

بررسی انرژی مصرفی و سینتیک خشک کردن گیاه دارویی آویشن در خشک کن میکروویو

حمید خفاجه^۱، احمد بناکار^{۱*}، سعید مینایی^۱، احمد تقی زاده^۲، علی متولی^۱، مسعود رضایی آدریانی^۳

۱- گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۳- گروه باغبانی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۲۵)

چکیده

در این مطالعه تاثیر توان های مختلف میکروویو بر رفتار خشک شدن، ضریب نفوذ موثر، بهترین مدل ریاضی خشک شدن، مقادیر انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در گیاه دارویی آویشن مورد بررسی قرار گرفت. با تحلیل رگرسیونی در محیط نرم افزار متلب برای مدل های مورد بررسی، مشخص شد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده های بدست آمده نشان می دهد. ضریب نفوذ موثر گیاه دارویی آویشن در خشک کن میکروویو بین $10^{-9} \times 15/416$ تا $10^{-9} \times 213/802$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. همچنین میزان انرژی فعال سازی در خشک کن میکروویو برای آویشن $84/86$ W/g بر حسب آهنگ ثابت خشک شدن و 100 W/g بر حسب ضریب نفوذ موثر محاسبه شد. همچنین کمترین و بیشترین میزان انرژی مخصوص مورد نیاز برای خشک کردن گیاه دارویی آویشن به ترتیب برابر با $6/994$ تا $19/607$ وات ساعت بر کیلو گرم بدست آمد.

کلید واژگان: سینتیک خشک کردن، آویشن، انرژی فعال سازی، ضریب نفوذ رطوبت، میکروویو

* مسئول مکاتبات: ah_banakar@modares.ac.ir

۱- مقدمه

آویشن *Thyme* با نام علمی (*Thymus vulgaris*) است که دارای خاصیت گشاد کنندگی مجاری تنفسی و کاهش سرفه، اثرات ضد باکتریایی، ضد اسپاسم (تهوع) مجاری گوارشی و رقیق کردن خلط مجاری تنفسی می باشد.

امروزه اکثر کشورهای پیشرفته دنیا به علت بروز عوارض جانبی ناشی از مصرف داروهای سنتزی، مقرون به صرفه نبودن ساخت برخی از داروهای سنتزی، انحصاری بودن درمان برخی بیماری ها با گیاهان دارویی مانند جذام، سالک و ... به سمت گیاهان دارویی سوق پیدا کرده اند [۱].

خشک کردن یکی از مهم ترین عملیات فرآوری پس از برداشت است که محصولات فاسد شونده و با طول عمر کم مانند گیاه دارویی آویشن را به فرآورده های مقاوم با مدت ماندگاری بالا تبدیل می کند. در طی خشک کردن آب از گیاه آویشن خارج شده و در نتیجه امکان رشد میکروارگانیسم ها و ایجاد واکنش های شیمیایی نامطلوب به حداقل رسیده و ماندگاری مواد غذایی افزایش می یابد [۲].

میوه ها، سبزیجات و غلات مانند انگور، فلفل، زردآلو و ذرت که معمولاً با قرار گرفتن در معرض آفتاب خشک می شوند دارای آلودگی های مختلف موجود در خاک و محیط اطراف می باشند [۳]. مشکلات استفاده از انرژی خورشید در خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی سبب شد تا خشک کن های صنعتی جایگزین روش های سنتی خشک کردن گردند. در مقابل استفاده از خشک کن های صنعتی باعث مصرف انرژی زیادی در صنعت خشک کردن می گردند و خشک کردن محصولات کشاورزی را یک عملیات با مصرف انرژی زیاد ولی با اهمیت زیاد صنعتی مطرح می سازد [۴].

فرآیند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای 300MHz و 300GHz نشانگر امواج مایکروویو است. در خشک کن مایکروویو انرژی الکترومغناطیسی مستقیماً به انرژی جنبشی مولکول های آب تبدیل می شود. بنابراین، حرارت در داخل

محصول تولید می شود و انتقال انرژی بوسیله موانع انتقال بویژه در مواد ویسکوز تحت تاثیر قرار نمی گیرد. نظر به اینکه امواج مایکروویو قادر به نفوذ به داخل ماده بوده و بدین ترتیب انرژی را ذخیره می کند لذا در این روش حرارت می تواند در سراسر حجم ماده تولید شود و ماده سریع تر خشک می شود [۵].

مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از مایکروویو مانند خشک کردن دانه ها [۶-۷]، خشک کردن سبزیجات [۸-۱۰]، خشک کردن اسفناج [۳]، خشک کردن نعنا [۱۱]، خشک کردن میوه جات [۱۲-۱۳]، خشک کردن کیوی [۱۴] و خشک کردن ورقه های سیب [۱۵] انجام شده است.

مطالعات انجام شده در مورد خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی و گیاهان دارویی به وسیله مایکروویو نشان داد که مطالعه ای در مورد خشک کردن گیاه دارویی آویشن به وسیله مایکروویو انجام نشده است و از آنجا که مدت ماندگاری این محصول بسیار کم است، انجام این پژوهش ضرورت می یابد. هدف از این پژوهش بررسی رفتار خشک شدن گیاه دارویی آویشن، تعیین بهترین مدل ریاضی خشک شدن برای توصیف سینتیک خشک شدن، تاثیر شرایط خشک کردن بر ضریب نفوذ موثر، تعیین مقادیر انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در طی خشک کردن گیاه دارویی آویشن در روش خشک کردن مایکروویو می باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

آویشن مورد آزمایش از مزرعه گیاهان دارویی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران تهیه شد و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای $C^{\circ} 4 \pm$ نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای $C^{\circ} 105 \pm 1$ به میزان ۷۶/۸٪ بر پایه تر بدست آمد. این کار در ۳ تکرار انجام شد.

جدول ۱ مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی فرآیند خشک شدن

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل
۱	مدل نیوتن [۱۸]	$MR = \exp(-kt)$
۲	مدل پیچ [۱۹]	$MR = \exp(-kt^n)$
۳	مدل اصلاح شده پیچ [۲۰]	$MR = \exp(-(kt)^n)$
۴	مدل وانگ و سینگ [۲۱]	$MR = 1 + a.t + b.t^2$
۵	مدل هندرسون و پاپیس [۲۲]	$MR = a.\exp(-kt) + c$
۶	مدل لگاریتمی [۲۳]	$MR = a.\exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$
۷	مدل تقریبی انتشار [۲۴]	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$
۸	مدل اصلاح شده پیچ [۲۵]	$MR = \exp(-kt^n) + b.t$
۹	مدل میدیلی و همکاران [۲۶]	

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

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

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

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

$MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی i ام، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش بینی شده i ام، n تعداد مشاهدات، Z تعداد ثابت های خشک شدن می باشد. بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن آویشن را توصیف کند مدل دارای بیشترین ضریب همبستگی R^2 و کمترین مقدار مربع میانگین خطای نسبی RMSE و مربع کای χ^2 باشد.

۲-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت

برای بدست آوردن ضریب نفوذ از رابطه زیر استفاده شد [۲۷].

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

رابطه زیر برای تعیین میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک استفاده شد [۱۶].

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

برای انجام فرآیند توزین آویشن در حال خشک شدن از ترازوی دیجیتال مدل (AND GF-600, Japan) با دقت $\pm 0.01g$ استفاده شد. فرآیند خشک کردن آویشن با استفاده از خشک کن مایکروویو (SAMSUNG, model: ME3410W, Korea) انجام شد. در پژوهش از هفت سطح توان مایکروویو (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ وات) برای خشک کردن استفاده شد.

۲-۲- استخراج بهترین مدل ریاضی

توزین نمونه ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه تر به ۱۵٪ برسد ادامه می یابد. کسر آویشن 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) می باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_t بسیار کوچک می باشد از این رو می توان از آن صرفه نظر کرد و معادله به صورت زیر ساده می شود [۱۷].

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

مدل هایی که برای برازش داده های حاصل از خشک کردن تحت شرایط یاد شده استفاده گردید در جدول (۱) آورده شده است.

با رسم نمودار در دو حالت بالا و با استفاده از مدل دادالی و همکاران و تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار MATLAB می توان انرژی فعال سازی و ضریب $(D_0 \text{ و } K_0)$ را بدست آورد [۱۱].

