ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی مغز فندق در خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو

مریم احمدی قویدلان[1*] و رضا امیری چایجان[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
maryam.ahmadi18@yahoo.com
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

چکیده:

خشک کردن یکی از فرآیندهای مهم برای محافظت محصولات کشاورزی در مرحله پس از برداشت است. همچنین یکی از فرآیندهای با مصرف انرژی زیاد به شمار می‌رود. از این رو در پژوهش حاضر، تأثیر دمای هوا در سه سطح (۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، توان مادون قرمز در سه سطح (۵۰۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ وات) و توان میکروویو در سه سطح (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات) بر روی مقدار ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعالسازی فندق در طی فرآیند خشک کردن مورد مطالعه قرار گرفت. سرعت هوای خشک کردن ثابت در نظر گرفته شد (۲/۵۶ متر بر ثانیه). آزمایش‌ها با استفاده از یک خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو انجام شد. از قانون دوم فیک برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما و توان مادون قرمز افزایش یافت. مقدار آن بین $۷/۸۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ و $۸/۲۲ \times ۱۰^{-۹}$ مترمربع بر ثانیه بدست آمد. همچنین تأثیر توان میکروویو بر میزان ضریب نفوذ مؤثر دانه‌های فندق مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش توان میکروویو مقدار انتشار رطوبت افزایش یافت. رابطه بین ضریب نفوذ مؤثر با دما توسط رابطه آرنیوس شرح داده شد. حداکثر و حداقل مقدار انرژی فعال‌سازی برای دانه‌های فندق در طول فرآیند خشک‌کردن بین ۴۱/۳۳ و ۲۰/۸۱ کیلوژول بر مول تعیین شد.

کلید واژه: انرژی فعالسازی، خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو، ضریب نفوذ مؤثر، فندق

مقدمه

فرآیند خشک‌کردن به عنوان یکی از مهمترین فرآیندها در تهیه مواد غذایی از محصولات کشاورزی می‌باشد. عمده‌ترین مشکل محصول تازه، ذخیره‌سازی آن می‌باشد. هدف از خشک کردن دانه‌های غذایی و محصولات کشاورزی ذخیره‌سازی و انبارداری طولانی مدت آن‌ها و همچنین ایجاد فرآورده‌های مفید از ضایعات محصولات کشاورزی می‌باشد. به‌طور کلی برآورد شده است که حدود ۵-۱۰٪ مواد غذایی و سایر محصولات کشاورزی به علت آلودگی به انواع قارچ‌ها غیر قابل استفاده برای انسان‌ها و حیوانات می‌باشند (Ozey *et al.*, 2008). فندق خواص و ارزش تغذیه‌ای زیادی دارد، به همین دلیل از بروز خیلی بیماری‌ها پیشگیری

می‌کند و می‌تواند یکی از منابع غذایی بسیار مفید و مغذی در زنجیره غذایی انسان باشد (Şimşek, 2007). بنابراین تعیین عوامل کاهش کیفیت در فندق و همچنین اقدامات پیشگیرانه برای دستیابی و حفظ محصول با کیفیت بالا مهم است. تغییرات میکروبی، شیمیایی و بیوشیمیایی در عمر مفید فندق و فرآورده‌های آن مؤثر می‌باشند. در طول عملیات برداشت، خشک کردن و ذخیره‌سازی دانه‌های فندق به دلیل روش‌ها و شرایط نامناسب، کپک‌ها رشد می‌کنند و همین امر منجربه کاهش کیفیت آن‌ها می‌شود (Ceylan & Aktaş, 2008). استفاده از روش‌های مقرون به صرفه و بهداشتی برای حفظ مواد غذایی از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین استفاده از انواع مختلف خشک‌کن درمقایسه با روش‌های مختلف خشک‌کردن ازقبیل خشک‌کردن با آفتاب یا سایه موجب کاهش تلفات و بهبود کیفیت محصول خشک‌شده می‌شود (Kavak Akpinar *et al*., 2003). اشعه مادون قرمز انرژیی به شکل امواج الکترومغناطیس است و نسبت به روش هدایت و جابجایی از روش‌های سریع انتقال حرارت می‌باشد. خشک‌کن میکروویو یک روش خشک کردن تناوبی است که در صنایع غذایی استفاده می‌شود، اثبات شده که گرمایش دی‌الکتریک با امواج میکروویو، زمان خشک کردن بسیاری از محصولات کشاورزی را تا میزان زیادی کاهش می‌دهد و با کنترل مناسب شرایط خشک کردن (میدان الکتریکی، توان، سرعت جریان هوا و درجه حرارت ورودی) یک محصول با کیفیت خوب را تولید می‌کند (Krokida & Maroulis, 1999). خشک‌کن ترکیبی میکروویو–مادون قرمز یک تکنولوژی نوین است که به طور ترکیبی مزایای صرفه‌جویی در زمان خشک کردن توسط خشک‌کن میکروویو و حذف رطوبت سطحی توسط خشک‌کن مادون قرمز را دارد. محققین نشان دادند که رطوبت اضافی که در اثر خشک کردن مواد غذایی بر روی سطح آن‌ها انباشته می‌شود می‌تواند با استفاده از خشک مادون قرمز در خشک‌کن ترکیبی میکروویو–مادون قرمز حذف شود. خشک‌کن میکروویو در توان‌های بالا زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد (Tireki *et al*., 2006). خشک کردن یک فرآیند حرارتی پیچیده است که در آن به طور همزمان انتقال حرارت و جرم ناپایدار اتفاق می‌افتد (Sahin & Dincer, 2005). در واقع عملیات خشک‌کردن یک فرآیند دو سویه است که در طی آن فرآیندهای انتقال حرارت از منبع گرمایشی به سطح محصول و از سطح به مرکز محصول و انتقال جرم از قسمت‌های داخلی محصول به سطح و از سطح به محیط به طور همزمان صورت می‌گیرد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت مواد غذایی به عنوان یکی از خواص مواد غذایی است که بیانگر انواع مختلف انتقال رطوبت از قبیل انتقال از طریق نفوذ مایع، نفوذ بخار، نیروهای منافذ موئین، نفوذ سطحی و جریان هیدرودینامیک می‌باشد. برای طراحی و مدلسازی فرآیندهای انتقال جرم از قبیل آب زدایی، جذب و دفع رطوبت درطی عملیات انبارداری محاسبه ضریب نفوذ مؤثر لازم است (Erenturk *et al*., 2010). برخی از محققین بیان کرده‌اند که معمولا خشک شدن مواد غذایی در دوره نرخ نزولی اتفاق می‌افتد و همچنین انتقال رطوبت در مواد جامد خشک را می‌توان با استفاده از قانون فیک شرح داد (Mulet *et al*., 1987). با توجه به این‌که قبلاً از خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو برای خشک کردن فندق جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و حرارتی استفاده نشده بود بنابراین هدف از این پژهش عبارت است از: تعیین تأثیر شرایط مختلف خشک کردن از قبیل دمای هوا، توان میکروویو و توان مادون قرمز در میزان ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعالسازی نمونه‌های فندق در طی فرآیند خشک کردن.

