

بررسی تغییرات آهنگ تبخیر، ضریب انتشار رطوبت موثر، انرژی فعال- سازی و انرژی مصرفی خشک کردن برش‌های نازک قارچ در خشک‌کن مایکروویو - خلا

سعید مینایی^{۱*}، علی متولی^۲، رسول همتیان^۳، سلیمان عباسی^۴،
عبدالرحمن قادری^۵، غلام‌حسن نجفی^۶

- ۱- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۴- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۵- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۶- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
(تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۲۸)

چکیده

در این پژوهش، رفتار خشک شدن و تاثیر شرایط مختلف خشک کردن (۴ سطح توان مایکروویو ۱۳۰، ۲۶۰، ۳۸۰ و ۴۵۰ وات و ۴ سطح فشار مطلق ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) توسط خشک‌کن مایکروویو-خلا بر تمایل به از دست دادن رطوبت، ضریب انتشار رطوبت موثر و مقادیر انرژی فعال سازی در لایه نازک قارچ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس یافته‌های این بررسی ضریب انتشار رطوبت موثر لایه نازک قارچ بین $2/1542 \times 10^{-7}$ تا $8/6535 \times 10^{-7}$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. انرژی فعال سازی با استفاده از یک رابطه نمایی بر مبنای رابطه آرینوس محاسبه شد. انرژی فعال سازی بدست آمده در خشک‌کن مایکروویو-خلا برای لایه نازک قارچ در سطوح مختلف توان و خلا در سه روش متفاوت بسیار به یکدیگر نزدیک بود. همچنین کمترین و بیشترین میزان انرژی مصرفی در خشک‌کردن لایه‌های قارچ به ترتیب ۰/۱۶۸ و ۰/۴۸ کیلووات ساعت بدست آمد.

کلید واژگان: قارچ، خشک کردن، خشک‌کن مایکروویو-خلا.

*مسئول مکاتبات: minae@modares.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه مصرف قارچ خوراکی دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) به عنوان یک منبع غذایی پر پروتئین و کم کالری و دارای اثرات درمانی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در طی سال‌های پیش تولید قارچ خوراکی رشد قابل توجهی در سطح جهان داشته است، برای مثال تولید این محصول از ۴۰۰۰ تن در سال ۱۹۸۶-۱۹۸۵ به چیزی بالغ بر ۳۰۰۰۰ تن در سال ۱۹۹۷-۱۹۹۶ رسیده است [۱]. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روشها برای حفظ محصولات کشاورزی و غذایی می باشد. در ضمن، خشک کردن مواد غذایی به خاطر کاهش حجم و وزن فرآورده قابلیت جابجایی آن را آسان تر می سازد [۲].

خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو می تواند جایگزین مناسبی برای خشک کن های هوای گرم محسوب شود. فرآیند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. در طیف امواج الکترومغناطیسی بسامدهای بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز مربوط به امواج مایکروویو است. برخلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می یابد. چرخش دو قطبی مکانیسم مهمی است که تولید گرما را در ماده‌ای که در میدان مایکروویو قرار می‌گیرد توضیح می‌دهد. مواد غذایی حاوی مولکول‌های قطبی مانند آب هستند. این مولکول‌ها عموماً دارای جهت گیری تصادفی می باشند اما هنگامی که میدان الکتریکی اعمال می‌شود مولکول‌ها خودشان را با قطبیت میدان هم جهت می‌کنند به عبارت دیگر در یک میدان مایکروویو، قطبیت با 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 [۳]. به عبارت دیگر، 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 [۴].

استفاده از خلا در خشک کن می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش کیفیت محصول خشک‌شده قلمداد شود. اعمال خلا یا کاهش فشار می‌تواند دمای خشک کردن را کاهش داده و در نتیجه سبب بهبود ویژگی‌های کیفی ماده غذایی گردد [۵، ۶].

خشک کردن به روش ترکیبی مایکروویو-خلا مزایای هر دو روش خشک کردن مایکروویو و خلا را دارد و می‌تواند نسبت انرژی مصرفی را کاهش و کیفیت خشک شدن محصول را افزایش دهد [۷]. به علت استفاده از خلا در خشک‌کن مایکروویو عملیات خشک کردن با سرعت بیشتری انجام می‌شود و مدت زمان خشک شدن و انرژی مصرفی به نسبت کاهش می‌یابد. خشک کردن به روش مایکروویو - خلا دارای پتانسیل بسیار خوبی برای بالا بردن کیفیت محصول است که تاکنون در خشک کردن میوه و سبزیجات و دانه‌ها توسط پژوهشگران مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۷-۱۰].

از جمله مشکلات استفاده از مایکروویو می‌توان به حرارت-دهی غیر یکنواخت، امکان تخریب بافت و محدودیت نفوذ امواج به داخل ماده غذایی اشاره کرد [۷]. در حالی که یکی از مزایای استفاده از انرژی مایکروویو، قابلیت ترکیب چند روش خشک کردن با هم است. مایکروویو می‌تواند با خشک کردن خلأی ترکیب شود [۱۱]. این روش ترکیبی، فواید هر دو روش خشک شدن تحت خلأ و خشک شدن با مایکروویو را در بر دارد و می‌تواند هم کارایی انرژی و هم کیفیت فرآورده را بهبود ببخشد [۱۲]. عدم وجود اکسیژن در محیط

قارچ درون ظروف ریخته شده و در داخل اجاق قرار داده شد. پس از اتمام زمان خشک شدن، نمونه‌ها از اجاق بیرون آورده شد و بلافاصله وزن آن اندازه‌گیری شد. رطوبت اولیه قارچ‌ها ۱۳/۲۹ بر پایه خشک به دست آمد.