۲-۵- انرژی مصرفی مایکروویو

انرژی مصرفی در خشک کن های مایکروویو با استفاده از رابطه زیر بدست می آید.

$$t \times E_t = P$$

که در آن E_t کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن P ، (kW.h)، توان خروجی از مایکروویو (kW) و t مدت زمان خشک شدن (ساعت) می باشد [۳].

۲-۶- انرژی مخصوص خشک کردن به روش

مایکروویو

میزان انرژی مخصوص آویشن برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم آویشن که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۷].

$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0}$$

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

۳- نتیجه گیری و بحث

۳-۱- بررسی سنتیک خشک شدن

شکل (۱) تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن آویشن در توان های مختلف مایکروویو نسبت به زمان را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود زمان خشک شدن نسبت به توان مایکروویو متفاوت می باشد. افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می دهد، زیرا این گونه به نظر می رسد که با افزایش توان خروجی از مایکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت آویشن می شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر

اضخامت نمونه به t ، زمان خشک شدن به s ، n تعداد مشاهدات و D_{eff} ضریب نفوذ حرارتی به m^2/s می باشد. رابطه بالا در مدت زمان های طولانی خشک شدن به صورت زیر خلاصه می شود.

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

با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه و رسم نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان از شیب نمودار می توان D_{eff} را بدست آورد.

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

۲-۴- انرژی فعال سازی

از آنجایی که دما در خشک کن مایکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نیست، برای دست آوردن انرژی فعال سازی باید از شکل اصلاح شده رابطه آرنوس استفاده کرد. در روش اول می توان از ارتباط بین آهنگ ثابت سینتیک خشک شدن (K) و نسبت توان خروجی مایکروویو به وزن نمونه (m/p) به جای دمای هوا استفاده کرد. در این حالت پس از ارزیابی داده ها، با به کار بردن رابطه بالا و رسم مقادیر نرخ ثابت خشک شدن (K) در مقابل وزن نمونه به توان مایکروویو (m/p) در نرم افزار MATLAB می توان مقدار انرژی فعال سازی را بدست آورد [۱۱].

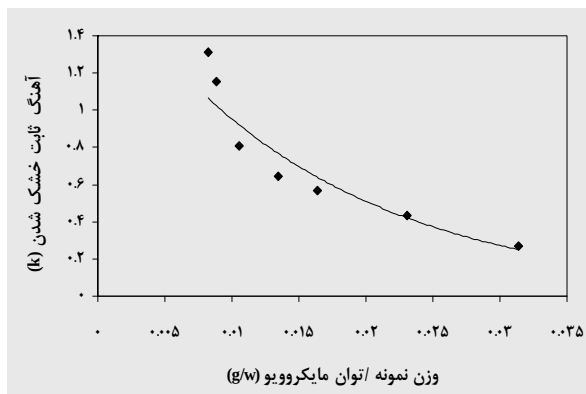
$$K = K_0 \exp \left(\frac{-E_a \cdot m}{p} \right)$$

که در آن (K) آهنگ ثابت خشک شدن (min^{-1}) که از رابطه میدلی (بهترین مدل ریاضی بدست آمده در این پژوهش) بدست می آید. (K_0) عرض از مبدا رابطه (min^{-1})، E_a انرژی فعال سازی (W g^{-1})، (p) توان خروجی مایکروویو (W) و (m) وزن نمونه ها (g) می باشد.

در روش دوم، برای بدست آوردن انرژی فعال سازی در مایکروویو وابستگی بین ضریب نفوذ رطوبت موثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه بر اساس مدل آرنوس می تواند بدست آید [۱۱].

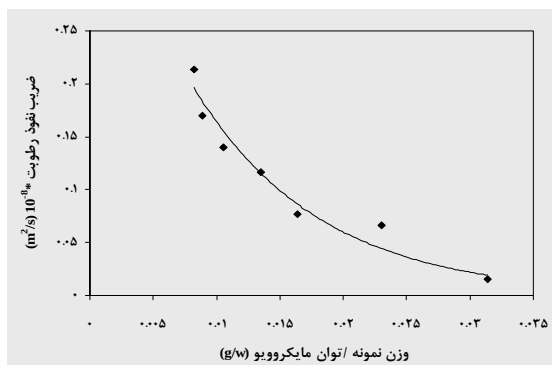
$$D_{eff} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a \cdot m}{p} \right)$$

بدست آوردن ضرایب مدل میدیلی مشاهده شد که با افزایش توان مایکروویو آهنگ ثابت خشک شدن (k) افزایش می‌یابد. مقادیر انرژی فعال سازی در روش اول برای آویشن ۸۴/۸۶ (وات بر گرم) و $R^2=0/909$ بدست آمد.



