

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

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 مایکروویو 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 مایکروویو بین $15/416 \times 10^{-9}$ تا $213/802 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. همچنین میزان انرژی فعال سازی در خشک کن مایکروویو 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، مایکروویو

* 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 می‌باشد.

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 بیماری‌ها با گیاهان دارویی مانند جذام، سالک و ... به سمت گیاهان دارویی سوق پیدا کرده اند [۱].

خشک کردن یکی از مهم‌ترین عملیات فرآوری پس از برداشت است که محصولات فاسد شونده و با طول عمر کم مانند گیاه دارویی آویشن را به فرآورده‌های مقاوم با مدت ماندگاری بالا تبدیل می‌کند. در طی خشک کردن آب از گیاه آویشن خارج شده و در نتیجه امکان رشد میکروارگانیسم‌ها و ایجاد واکنش‌های شیمیایی نامطلوب به حداقل رسیده و ماندگاری مواد غذایی افزایش می‌یابد [۲].

میوه‌ها، سبزیجات و غلات مانند انگور، لعل، زردآلو و ذرت که معمولاً با قرار گرفتن در معرض آفتاب خشک می‌شوند دارای آلودگی‌های مختلف موجود در خاک و محیط اطراف می‌باشند [۳]. مشکلات استفاده از انرژی خورشید در خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی سبب شد تا خشک‌کن‌های صنعتی جایگزین روش‌های سنتی خشک کردن گردند. در مقابل استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی باعث مصرف انرژی زیادی در صنعت خشک کردن می‌گردند و خشک کردن محصولات کشاورزی را یک عملیات با مصرف انرژی زیاد ولی با اهمیت زیاد صنعتی مطرح می‌سازد [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 خشک‌کن مایکروویو انرژی الکترومغناطیسی مستقیماً به انرژی جنبشی مولکول‌های آب تبدیل می‌شود. بنابراین، حرارت در داخل

محصول تولید می‌شود و انتقال انرژی بوسیله موانع انتقال بویژه در مواد ویسکوز تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. نظر به اینکه امواج مایکروویو قادر به نفوذ به داخل ماده بوده و بدین ترتیب انرژی را ذخیره می‌کند لذا در این روش حرارت می‌تواند در سراسر حجم ماده تولید شود و ماده سریع‌تر خشک می‌شود [۵].

مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از مایکروویو مانند خشک کردن دانه‌ها [۶-۷]، خشک کردن سبزیجات [۸-۱۰]، خشک کردن اسفناج [۳]، خشک کردن نعنا [۱۱]، خشک کردن میوه‌جات [۱۲-۱۳]، خشک کردن کیوی [۱۴] و خشک کردن ورقه‌های 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 می‌یابد. 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 می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

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 4°C + نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$ به میزان $1/76$ 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] | $MR = 1 + a.t + bt^2$ |
| ۵ | مدل هندرسون و پاپیس [۲۲] | $MR = a \cdot \exp(-kt)$ |
| ۶ | مدل لگاریتمی [۲۳] | $MR = a \cdot \exp(-kt) + c$ |
| ۷ | مدل تقریبی انتشار [۲۴] | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$ |
| ۸ | مدل اصلاح شده پیچ [۲۵] | $MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$ |
| ۹ | مدل میدیلی و همکاران [۲۶] | $MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b.t$ |

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

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

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

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

$MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی \hat{a}_i ، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده \hat{a}_i ، n تعداد مشاهدات، z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند 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].

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

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

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

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 نمونه‌ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه تر به ۱۵٪ برسد ادامه می‌یابد. 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) می‌باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_t بسیار کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن صرفه نظر کرد و معادله به صورت زیر ساده می‌شود [۱۷].

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

مدل‌هایی که برای برازش داده‌های 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 $(D_0$ و $K_0)$ را بدست آورد [۱۱].