۲-۲- طرح خشک کن مایکروویو-خلا

فرآیند خشک کردن برش‌های نازک قارچ در ۴ سطح توانی (۱۳۰، ۲۶۰، ۳۸۰ و ۴۵۰ وات) و ۴ سطح فشار مطلق (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) انجام شد. برای وزن کردن نمونه‌ها از ترازو (Tecator، مدل ۶۱۰، ساخت کشور فرانسه با دقت ۰/۰۰۰۱)، برای ایجاد خلا از پمپ (kawake airvac مدل jp-120h ساخت کشور تایوان) و برای عملیات خشک کردن از مایکروویو (AEG، مدل Micromat 725 آلمان) استفاده شد. همچنین برای تنظیمات میزان فشار اعمال شده در هنگام خشک شدن از خلاسنج (PVR 0606A81 ساخت کشور ایتالیا) استفاده شد [۱۳، ۱۴، ۱۵].

۲-۳- روش محاسبه آهنگ تبخیر

آهنگ تبخیر برای برش‌های نازک قارچ نیز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید [۱۶]:

$$DR = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{dt} \quad (1)$$

که در آن DR آهنگ تبخیر (گرم بر دقیقه)، MC_{t+dt} محتوای رطوبت در زمان $t+dt$ (گرم)، MC_t محتوای رطوبت در زمان t (گرم)، dt فاصله زمانی بین وزن کردن نمونه‌ها (دقیقه) است. از آنجایی که آهنگ تبخیر در لحظات اولیه با گذشت زمان به سرعت افزایش می‌یابد و به یک نقطه اوجی که بیشترین مقدار آهنگ تبخیر است می‌رسد و بعد از آن با گذشت زمان آهنگ تبخیر بطور مداوم کاهش می‌یابد. لذا این ویژگی آهنگ تبخیر را می‌توان توسط رابطه (۱) بیان کرد [۱۶].

قانون دوم فیک انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را با استفاده از معادله (۲) توصیف نمود [۱۷].

و کاهش واکنش‌های ناخواسته در غذا، مزیت دیگر این روش می‌باشد [۸].

بنابراین در پژوهش حاضر به دلیل نبود اطلاعات کافی و مستند در رابطه با تاثیر شرایط خشک کردن توسط خشک کن مایکروویو- خلا بر آهنگ از دست دادن رطوبت، ضریب انتشار رطوبت موثر، انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در طی خشک کردن لایه نازک قارچ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

قارچ دکمه‌ای با ضخامت ۳mm بصورت تازه و بسته بندی شده از بازار تهران تهیه شد و یک لایه از آن پس از آماده شدن خشک کن و تنظیم آن در توان و فشارهای مورد آزمایش در خشک کن قرار داده شد. برای هر آزمایش حدود ۳۰ گرم قارچ دکمه‌ای استفاده شد. در طی فرآیند خشک شدن، کاهش وزن ورقه‌ها توسط ترازو در فواصل زمانی ۳ دقیقه، اندازه‌گیری شد. خشک شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن ورقه‌های نازک قارچ ادامه داشت (تقریباً تا رطوبت ۶ تا ۷ درصد بر پایه تر). در طول آزمایش‌های خشک کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط 30 ± 3 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا 30 ± 5 درصد بود.

۲-۱- روش اندازه‌گیری رطوبت

به منظور اندازه‌گیری رطوبت قارچ از استاندارد AOAC (۱۹۸۰) استفاده شد. روش کار به این ترتیب بود که برای بدست آوردن درصد واقعی رطوبت محصول، ابتدا به طور تصادفی، ۵ نمونه ۵ گرمی از توده‌ی محصول مورد استفاده جدا شد و درون اجاق قرار داده شد. طبق استاندارد گفته شده، باید برای تعیین رطوبت قارچ، نمونه‌ها را به مدت ۳ تا ۴ ساعت در اجاق با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داد. برای انجام این کار ابتدا ظروف کوچکی به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اجاق در دمای مربوطه گذاشته شد و سپس ظروف توزین شد و پس از صفر کردن ترازو نمونه‌های ۵ گرمی

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 ضرایب K_0 و D_0 را بدست آورد.

۲-۵- روش محاسبه انرژی مصرف شده

توسط مایکروویو و پمپ خلا

انرژی مصرفی در مایکروویو برابر است با

$$t \times E_t = P \quad (5)$$

که در آن E_t کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن (kWh)، P توان خروجی مایکروویو (kW) و t مدت زمان خشک شدن (ساعت) می باشد [۱۹].

انرژی مصرفی در پمپ خلا را می توان از رابطه (۶) تعیین کرد.

$$t \times E_1 = L \quad (6)$$

E_1 توان مصرفی توسط پمپ (kWh)، L توان اسمی پمپ (kW) و t مدت زمان خشک شدن (h) می باشد.