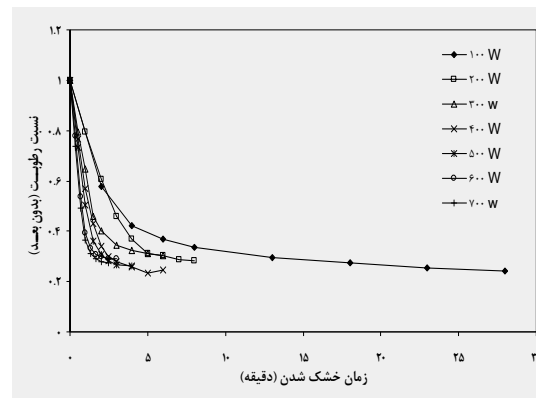
شکل ۲ ارتباط بین ضریب K و وزن نمونه/توان خروجی مایکروویو برای آویشن

در روش دوم انرژی فعال سازی را می‌توان با رسم نمودار (D_{eff}) در مقابل (m/p) بدست آورد. مقادیر انرژی فعال سازی در روش دوم برای آویشن ۱۰۰ (وات بر گرم) با $R^2=0/945$ بدست آمد [۲۸].



شکل ۳ ارتباط بین ضریب نفوذ موثر و وزن نمونه/توان خروجی مایکروویو برای آویشن

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.



شکل ۱ منحنی‌های خشک شدن آویشن بر حسب زمان (۲۰۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ وات)

۲-۳- ضریب نفوذ موثر رطوبت

مقادیر ضریب نفوذ رطوبت موثر (D_{eff}) در توان‌های مختلف خشک کردن محاسبه شده و در جدول (۲) نشان داده شده است. مشاهده شد که بیشترین ضریب نفوذ رطوبت در توان ۷۰۰ و به میزان $213/802 \times 10^{-9}$ و کمترین میزان ضریب نفوذ رطوبت در توان ۱۰۰ به میزان $15/416 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد. همان گونه که از جدول (۲) ملاحظه می‌گردد، در روش خشک کردن با مایکروویو با افزایش توان مایکروویو ضریب نفوذ موثر رطوبت، یک روند افزایشی دارد که تاثیر توان مایکروویو در این امر بارزتر است. دلیل وقوع این مسئله تاثیر بارز دما در اثر افزایش توان مایکروویو در ایجاد جنبش مولکولی و گرمای بیشتر و افزایش ضریب مذکور می‌باشد.

۲-۴- انرژی فعال سازی

به عنوان روش اول برای بدست آوردن انرژی فعال سازی با رسم نمودار (k) در مقابل (m/p) انرژی فعال سازی (K_0) را از معادله (۱۰) بدست می‌آید. با استفاده از آنالیز آماری و

جدول ۲ مقادیر ضریب نفوذ (m^2/s) و ضریب تعیین در توان‌های مختلف

توان	۱۰۰W	۲۰۰W	۳۰۰W	۴۰۰W	۵۰۰W	۶۰۰W	۷۰۰W
ضریب نفوذ (m^2/s) ^۶	۰/۰۱۵۴۱۶	۰/۰۶۶۵۳۴	۰/۰۷۷۰۸۲	۰/۰۱۱۸۴۸	۰/۱۳۹۹۶۵	۰/۱۶۶۳۳۵	۰/۲۱۳۸۰۲
R^2	۰/۶۹۱	۰/۹۰۶	۰/۷۹۷	۰/۸۵۳	۰/۸۲۵	۰/۷۷۸	۰/۸۳۷

۲-۵- مدل سازی ریاضی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره با نرم افزار *MATLAB* انجام شد. جدول ۳ نتایج برازش (ضریب همبستگی R^2 ، χ^2 و RMSE) مدل ارائه شده، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای خشک شدن آویشن را نشان می‌دهد. نتایج برازش نشان داد که مدل ارائه شده برای منحنی نرخ تبخیر قابل قبول است