۲-۵- انرژی مصرفی میکروویو

انرژی مصرفی در خشک‌کن‌های میکروویو با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$t \times E_t = P$$

که در آن E_t کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن $(kW.h)$ ، P توان خروجی از میکروویو (kW) و t مدت زمان خشک‌شدن (ساعت) می‌باشد [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 می‌شود [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- نتیجه‌گیری و بحث

۳-۱- بررسی سنتیک خشک شدن

شکل (۱) تغییرات نسبت رطوبت خشک شدن آویشن در توان‌های مختلف میکروویو نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود زمان خشک شدن نسبت به توان میکروویو متفاوت می‌باشد. افزایش توان خروجی میکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد، زیرا این‌گونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از میکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای میکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت آویشن می‌شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر

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

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

با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه و رسم نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان از شیب نمودار می‌توان 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 میکروویو 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 می‌توان از ارتباط بین آهنگ ثابت سینتیک خشک شدن (K) و نسبت توان خروجی میکروویو به وزن نمونه (m/p) به جای دمای هوا استفاده کرد. در این حالت پس از ارزیابی داده‌ها، با به کار بردن رابطه بالا و رسم مقادیر نرخ ثابت خشک‌شدن (K) در مقابل وزن نمونه به توان میکروویو (m/p) در نرم‌افزار MATLAB می‌توان مقدار انرژی فعال سازی را بدست آورد [۱۱].

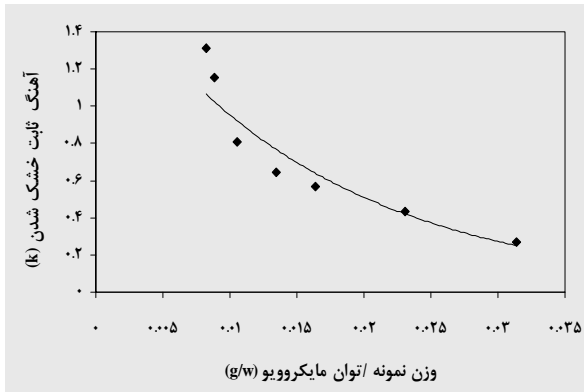
$$K = K_0 \exp\left(\frac{-E_a \cdot m}{p}\right)$$

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

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

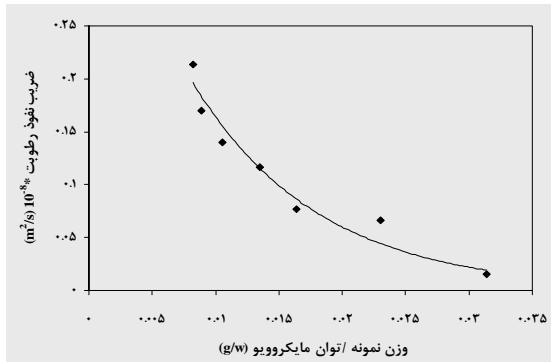
$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right)$$

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.



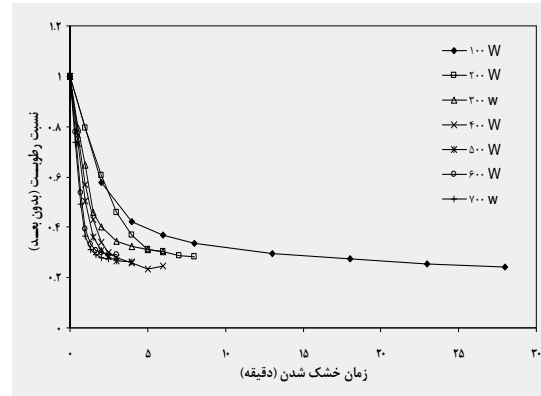
شکل ۲ ارتباط بین ضریب K و وزن نمونه/توان خروجی مایکروویو برای آویشن