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_a T}\right) \quad (7)$$

خشک کن مایکروویو - خلا

میزان انرژی مصرفی در خشک کن های ترکیبی مایکروویو- تحت خلا از مجموع دو رابطه (۵ و ۶) که شامل انرژی مصرفی توسط پمپ خلا و مایکروویو می باشد بدست می آید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آهنگ تبخیر

معمولا در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد است و در نتیجه آهنگ از دست دادن رطوبت نیز زیاد است، ولی بتدریج با پیشرفت زمان، میزان رطوبت محصول به

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

که در آن MR نسبت رطوبت (بی بعد)، t زمان خشک شدن، D_{eff} ضریب انتشار رطوبت موثر، a ضخامت لایه های قارچ است.

۲-۴- روش محاسبه انرژی فعال سازی

از آنجایی که دما در خشک کن مایکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نیست، برای به دست آوردن انرژی فعال سازی باید از شکل اصلاح شده رابطه آرنوس استفاده کرد. در روش اول می توان از ارتباط بین آهنگ ثابت سینتییک 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 (۳) 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.

که در آن (K) آهنگ ثابت خشک شدن (min^{-1}) که از رابطه میدلی 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 انتشار رطوبت موثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه (رابطه ۴) بر اساس مدل آرنوس می تواند بدست آید [۱۸].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right) \quad (4)$$

دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ موثر در شرایط مختلف خشک کردن مربوط به دماهای مختلف اعمال شده باشد زیرا دما وابسته به شدت توان مایکروویو و فشار مطلق بوده در نتیجه در نسبت‌های مختلف ترکیب این دو عامل (توان مایکروویو و فشار مطلق) ضرایب پخش موثر رطوبتی متفاوتی بدست آمد. در ضمن، همان‌گونه که دیده می‌شود در شرایط ثابت توان مایکروویو با افزایش فشار مطلق میزان ضریب پخش موثر کاهش و در فشار مطلق ثابت با افزایش توان مایکروویو میزان این ضریب افزایش می‌یابد به همین دلیل بیشترین میزان این ضریب مربوط به فشار مطلق ۲۰۰ میلی بار و توان ۴۵۰ وات و کمترین مقدار مربوط به توان ۱۳۰ وات و فشار مطلق ۸۰۰ میلی بار می‌باشد. مقادیر مختلف میزان ضریب پخش موثر در جدول ۱ آمده است. نتایج بدست آمده مشابه نتایج بدست آمده از تحقیقات سایر پژوهشگران است [۲۲، ۲۶].

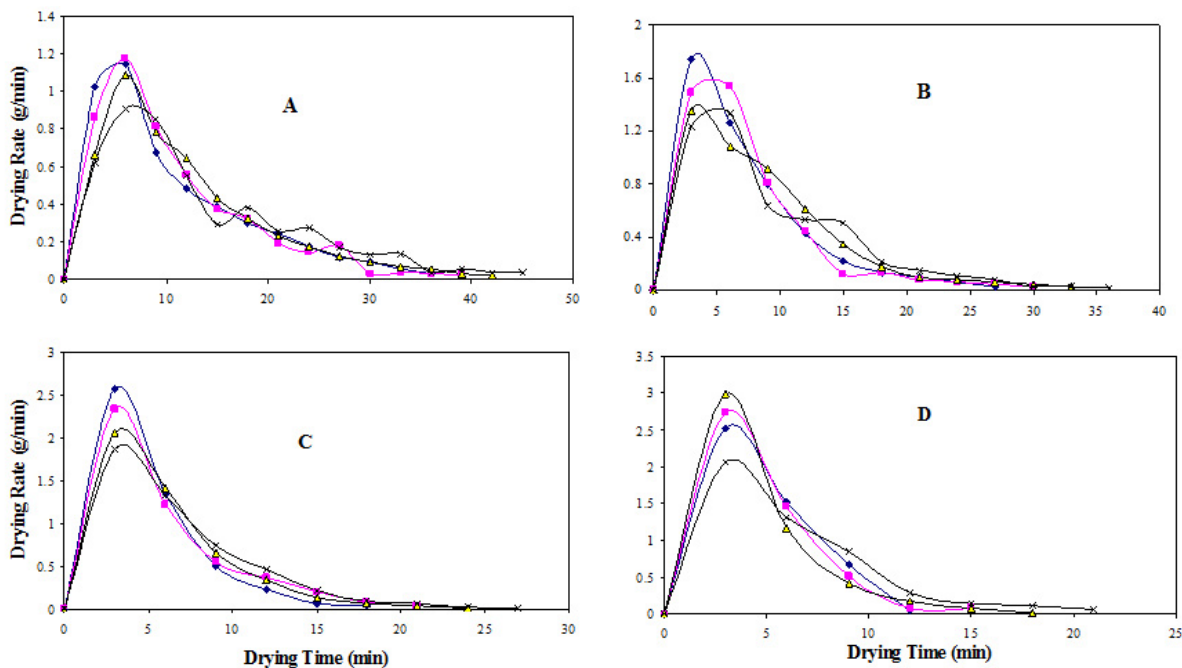
در شکل ۳ نیز با استفاده از تحلیل رگرسیونی چند متغیره، ارتباط همزمان ضریب پخش موثر، توان مایکروویو و میزان خلا نمایش داده شده است. رابطه ۷ یک رابطه رگرسیونی با $R^2=0.95$ بین ضریب نفوذ موثر، توان مایکروویو و میزان خلا را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه ۷ ضریب انتشار رطوبت موثر را می‌توان بر حسب دو متغیر مستقل محاسبه نمود به طوری که با داشتن مقادیر مختلف فشار مطلق هوا و توان مایکروویو (به غیر از توان و فشارهای هوا که آزمایشات در آنها انجام شده) ضریب انتشار رطوبت موثر را با به کار بردن رابطه ۷ محاسبه نمود. با استفاده از چنین معادلاتی لزوم انجام آزمایشات در سطوح مختلف توان و فشار هوا بسیار کم می‌شود.