و مدل میدیلی بهترین مدل برای توصیف خشک شدن می‌باشد. مقادیر ضریب همبستگی R^2 ، χ^2 و RMSE ریشه میانگین مربع خطا، برای مدل ارائه شده به ترتیب بین ۰/۹۹۷۷-۰/۹۹۹۹، 10^{-6} تا $8/2 \times 10^{-4}$ و $1/3 \times 10^{-4}$ و ۰/۰۲۰۱ تا ۰/۱۱۳۲ قرار داشت. همچنین مقادیر ضرایب مدل میدیلی در جدول (۴) آمده است.

جدول ۳ شاخص‌های آماری R^2 ، χ^2 و RMSE برای مدل‌های مختلف ریاضی در توان‌های مختلف

مدل	۱۰۰ وات			۲۰۰ وات			۳۰۰ وات			۴۰۰ وات		
	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2
نیوتن	۰/۵۵۲۴	۰/۰۲۶۱	۰/۱۶۱۵	۰/۹۵۱۲	۰/۰۰۳۲۶	۰/۰۵۷۰۹	۰/۸۳۳۷	۰/۰۱۱	۰/۱۰۵	۰/۹۲۴۲	۰/۰۵۳۱۳	۰/۰۷۲۹
بیج	۰/۹۸۷۴	۰/۰۰۰۸۳۸	۰/۰۲۸۹۵	۰/۹۷۶۱	۰/۰۰۱۸۲۵	۰/۰۴۲۷۲	۰/۹۵۰۶	۰/۰۰۳۵۳	۰/۰۵۹۴۲	۰/۹۷۳	۰/۰۰۲۱۶۷	۰/۰۴۶۵۵
بیج اصلاح شده	۰/۹۸۷۴	۰/۰۰۰۸۳۸	۰/۰۲۸۹۵	۰/۹۷۶۱	۰/۰۰۱۸۲۵	۰/۰۴۲۷۲	۰/۹۵۰۶	۰/۰۰۳۵۳	۰/۰۵۹۴۲	۰/۹۷۳	۰/۰۰۲۱۶۷	۰/۰۴۶۵۵
وانگ و سینگ	۰/۵۸۰۳	۰/۰۳۷۹	۰/۱۶۷۲	۰/۹۹۵	$3/53 \times 10^{-4}$	۰/۰۱۸۸	۰/۹۴۱۵	۰/۰۰۴۱۸	۰/۰۶۴۶۶	۰/۹۶۸۲	۰/۰۰۲۵۵	۰/۰۵۰۴۹
هندرسون	۰/۶۸۵۹	۰/۰۲	۰/۱۴۴۷	۰/۹۵۵۶	۰/۰۰۰۳۳۸	۰/۰۵۱۹	۰/۸۶۰۱	۰/۰۱	۰/۱	۰/۹۳۳۱	۰/۰۰۵۳۶۴	۰/۰۷۳۲۴
لگاریتمی	۰/۹۹۱۴	$6/69 \times 10^{-4}$	۰/۰۲۵۱۷	۰/۹۹۲۹	$6/31 \times 10^{-4}$	۰/۰۲۵۱۴	۰/۹۹	$8/3 \times 10^{-4}$	۰/۰۲۸۱۱	۰/۹۹۶۴	$3/39 \times 10^{-4}$	۰/۰۱۸۴۲
تقریب پخش شده	۰/۹۹۹۷	$2/07 \times 10^{-5}$	۰/۰۴۵۵۸	۰/۹۹۷	$2/66 \times 10^{-4}$	۰/۰۱۶۳۳	۰/۹۹۱۳	$7/37 \times 10^{-4}$	۰/۰۲۶۹۸	۰/۹۲۴۲	۰/۰۰۷۰۸۶	۰/۰۱۸۴۲
بیج اصلاح شده ۲	۰/۹۸۷۴	$9/88 \times 10^{-4}$	۰/۰۳۱۳۷	۰/۹۷۶۱	۰/۰۰۲۱۳	۰/۰۴۶۱۴	۰/۹۵۰۶	۰/۰۰۴۱۲	۰/۰۶۴۱	۰/۹۷۳	۰/۰۰۲۵۲۸	۰/۰۵۰۲۸
میدیلی	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۰۳۵۶۶	۰/۰۱۸۸	۰/۹۹۹۵	$5/13 \times 10^{-4}$	۰/۰۰۷۳۳۷	۰/۹۹۱	۰/۰۰۰۸۹۶	۰/۰۲۹۹۳	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۰۲۵۳۲	۰/۰۱۵۹۱