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 $15/416 \times 10^{-9} m^2/s$ 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 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، $۸/۲ \times 10^{-۶}$ تا $۱/۳ \times 10^{-۴}$ 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 | ۰/۱۶۱۵ | ۰/۰۲۶۱ | ۰/۵۵۲۴ | ۰/۰۵۷۰۹ | ۰/۰۰۲۳۶ | ۰/۹۵۱۲ | ۰/۰۱۱ | ۰/۸۳۳۷ | ۰/۱۰۵ | ۰/۰۷۲۹ | ۰/۰۵۳۱۳ | ۰/۹۲۴۲ |
| بیج | ۰/۰۲۸۹۵ | ۰/۰۰۰۸۳۸ | ۰/۹۸۷۴ | ۰/۰۴۳۷۲ | ۰/۰۰۱۸۲۵ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۰۰۳۵۳ | ۰/۹۵۰۶ | ۰/۰۵۹۴۲ | ۰/۰۴۶۵۵ | ۰/۰۰۲۱۶۷ | ۰/۹۷۳ |
| بیج اصلاح شده | ۰/۰۲۸۹۵ | ۰/۰۰۰۸۳۸ | ۰/۹۸۷۴ | ۰/۰۴۳۷۲ | ۰/۰۰۱۸۲۵ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۰۰۳۵۳ | ۰/۹۵۰۶ | ۰/۰۵۹۴۲ | ۰/۰۴۶۵۵ | ۰/۰۰۲۱۶۷ | ۰/۹۷۳ |
| وانگ و سینگ | ۰/۱۶۷۲ | ۰/۰۲۷۹ | ۰/۵۸۰۳ | ۰/۰۱۸۸ | $۳/۵۳ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۵ | ۰/۰۰۴۱۸ | ۰/۹۴۱۵ | ۰/۰۶۴۶۶ | ۰/۰۵۰۴۹ | ۰/۰۰۲۵۵ | ۰/۹۶۸۲ |
| هندرسون | ۰/۱۴۴۷ | ۰/۰۲ | ۰/۶۸۵۹ | ۰/۰۵۱۹ | ۰/۰۰۰۳۳۸ | ۰/۹۵۵۶ | ۰/۰۱ | ۰/۸۶۰۱ | ۰/۱ | ۰/۰۷۳۲۴ | ۰/۰۰۵۳۶۴ | ۰/۹۳۳۱ |
| لگاریتمی | ۰/۰۲۵۱۷ | $۶/۶۹ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۱۴ | ۰/۰۲۵۱۴ | $۶/۳۱ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۲۹ | ۸۳×10^{-۴} | ۰/۹۹ | ۰/۰۲۸۱۱ | ۰/۰۱۸۴۲ | $۳/۳۹ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۶۴ |
| تقریب پخش شده | ۰/۰۴۵۵۸ | $۲/۰۷ \times 10^{-۵}$ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۱۶۳۳ | $۲/۶۶ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۷ | $۷/۳۷ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۱۳ | ۰/۰۲۶۹۸ | ۰/۰۱۸۴۲ | ۰/۰۰۷۰۸۶ | ۰/۹۲۴۲ |
| بیج اصلاح شده ۲ | ۰/۰۳۱۲۷ | $۹/۸۷ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۸۷۴ | ۰/۰۴۶۱۴ | ۰/۰۰۲۱۳ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۰۰۶۴۱ | ۰/۹۵۰۶ | ۰/۰۰۴۱۲ | ۰/۰۵۰۲۸ | ۰/۰۰۲۵۲۸ | ۰/۹۷۳ |
| میدیلی | ۰/۰۱۸۸۸ | ۰/۰۰۰۳۵۶۶ | ۰/۹۹۶۲ | ۰/۰۷۳۳۷ | $۵/۱۳ \times 10^{-۴}$ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۰۸۹۶ | ۰/۹۹۱ | ۰/۰۲۹۹۳ | ۰/۰۱۵۹۱ | ۰/۰۰۰۲۵۳۲ | ۰/۹۹۷۷ |