طور طبیعی کاهش پیدا کرده و آهنگ تبخیر نیز کاهش می‌یابد. به عبارتی گرچه محصول عمده رطوبت خود را در لحظات اولیه مرحله خشک کردن از دست می‌دهد ولی هنوز زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقیمانده لازم دارد. در همین راستا، یافته‌های بررسی حاضر نیز نشان می‌دهند (شکل ۱) که آهنگ تبخیر در لحظات اولیه با گذشت زمان به سرعت افزایش می‌یابد و به یک نقطه اوجی که بیشترین مقدار آهنگ تبخیر است می‌رسد و پس از آن با گذشت زمان، آهنگ تبخیر بطور مداوم کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود توان مایکروویو تاثیر مهمی روی آهنگ تبخیر دارد به طوری که با افزایش توان مایکروویو آهنگ تبخیر نیز افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش میزان فشار مطلق هوا، دمای نقطه جوش آب کاهش یافته و گرمای بخار آب نیز با کاهش فشار هوا کاهش می‌یابد در نتیجه کاهش فشار هوا نیز آهنگ تبخیر را افزایش می‌دهد. نتایج بدست آمده مشابه نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران است [۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴].

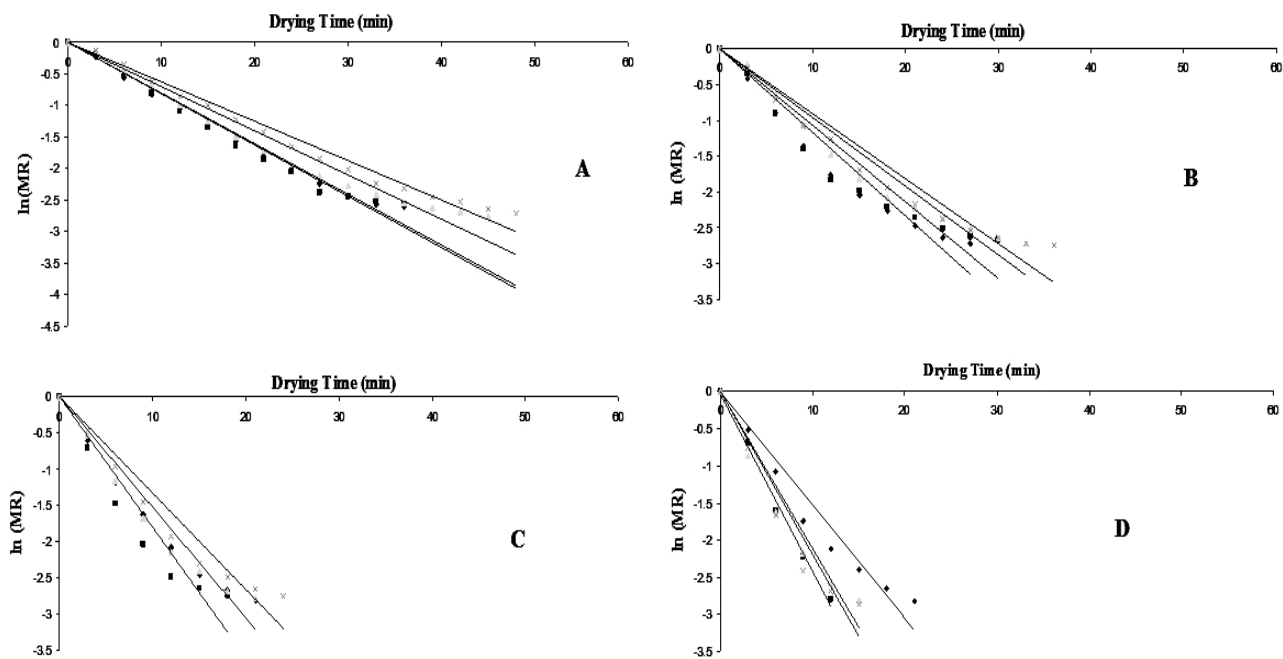
۳-۲- ضریب انتشار رطوبت موثر

شکل ۲، تغییرات $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک شدن را در شرایط مختلف توان و فشار مطلق برای خشک کردن لایه نازک قارچ نشان می‌دهد. با افزایش توان مایکروویو و کاهش میزان فشار مطلق، آهنگ تبخیر افزایش یافته و به تبع آن میزان ضریب نفوذ نیز افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین مقدار الف ضریب انتشار رطوبت موثر برای قارچ به میزان $10^{-7} \times 8/6535$ در بالاترین توان مایکروویو و پایین‌ترین فشار مطلق و کمترین مقدار ضریب انتشار رطوبت موثر به میزان $10^{-7} \times 2/1542$ متر مربع بر ثانیه در پایین‌ترین توان مایکروویو و بالاترین فشار مطلق می‌باشد.