ادامه جدول ۳ شاخص‌های آماری R^2 ، χ^2 و $RMSE$ برای مدل‌های مختلف ریاضی در توان‌های مختلف

مدل	۵۰۰ وات	۶۰۰ وات	۷۰۰ وات
	R^2	χ^2	RMSE
نیوتن	۰/۹۱۷۳	۰/۰۰۶	۰/۰۷۷۶۶
پیچ	۰/۹۶۶۵	۰/۰۰۲۸۴	۰/۰۵۳۳۶
پیچ اصلاح شده	۰/۹۶۶۵	۰/۰۰۲۸۴	۰/۰۵۳۳۶
وانگ و سینگ	۰/۹۷۳۸	۰/۰۰۲۲۳	۰/۰۴۷۲۴
هندرسون	۰/۹۲۵	۰/۰۰۶۳۷۸	۰/۰۷۹۸۶
لگاریتمی	۰/۹۹۲۷	۰/۰۰۰۷۴۴۲	۰/۰۲۷۲۸
تقریب پخش شده	۰/۹۱۷۳	۰/۰۰۸۴۴۴	۰/۰۹۱۸۹
مدل اصلاح شده پیچ ۲	۰/۹۶۶۵	۰/۰۰۳۴۱۶	۰/۰۵۸۴۵
میدیلی	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۰۳۰۷۵	۰/۰۱۷۵۴

جدول ۴ مقادیر ثابت مدل میدیلی برای خشک کردن گیاه دارویی آویشن

توان میکروویو	a	b	k	n
۱۰۰W	۱/۰۰۱	۰/۰۰۵۵۴۹	۰ / ۲۷۰۲	۰/۵۰۳
۲۰۰W	۱/۰۰۱	۰/۰۳۱۱۹	۰/۴۳۰۶	۱/۱۸۹
۳۰۰W	۱/۰۰۶	۰/۰۴۹۱۷	۰/۵۶۷۵	۱/۰۱۳
۴۰۰W	۱/۰۰۵	۰/۰۳۹۵۲	۰/۶۴۲۱	۱/۰۰۳
۵۰۰W	۱/۰۰۳	۰/۰۶۲۸۴	۰/۸۰۶۸	۱/۱۰۵
۶۰۰W	۱/۰۰۷	۰/۰۹۷۶۳	۱/۱۵۶	۱/۱۲۶
۷۰۰W	۱/۰۰۴	۰/۱۰۵۶	۱/۳۱۱	۱/۱۲۴

۲-۶- انرژی مصرفی مورد نیاز

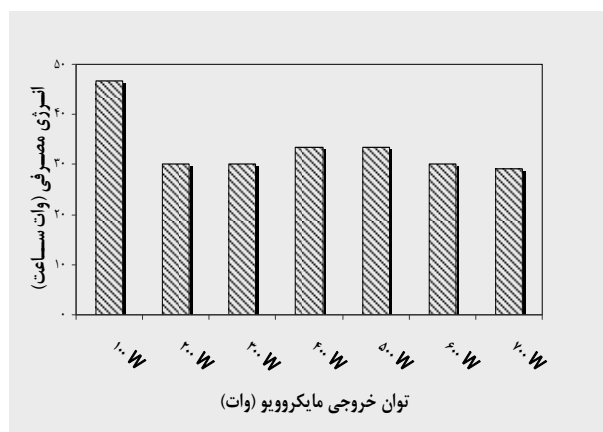
خشک کردن به روش میکروویو یکی از روش‌های ارزان می‌باشد و انرژی کمتری را نسبت به بقیه خشک‌کن‌ها مصرف می‌کند. با افزایش توان میکروویو زمان خشک شدن کاهش یافت و سرعت خشک شدن بالاتر در توان بالاتر میکروویو بدست آمد. دلیل این امر آن است که به علت حضور زیاد مولکول‌های دو قطبی آب، انرژی بیشتری از امواج میکروویو