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

| ۷۰۰ وات | | | ۶۰۰ وات | | | ۵۰۰ وات | | | مدل |
|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|---------------------|
| RMSE | χ^2 | R^2 | RMSE | χ^2 | R^2 | RMSE | χ^2 | R^2 | |
| ۰/۰۷۹۴۲ | ۰/۰۰۶۳۰۷ | ۰/۹۱۱۱ | ۰/۰۹۲۳۲ | ۰/۰۰۸۵۲۲ | ۰/۸۷ | ۰/۰۷۷۶۶ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۹۱۷۳ | نیوتن |
| ۰/۰۵۳۵۱ | ۰/۰۰۲۸۶۳ | ۰/۹۶۵۴ | ۰/۰۶۳۵۹ | ۰/۰۰۳۱۹ | ۰/۹۴۷۷ | ۰/۰۵۳۳۶ | ۰/۰۰۲۸۴ | ۰/۹۶۶۵ | بیج |
| ۰/۰۵۳۵۱ | ۰/۰۰۲۸۶۳ | ۰/۹۶۵۴ | ۰/۰۶۳۵۹ | ۰/۰۰۳۱۹ | ۰/۹۴۷۷ | ۰/۰۵۳۳۶ | ۰/۰۰۲۸۴ | ۰/۹۶۶۵ | بیج اصلاح شده |
| ۰/۰۴۴۱۶ | ۰/۰۰۱۹۵ | ۰/۹۷۶۴ | ۰/۰۵۱۵۳ | ۰/۰۰۲۶۵۵ | ۰/۹۶۴۵ | ۰/۰۴۷۲۴ | ۰/۰۰۲۲۳ | ۰/۹۷۳۸ | وانگ و سینگ |
| ۰/۰۸۱۲۲ | ۰/۰۰۶۵۹۶ | ۰/۹۲۰۳ | ۰/۰۹۲۹۷ | ۰/۰۰۸۶۴۲ | ۰/۸۸۴۶ | ۰/۰۷۹۸۶ | ۰/۰۰۶۳۷۸ | ۰/۹۲۵ | هندرسون |
| ۰/۰۲۸۹۷ | ۰/۰۰۰۸۳۹۲ | ۰/۹۹۱۵ | ۰/۰۳۳۳۶ | ۰/۰۰۱۱۱۲ | ۰/۹۸۷۳ | ۰/۰۲۷۲۸ | ۰/۰۰۰۷۴۴۲ | ۰/۹۹۲۷ | لگاریتمی |
| ۰/۰۹۳۹۹ | ۰/۰۰۸۸۳۴ | ۰/۹۱۱ | ۰/۱۰۶۶ | ۰/۰۱۱۳۶ | ۰/۸۷ | ۰/۰۹۱۸۹ | ۰/۰۰۸۴۴۴ | ۰/۹۱۷۳ | تقریب پخش شده |
| ۰/۰۵۸۶۱ | ۰/۰۰۳۴۳۶ | ۰/۹۶۵۴ | ۰/۰۶۷۶ | ۰/۰۰۴۵۷ | ۰/۹۴۷۷ | ۰/۰۵۸۴۵ | ۰/۰۰۳۴۱۶ | ۰/۹۶۶۵ | مدل اصلاح شده بیج ۲ |
| ۰/۰۱۹۴ | ۰/۰۰۰۳۷۶۵ | ۰/۹۹۷ | ۰/۰۲۳۳۹ | ۰/۰۰۰۵۴۷۲ | ۰/۹۹۴۸ | ۰/۰۱۷۵۴ | ۰/۰۰۰۳۰۷۵ | ۰/۹۹۷۶ | میدیلی |

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

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

۲-۶- انرژی مصرفی مورد نیاز

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

جذب شده و با جذب انرژی زیاد مایکروویو 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

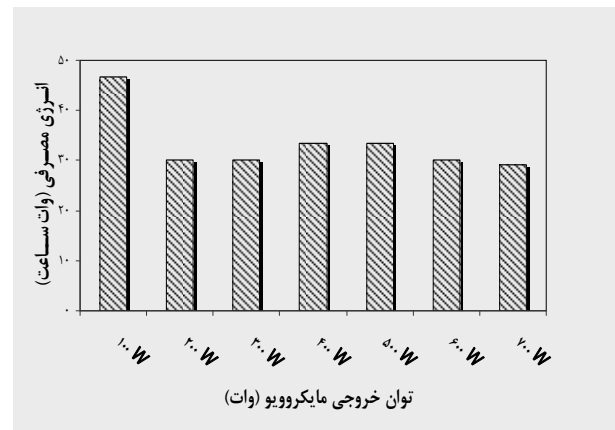
۳- نتیجه گیری

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} 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.

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 energyinput and initial moisture on physical properties of microwavevacuum 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 haracteristics of wheat (Triticum aestivum). J Food Eng 55: 271-276.

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.

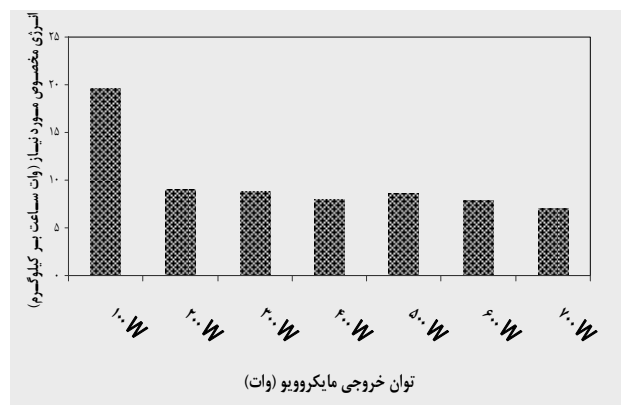


شکل ۴ انرژی مصرفی طی خشک کردن آویشن در مایکروویو

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 کاهش 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

- [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. Bascetinçelik, 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