با توجه به اینکه ضریب انتشار رطوبت موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد [۲۵] و نظر به اینکه در پژوهش حاضر ضخامت لایه‌های قارچ در آزمایش‌ها ثابت بود لذا احتمالا



شکل ۱ تاثیر سطوح مختلف فشار مطلق (◆ ۲۰۰، ■ ۴۰۰، ▲ ۶۰۰ و × ۸۰۰ میلی بار) و توان‌های مختلف مایکروویو (A ۱۳۰ (B ۲۶۰ (C ۳۸۰ (D ۴۵۰ وات روی آهنگ تبخیر برش‌های قارچ در خشک‌کن مایکروویو- خلا



شکل ۲ تاثیر فشارهای مطلق (◆ ۲۰۰، ■ ۴۰۰، ▲ ۶۰۰ و × ۸۰۰ میلی بار) روی تغییرات $\ln(MR)$ طی زمان خشک‌شدن قارچ در خشک‌کن مایکروویو- خلا در توان‌های مختلف مایکروویو (A ۱۳۰ (B ۲۶۰ (C ۳۸۰ (D ۴۵۰ وات

جدول ۱ مقادیر ضریب انتشار رطوبت موثر و ضریب تعیین مدل خطی در صورت اعمال توان‌ها و خلاهای مختلف در خشک کن مایکروویو - خلا هنگام خشک شدن قارچ

توان مایکروویو		۱۳۰ وات		۲۶۰ وات		۳۸۰ وات		۴۵۰ وات	
متغیرها		متغیرها		متغیرها		متغیرها		متغیرها	
فشار مطلق (میلی بار)		فشار مطلق (میلی بار)		فشار مطلق (میلی بار)		فشار مطلق (میلی بار)		فشار مطلق (میلی بار)	
$D_{eff} \times 10^{-7}$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-7}$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-7}$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-7}$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-7}$	R^2
۲/۷۷۴۹۶	۰/۹۸۷	۳/۷۲۴۲۹	۰/۹۵۳	۵/۶۹۵۹۷	۰/۹۶۴	۷/۲۲۹۵	۰/۹۹۳	۸/۶۵۳۵	۰/۹۶۰
۲/۵۱۹۳۷	۰/۹۷۵	۳/۲۴۹۶۲	۰/۹۱۴	۵/۰۰۲۲۳	۰/۹۲۴	۷/۲۲۹۵	۰/۹۹۳	۸/۶۵۳۵	۰/۹۶۰
۲/۳۳۶۸۱	۰/۹۶۷	۳/۱۴۰۰۹	۰/۹۴۵	۴/۹۲۹۲۱	۰/۹۵۶	۶/۸۲۷۸۶	۰/۹۵۶	۸/۶۵۳۵	۰/۹۶۰
۲/۱۵۴۲۵	۰/۹۸۳	۲/۸۸۴۵	۰/۹۵۱	۴/۳۴۵	۰/۹۵۲	۵/۰۳۸۷۴	۰/۹۴	۸/۶۵۳۵	۰/۹۶۰

جدول ۲ مقادیر انرژی فعال سازی و ضریب همبستگی در خلاهای مختلف (با استفاده از آهنگ ثابت خشک شدن) در خشک کن مایکروویو - خلا هنگام خشک شدن قارچ

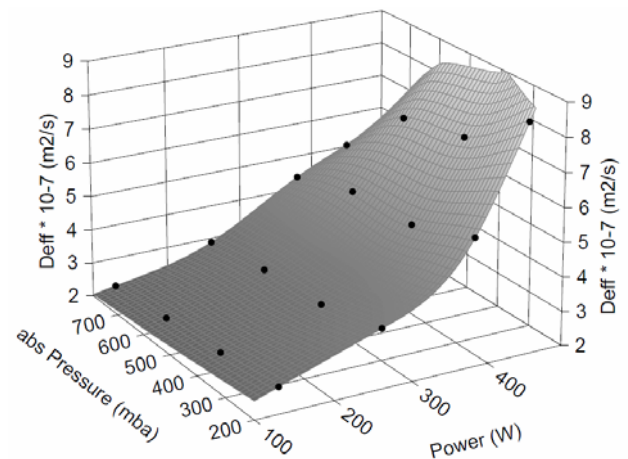
میزان فشار مطلق (میلی بار)		میزان فشار مطلق (میلی بار)		میزان فشار مطلق (میلی بار)		میزان فشار مطلق (میلی بار)	
متغیر		متغیر		متغیر		متغیر	
۲۰۰		۴۰۰		۶۰۰		۸۰۰	
R^2	۰/۸۴۲۱	۰/۸۹۲۱	۰/۷۹۲۶	۰/۹۱۲۵	E_a	۱۲/۰۲	۶/۸۳
E_a	۱۲/۰۲	۱۰/۹۶	۹/۵۳	۶/۸۳	K_0	۵/۱۱	۵/۶۸
K_0	۵/۱۱	۴/۲۸	۶/۱۹	۵/۶۸			