جذب شده و با جذب انرژی زیاد میکروویو حرارت تولید می‌شود که باعث افزایش دمای نمونه می‌گردد. از آنجا که بیشتر رطوبت محصول در ابتدای فرآیند خشک شدن از محصول خارج شده، تعداد مولکول‌های دو قطبی در محصول در حال خشک شدن کاهش می‌یابد و به دنبال آن آهنگ خشک شدن کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۴) کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به توان ۴۰۰ وات که برابر ۲۹/۱۶

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر برگ های آویشن ارائه شده است. نرخ تبخیر برحسب تابعی از زمان و توان برای خشک شدن آویشن بیان شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل میدیلی بهترین مدل برای توصیف خشک شدن است. ضریب نفوذ موثر گیاه دارویی آویشن در خشک کن مایکروویو بین $10^{-9} \times 15/416$ تا 10^{-9} $213/802 \times 10$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. همچنین میزان انرژی فعال سازی در خشک کن مایکروویو برای آویشن $84/86 \text{ W/g}$ بر حسب آهنگ ثابت خشک شدن و 100 W/g بر حسب ضریب نفوذ موثر محاسبه شد. کمترین و بیشترین میزان انرژی مصرفی مخصوص برای خشک کردن گیاه دارویی آویشن به ترتیب برابر با $6/994$ تا $19/60784$ وات ساعت بر کیلو گرم بدست آمد.

وات ساعت ($h \times W$) می باشد و بیشترین مقدار انرژی مربوط به توان ۱۰۰ وات و برابر $46/6$ وات ساعت ($h \times W$) می باشد.

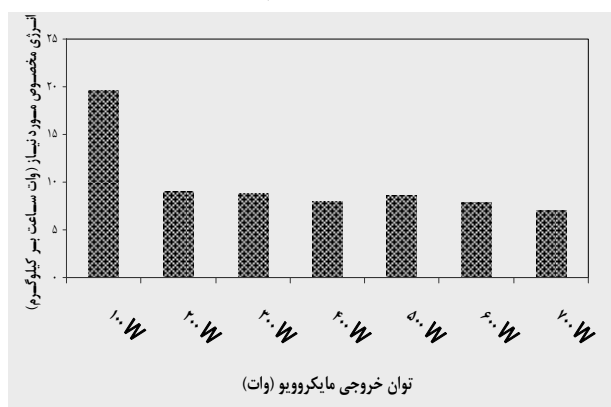


شکل ۴ انرژی مصرفی طی خشک کردن آویشن در مایکروویو

۲-۷- انرژی مخصوص خشک کردن به

روش مایکروویو

شکل (۵) میزان انرژی مخصوص مورد نیاز برای خشک کردن آویشن را در توان های مختلف نشان می دهد. با افزایش توان مایکروویو روند انرژی مخصوص مصرفی کاهشی می باشد. کمترین و بیشترین مقدار انرژی مخصوص به ترتیب مربوط به توان ۷۰۰ و ۱۰۰ وات به مقدار $6/994$ تا $19/60784$ وات ساعت بر کیلو گرم بدست آمد.



شکل ۵ انرژی مخصوص طی خشک کردن آویشن در مایکروویو

۴- منابع

- [1] Ahmadi Chenarbon H., Minaei S., Bassiri A. R., Almassi M. and Arabhosseini A. (2011), Effective parameters on drying of *Hypericum perforatum* L. leaves. J Medic Plants Res. 5(18): 4530-4536.
- [2] Barbosa-Canovas G.V., Vega-Mercado H. (1996), Dehydration of Foods (first ed.), Chapman and Hall/NY/USA.
- [3] Ozkan, I. Alibas, B. and Akbudak N. (2007), Microwave drying characteristics of spinach. J Food Eng 78(2): 577-583.
- [4] Motevali A., Younzi S., Amiri Chayjan R., Aghilinategh N., Banakar A. (2013), Drying Kinetics of Dill Leaves in Convective Dryer. International Agrophysics 27(1):39-47.
- [5] Krulis M., Kuhnert S., Leiker M., Rohm H. (2005), Influence of energy input and initial moisture on physical properties of microwave vacuum dried strawberries. Eur Food Res Technol 221:803-808
- [6] Walde S.G., Balaswamy K., Velu V., Rao D.G. (2002), Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*). J Food Eng 55: 271-276.

