  و  $۶ \times 10^{-۷} \text{ m}^2/s$  به دست آمد.





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

## مدل‌سازی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم‌افزار متلب انجام شد. بهترین مدلی که می‌تواند سیپتیک خشک شدن گل ختمی را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر مربع کای  $\chi^2$  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 ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ وات بود که می‌توانست رفتار خشک شدن گل ختمی را پیش‌بینی کند. این نتایج با نتایج بدست آمده از تحقیقات درویشی و ازکان مشابهنه دارد. (Darvishi & Zarein, 2012; Ozkan et al., 2007).

جدول ۳-  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE برای توان ۳۰۰ وات.

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۷۷/۰	۰۰۰۶۷۷/۰	۰۲۶۰۱/۰
پیچ	۹۹۵۷/۰	۰۰۰۲۳۴/۰	۰۱۵۳۸/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۵۷/۰	۰۰۰۲۳۴/۰	۰۱۵۳۸/۰
وانگ و سینگ	۵۷۳۸/۰	۰۲۳۳۷۵/۰	۱۵۳۸/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۳۷/۰	۰۰۰۳۴۷/۰	۰۱۸۷۵/۰
لگاریتمی	۹۹۳۷/۰	۰۰۰۳۴۴/۰	۰۱۸۷۹/۰
تقریبی انتشار	۹۸۸۷/۰	۰۰۰۶۱۹/۰	۰۲۵۲/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۵۷/۰	۰۰۰۲۳۴/۰	۰۱۵۴۸/۰
میدیلی	۹۹۶۹/۰	۰۰۰۱۶۹/۰	۰۱۳۲۶/۰



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

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۸/۰	۰۰۰۸۷۷/۰	۰۲۹۶۲/۰
پیچ	۹۹۷۵/۰	۰۰۰۱۸۶/۰	۰۱۳۷۵/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۷۵/۰	۰۰۰۱۸۶/۰	۰۱۳۷۵/۰
وانگ و سینگ	۸۷۱/۰	۰۰۹۴/۰	۰۹۷۸۶/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۴۲/۰	۰۰۰۴۱۹/۰	۰۲۰۶۷/۰
لگاریتمی	۹۹۴۳/۰	۰۰۰۴۱۲/۰	۰۲۰۷/۰
تقریبی انتشار	۹۹۰۲/۰	۰۰۰۷۱۳/۰	۰۲۷۲۲/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۷۵/۰	۰۰۰۱۸۶/۰	۰۱۳۸۸/۰
میدیلی	۹۹۸۴/۰	۰۰۰۱۱۸/۰	۰۱۱۱۸/۰

جدول ۵- $R^2$ ،  $\chi^2$  و  $RMSE$  برای توان ۵۰۰ وات.

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۸۷۹/۰	۰۰۰۸۷/۰	۰۲۹۱۲/۰
پیچ	۹۹۶۱/۰	۰۰۰۲۸۱/۰	۰۱۶۷۵/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۶۱/۰	۰۰۰۲۸۱/۰	۰۱۶۷۵/۰
وانگ و سینگ	۸۱۰۸/۰	۰۱۳۶۲۵/۰	۱۱۶۷/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۲۹/۰	۰۰۰۵۰۸/۰	۰۲۲۵۵/۰
لگاریتمی	۹۹۲۹/۰	۰۰۰۵۰۸/۰	۰۲۲۸۳/۰
تقریبی انتشار	۹۸۹۲/۰	۰۰۰۷۷۹/۰	۰۲۸۲۷/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۶۱/۰	۰۰۰۲۸۱/۰	۰۱۶۹۶/۰
میدیلی	۹۹۷۳/۰	۰۰۰۱۹۳/۰	۰۱۴۲۴/۰



## 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 ۶۰۰ وات.

مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
نیوتون	۹۹۹/۰	$2.067 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۴۸۹/۰
پیچ	۹۹۹۱/۰	$5.23/6 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۲۱۴/۰
اصلاح شده پیچ	۹۹۹۱/۰	$5.23/6 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۲۱۴/۰
وانگ و سینگ	۸۶۰۷/۰	$6/972 \times 10^{-5}$	۱.۰۰۳/۰
هندرسون و پاییس	۹۹۹۱/۰	$4.26/6 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۱۵۳/۰
لگاریتمی	۹۹۹۱/۰	$0.2/6 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۰۳۲/۰
تقریبی انتشار	۹۹۹/۰	$0.4/7 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۶۸۴/۰
اصلاح شده پیچ ۲	۹۹۹۱/۰	$5.23/6 \times 10^{-5}$	۰.۰۸۳۶/۰
میدیلی	۹۹۹۲/۰	$5.96/5 \times 10^{-5}$	۰.۰۷۸۸۷/۰

با توجه به اینکه مدل میدیلی ( $MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b \cdot t$ ) برای توان‌های ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ وات انتخاب شد، ضرایب آن در جدول ۷ آمده است.