که در رابطه بالا P توان مایکروویو و P_{abs} میزان فشار اعمال شده می‌باشد.

$$D_{eff} = 4.41 + 0.012P + 0.017P_{abs} - 5.33 \times 10^{-5}P^2 + 3.34 \times 10^{-5}P_{abs}^2 + 1.13 \times 10^{-7}P^3 - 2.16 \times 10^{-7}P_{abs}^3 \quad R^2 = 0.95 \quad (7)$$

۳-۳- انرژی فعال سازی

با استفاده از روش اول و با رسم نمودار (K) در مقابل (m/p) در محیط نرم‌افزار MATLAB، انرژی فعال سازی و (K_0) از رابطه (۳) بدست آمد. با استفاده از آنالیز آماری و با رسم نمودار آهنگ ثابت خشک شدن در برابر وزن نمونه/ توان مایکروویو و با بکارگیری مدل دادالی و همکاران در محیط نرم‌افزار MATLAB مقدار انرژی فعال سازی برای لایه‌های قارچ بین ۶/۸۳ تا ۱۲/۰۲ وات بر گرم بدست آمد.



شکل ۳ تاثیر متقابل توان مایکروویو و فشار مطلق بر ضریب انتشار رطوبت موثر هنگام خشک کردن لایه های قارچ با استفاده از خشک کن مایکروویو - خلا

جدول ۳ مقادیر انرژی فعال سازی و ضریب همبستگی در خلاهای مختلف (با استفاده از ضریب نفوذ موثر) در خشک کن مایکروویو - خلا هنگام خشک شدن قارچ

متغیر	میزان فشار مطلق (میلی بار)	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰
R^2		۰/۷۶۸۲	۰/۷۶۷۶	۰/۸۰۶۴	۰/۸۶۸۱
E_a		۱۳/۷۸	۱۰/۹۶	۸/۱۶۸	۷/۰۱
D_{eff}		۹/۲۶۵	۱۰/۷۶	۸/۳۰۸	۵/۹۳۶

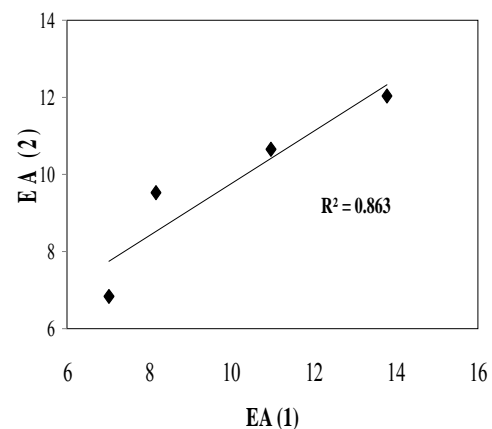
۳-۴- انرژی مصرفی در خشک کن

مایکروویو - تحت خلا

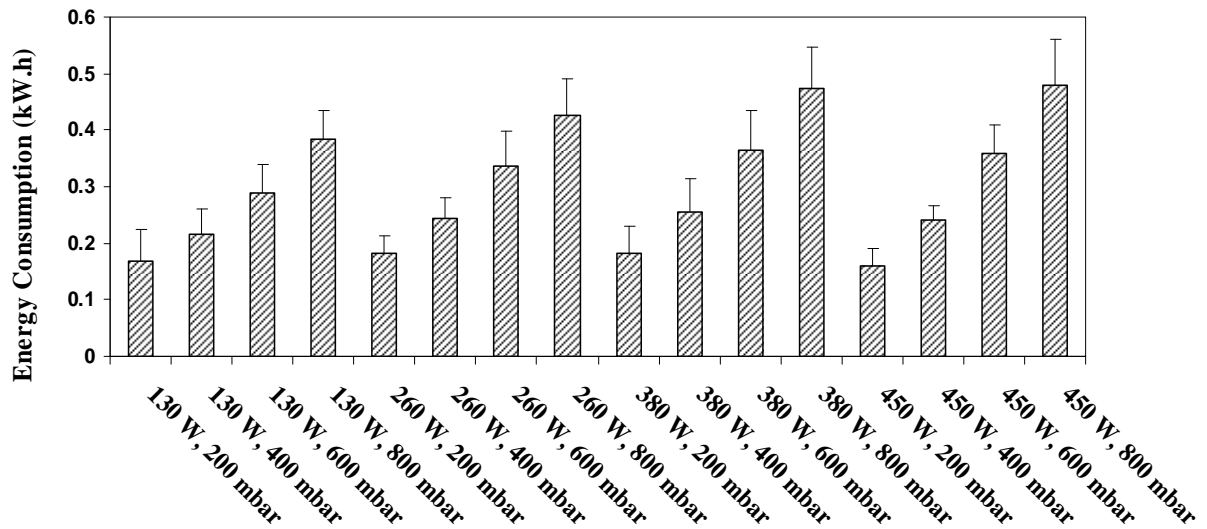
با توجه به شکل ۵ با افزایش توان مایکروویو و افزایش فشار مطلق هوا میزان انرژی مصرفی افزایش می یابد به طوری که کمترین میزان انرژی مصرفی در توان ۱۳۰ وات و فشار مطلق ۲۰۰ میلی بار به میزان ۰/۱۷ کیلو وات ساعت و بیشترین میزان انرژی مصرفی در توان ۴۵۰ وات و فشار مطلق ۸۰۰ میلی بار به میزان ۰/۴۸ کیلو وات مشاهده شد. نتایج حاصل از آنالیز داده ها نشان داد که با افزایش توان مایکروویو و همچنین کاهش فشار مطلق هوا زمان خشک شدن محصول کاهش می یابد. با کاهش فشار مطلق هوا ماده غذایی حالت پفکی پیدا کرده و رطوبت راحت تر از محصول خارج می شود همچنین با افزایش خروجی مایکروویو گرادیان حرارتی داخل جسم افزایش یافته و به دنبال آن آهنگ تبخیر افزایش و زمان خشک شدن کاهش یافته و به دنبال آن مدت زمان کارکرد مایکروویو و پمپ خلا کاهش می یابد. از آنجا که میزان انرژی مصرفی تابع زمان کارکرد پمپ خلا و مایکروویو می باشد، با کاهش این زمان میزان انرژی مصرفی نیز کاهش می یابد.