- [18] O'Callaghan, J.R., Menzies D.J., and Bailey P.H. (1971), Digital simulation of agricultural drier performance. *J Agri Eng Res.* 16(3): 223-244.
- [19] S Singh., Shivhare U.S., Ahmeda J, Raghavan G.S.V (1999), Osmotic concentration kinetics and quality of carrot preserve. *Food Res Int* 32(7): 509-514.
- [20] White G.M, Ross I.J, and Ponekert R (1981), Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE* 24:466-468.
- [21] 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.
- [23] Yagcioglu, A, Degirmencioglu A, and Cagatay F. (1991), Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In *Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy*. I.A. Bascetincelik, ed. Pp. 565-569. Adana, Turkey Faculty of Agriculture, C, ukurova University.
- [24] Kassem, A.S. (1998), Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In *13th international congress on agricultural engineering*, Vol. 6. 2-6 February, Morocco.
- [25] Diamante, L.M, and Munro P.A. (1991), Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51:271-276.
- [26] Midilli, A, Kucuk H, and Yapar Z. (2002), A new model for single layer drying. *Drying Tech* 20(7): 1503-1513.
- [27] Aghbashlo M., Kianmehr M H, and Samimi-Akhijahani H. (2008), Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). *Energy Con. Manag.* 49(10):2865-2871.
- [28] Prakash S., Jha S. K., and Datta N. (2004), Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *J Food Eng.* 62(3):305-313.
- [7] Adu B. and Otten L. (1996), Diffusion characteristics of white beans during microwave drying. *J Agri Eng Res* 64(1): 61-69.
- [8] Lin T.M., Durance T.D., and Seaman C.H. (1998), Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. *Food Res Int* 4: 111-117.
- [9] Alibas I. (2006), Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave convective drying. *Drying Techn.* 24: 1425-1435.
- [10] Litvin S., Mannheim C.H., and Miltz J. (1998), Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *J Food Eng* 36:103-111.
- [11] Ozbek B., and Dadali G. (2007) Thin-layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *J Food Eng.* 83:541-549.
- [12] Tulasidas T.N., Ratti C., and Raghavan G.S.V. (1997), Modelling of microwave drying of grapes. *Can Agri Eng* 39: 57-67.
- [13] Funebo T, and Ohlsson T. (1998), Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *J Food Eng* 38: 353-367.
- [14] Maskan M. (2001), Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J Food Eng.* 48(2):177-182.
- [15] Li Z., Raghavan G.S.V., Wang N., and Vigneault, C. (2011), Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *J Food Eng* 104 (2): 234-238.
- [16] Mohsenin N (1986), Physical properties of plant and animal materials: Gordon and Breach, science publishers.
- [17] Doymaz, İ (2007), Air-drying characteristics of tomatoes. *J Food Eng* 78(4): 1291-1297.

Investigation of energy consumption and drying kinetics of thyme leaves in microwave dryer

Khafajeh, H. ¹, Banakar, A. ^{1*}, Minaei, S. ¹, Taghizadeh, A. ², Motavali, A. ¹,
Rezaei Aderyani, M. ³

1. Department of Agriculture Machinery Engineering, Tarbiat Modares University

2. Department of Agricultural Machinery Mechanics, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran

3. Department of Horticulture, Agriculture Faculty, Tarbiat Modares University

(Received: 91/2/23 Accepted: 91/10/25)

In this study the effect of microwave power on drying behavior, effective moisture diffusion, the best mathematical model of drying, activation energy values and energy consumption of the herb thyme was investigated. Results of regression analysis of mathematical models in MATLAB software points that the Midili model has the best described to the data. Effective diffusion coefficient of herb thyme was found to be between 15.416×10^{-9} and $213.802 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Also the activation energy was determined to be 84.86 W/g for constant drying rate and 100 W/g for effective moisture diffusion. In addition, the minimum and maximum value of specific energy consumption drying of herb thyme was 6.994 to 19.607 kW/kg, respectively.

Keywords: Drying kinetics, Thyme, Activation energy, Effective moisture diffusion, Microwave

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