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

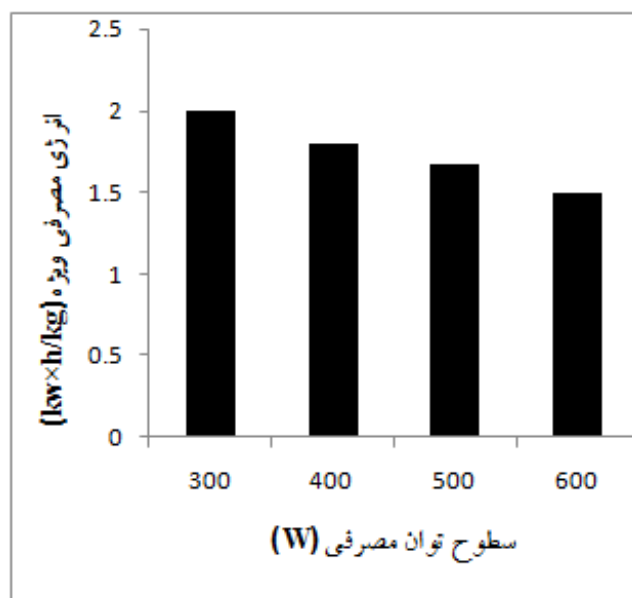
توان (وات)	a	b	k	n	$R^2$
۳۰۰	۱/۰۴۱	$4/343 \times 10^{-4}$	۰/۴۰۰۴	۱/۱۹۴	۹۹۶۹/۰
۴۰۰	۱/۰۲۹	$7/964 \times 10^{-4}$	۰/۳۸۰۹	۱/۲۲	۹۹۸۴/۰
۵۰۰	۱/۰۲۸	$12/74 \times 10^{-4}$	۰/۶۱۳۴	۱/۲۲۲	۹۹۷۳/۰
۶۰۰	۱/۰۰۶	$7/542 \times 10^{-4}$	۰/۷۸۷۶	۱/۰۲۶	۹۹۹۲/۰

### 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. آنالیز انرژی در مراحل مختلف خشک



شدن گل ختمی 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 گل ختمی به دست آمد. شکل ۴ میزان انرژی مصرفی ویژه در مایکروویو در توان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۶۰۰ وات به میزان  $1/502$  کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. تحقیقات مشابهی توسط ایلکنور و فنگ در این زمینه انجام شده است که نتایج بدست آمده آن‌ها را تایید می‌کند (Feng & Tang, 1998; Ilknur, 2007).



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

### نتیجه گیری

در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر گل ختمی ارائه شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک شدن گل ختمی 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  $0/9969$  تا  $0/9992$  و میزان  $\chi^2$  و مربع میانگین خطای نسبی RMSE به ترتیب در حدود  $596/5 \times 10^{-5}$  تا  $1/93 \times 10^{-4}$  و  $0/00787$  تا  $0/01424$  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 مایکروویو برای خشک کردن گل‌های ختمی بر مدت زمان خشک شدن و ضریب نفوذ حرارتی مؤثر در یک خشک‌کن مایکروویو تأثیر دارد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد، به طوری که زمان خشک شدن برای توان ۶۰۰ وات  $7/5$  دقیقه و برای توان ۳۰۰ وات  $20/0$  دقیقه به دست آمد. از طرفی زمان خشک شدن از توان ۳۰۰ وات تا توان ۵۰۰ وات  $70/5\%$  کاهش را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین میزان ضریب نفوذ



حرارتی در توان ۶۰۰ وات به میزان  $3/434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمترین میزان ضریب نفوذ حرارتی در توان ۳۰۰ وات به میزان  $1/639 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. میزان انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ حرارتی مؤثر در خشک کردن گل‌های ختمی بر اساس یک رابطه نمایی به میزان  $8/444 \text{ W/g}$  و  $6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. با افزایش توان، انرژی مصرفی ویژه کاهش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار آن مربوط به توان ۶۰۰ وات به میزان  $1/502$  کیلو وات ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. با توجه به نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که خشک کردن با میکروویو 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 مآخذ

- ایمانی‌پور، م. مهربان، ا. ۱۳۹۳. بررسی کمی و کیفی مواد مؤثره گل محمدی و گل ختمی. مجموعه مقالات دومین همایش ملی کشاورزی و منابع طبیعی پایدار.
- 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.
- 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.
- 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.
- Duke, J.A. 1983. Handbook of Energy Crops. Center 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 Eng. Vol. 63(23), 349-359.
- Feng, H. & Tang, J. 1998. Microwave Finish Drying Diced Apples in a Spouted Bed. Jou of Food Sci. Vol. 63(23), 679-683.
- Ilknur, A. 2007. Microwave, Air and Combined Microwave–Air-Drying Parameters of Pumpkin Slices. LWT. Vol. 40(9), 1445-1451.
- 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.
- Menges, H.O. & Ertekin, C. 2006. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Golden Apples. Food Engineering. Vol. 77(12), 119-125.
- Ozkan, A., Akbudak, B. & Akbudak, N. 2007. Microwave ,Drying Characteristics of Spinach. Jou of Food Eng. Vol. 78(43), 577-583.
- 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.
- 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



## Evaluation of Thin Layer Drying Models to Describe the Drying Kinetics of Marshmallow (*Althaeaofficinalis*)

### Abstract

Marshmallow with scientific name of *Althaeaofficinalis* is one of pharmaceutical plant which often its petals, leaves, roots and stems have been used. Microwave is a quick method for drying of food materials. In this study, different parameters of marshmallow drying using microwave dryer at frequency of 2450 MHz with power range of 100-1000 watts were studied on drying time, the effective thermal diffusivity, activation energy and special consumption energy at four power levels of 300, 400 500 and 600 watts. The results of the regression analysis models indicated that the Midilli et al model had a best fit to the experimental data. Microwave power levels (300, 400, 500 and 600) watts had significant effect on drying time and the effective thermal diffusivity, so that the drying time was obtained 7.5 and 20.0 minutes for 600 and 300 watts, respectively. The highest effective thermal diffusivity was at power of 600 Watts as  $3.434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  and the lowest was at power of 300 Watts as  $1.639 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . The activation energy and thermal diffusion constant of the marshmallow dried leaves based on an exponential relation were obtained as 8.444 W/g and  $6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectively.

**Keywords:** Microwave, Drying Models Evaluation, Special Consumption Energy, Effective Thermal Diffusivity, Marshmallow