در روش دوم برای بدست آوردن انرژی فعال سازی مقادیر ضریب انتشار رطوبت موثر و توان های مختلف مایکروویو (جدول ۱) را در مقابل (وزن نمونه/ توان مایکروویو) در محیط نرم افزار MATLAB رسم کرده و با استفاده از برازش مدل دادالی و همکاران بر داده های رسم شده می توان مقدار انرژی فعال سازی را بدست آورد. مقدار انرژی فعال سازی در روش دوم برای لایه های قارچ بین ۷/۰۱ تا ۱۳/۷۸ وات بر گرم بدست آمد (جدول ۳).

برای مقایسه نزدیکی مقادیر انرژی فعال سازی به دست آمده از دو روش، مقادیر انرژی فعال سازی به دست آمده از روش اول و دوم در مقابل هم رسم شد (شکل ۴). با توجه به شکل مقابل، هر چه ضریب همبستگی بین انرژی های فعال سازی بدست آمده از روش اول و دوم در مقابل هم رسم شد (شکل ۴). با توجه به شکل مقابل، هر چه ضریب همبستگی بین انرژی های فعال سازی بدست آمده از روش اول و دوم در مقابل هم رسم شد (شکل ۴). با توجه به شکل مقابل، هر چه ضریب همبستگی بین انرژی های فعال سازی بدست آمده از روش اول و دوم در مقابل هم رسم شد (شکل ۴). با توجه به شکل مقابل، هر چه ضریب همبستگی بین انرژی های فعال سازی بدست آمده از روش اول و دوم در مقابل هم رسم شد (شکل ۴).



شکل ۴ ارتباط بین مقادیر انرژی فعال سازی در روش اول و دوم برای لایه های قارچ در خشک کن مایکروویو - خلا



شکل ۵ تاثیر توان خروجی مایکروویو و فشار مطلق هوا بر میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن برش‌های نازک قارچ در خشک‌کن مایکروویو - خلا

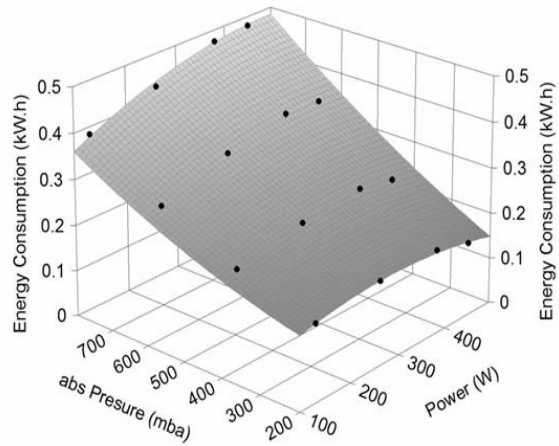
در رابطه بالا P توان مایکروویو، Pabs فشار مطلق هوا

$$E = 0.11 + 0.00029P + 3.55 \times 10^{-5} P_{abs} - 7.23 \times 10^{-7} P^2 + 2.42 \times 10^{-7} P_{abs}^2 + 5.68 \times 10^{-7} P \times P_{abs} \quad R^2 = 0.99 \quad (8)$$

با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره رابطه‌ای بین انرژی مصرفی، توان مایکروویو و فشار مطلق هوا در خشک‌کن مایکروویو-خلا برقرار شده است (شکل ۶). معادلات مربوطه و ضریب تعیین R^2 مربوط به شکل در رابطه ۸ آمده است.

۴- نتیجه‌گیری

رفتار خشک شدن قارچ خوراکی به صورت لایه نازک در خشک‌کن مایکروویو - خلا در توان‌ها و در خلاهای مختلف بررسی شد و ملاحظه گردید که خشک شدن قارچ خوراکی در مرحله نزولی رخ می‌دهد. آهنگ تبخیر در لحظات اولیه با گذشت زمان به سرعت افزایش یافت و به نقطه اوجی که بیشترین مقدار است رسید. بالاترین آهنگ تبخیر در توان حداکثر و بیشترین میزان خلا ایجاد شده روی داد و بعد از آن با گذشت زمان، آهنگ تبخیر بطور مداوم کاهش یافت. ضریب انتشار رطوبت موثر در خشک کردن لایه نازک قارچ با خشک‌کن مایکروویو- خلا با افزایش توان مایکروویو و افزایش میزان خلا افزایش یافت. انرژی فعال سازی در خشک‌کردن مایکروویو- خلا با ۲ روش محاسبه شد که مقادیر بدست آمده از دو روش بسیار به یکدیگر نزدیک بودند. میزان انرژی مصرفی با افزایش فشار مطلق هوا و توان خروجی مایکروویو افزایش یافت.



شکل ۶ تاثیر متقابل توان مایکروویو و فشار مطلق بر ضریب انرژی مصرفی هنگام خشک‌کردن برش‌های نازک قارچ با استفاده از خشک‌کن مایکروویو - خلا

۵- منابع

- [11] Schubert, H., and Regier, M. (2005). The microwave processing of foods. 1st ed Woodhead Publishing Limited, pp. 1–110.
- [12] Li, Y., Xu, S.Y. and Sun, D.W. (2007) Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. *Journal of Food Engineering*, 83:76–83.
- [13] Abbasi, S., and Azari, S. (2009). Novel microwave–freeze drying of onion slices. *International Journal of Food Science & Technology*, 44: 974–979.
- [14] Ghaderi, A., Abbasi, S., Motevali, A., & Minaei, S. (2011). Select a Mathematical Model for Drying of Sour Cherry (*Prunus cerasus* L.) in Microwave-Vacuum Dryer, *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, In press. (Persian)
- [15] Motevali, A., Minaei, S., Abbasi, S., & Ghaderi, A. (2011). Investigation variation of drying rate, effective diffusion coefficient, activation energy for microwave-vacuum drying of cherry, *Iranian Journal of Biosystems*, In press. (Persian)
- [16] Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground Vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc.
- [17] Crank, J. (2001) *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press.
- [18] Dadali, G., Apar, D. K. & Ozbek, B. (2007a). Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*.
- [19] Ozkan. A., Akbudak. B., Akbudak. N., (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78: 577–583.
- [20] Funebo, T., & Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38: 353–367.
- [1] Walde, S. G., V. Velu, T. Jyothirmayi and R. G. Math. (2006). Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom. *Journal of Food Engineering*. 74: 108-115.
- [2] Koyuncu, T., Pinar, Y. & Lule, F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 78: 1471–1475.
- [3] Schiffman, R.F. (1992), *Microwave processing in the U.S. food industry*. *Food Technology*, 58–52: 56.
- [4] Krulis *et al.*, 2006
- [5] Jaya, S. & Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21: 1215–1234.
- [6] Kompany, E., Benchimol, J., Allaf, K., Ainseba, B. & Bouvier, J. M. (1993). Carrot dehydration for instant rehydration: dehydration kinetics and modeling. *Drying Technology*, 11:451–470.
- [7] Zheng-Wei, C., Shi-Ying, X. & Da-Wen, S. (2004). Effect of microwave–vacuum drying on the carrot enoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology*, 22: 561–574.
- [8] Drouzas, A. E. & Schubert, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28: 203–209.
- [9] Wadsworth, J. I., Velupillai, L. & Verma, L. R. (1990). Microwave–vacuum drying of parboiled rice. *Transactions of the ASAE*, 33:199–210.
- [10] Kaensup, W., Chutima, S. & Wongwises, S. (2002). Experimental study on drying of chilli in a combined microwave–vacuum–rotary drum dryer. *Drying Technology*, 20: 2067–2079.

- [24] Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44: 71–78.
- [25] Rizvi, S. S. H. (1996). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A.
- [26] Shin Kim, S. & Bhowmik, R.S. (1995). Effective moisture diffusivity of plain yoghurt undergoing microwave vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 24: 137–148.
- [21] Giese, J. (1992). Advances in microwave food processing. *Food Technology*, 46: 118–122.
- [22] Sharma, G.P. & Prasad, S. (2004) Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave- convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65: 609–617.
- [23] Soysal, Y. (2004). Microwave drying characteristics of parsley. *Biosystems Engineering*, 89:167–173.

Investigation of the variation of drying rate, effective diffusion coefficient, activation energy, and energy consumption for mushroom slices using microwave–vacuum drier

Minaei, S. ^{1*}, Motevali, A. ², Hematian, R. ³, Abbasi, S. ⁴, Ghaderi, A. ⁵, Najafi, G. ⁶

1. Agricultural Machinery Engineering Dept., Tarbiat Modares University
2. Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University
3. Food Science and Technology, Tarbiat Modares University
4. Department of Food Science and Technology, Tarbiat Modares University
5. Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University
6. Agricultural Machinery Engineering Dept., Tarbiat Modares University

(Received: 89/8/12 Accepted: 90/9/28)

In this study, the impact of different drying conditions (4 levels of microwave power 130, 260, 380 and 450 watts and 4 absolute pressure levels 200, 400, 600 and 800 mbar) on drying rate, effective diffusion coefficient, activation energy, and energy consumption of a microwave–vacuum drier for drying the mushroom slices were analyzed. According to the findings, effective diffusion coefficient for mushroom varied between 3.21×10^{-9} to 20.005×10^{-9} m²/s. In addition, the activation energy based on an Arrhenius based exponential equation was very close to each other for three different methods. In terms of energy consumption, the minimum and maximum quantities were about 0.168 and 0.48 kWh, respectively.

Keywords: Mushroom, Drying, Microwave–vacuum drier

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