مواد و روش‌ها

فرآیند خشک کردن

در این پژوهش ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی دانه‌های فندق با استفاده از یک خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو که بدین منظور طراحی و ساخته شده است، تعیین شد. آزمایشهای مختلف خشک کردن در سه سطح دمای هوای ورودی (۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، سه سطح توان میکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات)، سه سطح توان مادون قرمز (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات) و سرعت ثابت هوای ورودی ۲/۵۶ متر بر ثانیه انجام شد. برای بدست آوردن مقدار رطوبت اولیه، حدود ۲۳ گرم از نمونه‌ها در ظرف پتری دیش در داخل یک اجاق دردمای۱۰۰درجه سلسیوس به مدت شش ساعت قرار داده شدند (Ceylan & Aktaş 2008). در طول مدت خشک‌کردن، نمونه ها هر یک ساعت یک‌بار وزن شدند. مقدار رطوبت بر پایه وزن خشک دانه‌های فندق با استفاده از رابطه ۱ بدست آمد ، میزان رطوبت دانه‌های فندق ۵۴ درصد بر پایه خشک بود:

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \qquad (۱)$$

که در آن MC_{db} رطوبت بر پایه خشک، M_i وزن اولیه نمونه (کیلوگرم) و M_d وزن ثانویه نمونه (کیلوگرم) بود. قبل از شروع هر آزمایش، دستگاه به مدت ۲۰ دقیقه برای رسیدن به حالت پایدار روشن گذاشته می‌شد. شرایط هر آزمایش شامل دمای هوا، توان مادون قرمز، توان میکروویو و سرعت هوا تنظیم می‌شدند. سپس نمونه‌ها به صورت لایه نازک داخل ظرف توری قرار داده شدند و ابتدا در داخل ماکروویو (به مدت سی ثانیه) به عنوان پیش تیمار و سپس در داخل خشک‌کن مادون قرمز (به مدت دو دقیقه و سی ثانیه) قرار داده شدند. هر سه دقیقه یکبار توسط یک ترازوی دیجیتال (AND GF-600, Japan) با دقت ۰/۱٪ در طول فرآیند خشک کردن وزن شدند، مقادیر در رایانه ثبت شدند و نمودار مقدار رطوبت–زمان رسم شد. در نهایت زمانی‌که مقدار رطوبت نمونه‌های فندق به ۰/۰۴ بر پایه خشک می‌رسید آزمایش‌ها متوقف می‌شد.

تعیین ضریب نفوذ مؤثر

قانون دوم فیک برای توصیف فرآیند نفوذ رطوبت اشکال کروی به صورت رابطه ۲ بیان شد (Doymaz, 2012):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \qquad (۲)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (متر مربع بر ثانیه)، t زمان خشک کردن (ثانیه) و M مقدار رطوبت (بر پایه خشک) می‌باشد. با توجه به کروی بودن فندق فرضیاتی در نظر گرفته شد که (Çağlar *et al.*, 2009): الف) توزیع رطوبت در جرم ماده به صورت یکنواخت است، ب) انتقال جرم با توجه به مرکز، متقارن است، ت) مقدار رطوبت سطحی نمونه‌ها در هوای محیط بلافاصله به

تعادل می‌رسد، ث) مقاومت به انتقال جرم در مقایسه با مقاومت داخلی قابل صرف نظر کردن است و ت) ضریب نفوذ ثابت و چروکیدگی قابل صرف نظر کردن است. با در نظر گرفتن این فرضیات مقدار ضریب نفوذ مؤثر را می‌توان از رابطه ۳ بدست آورد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (۳)$$

MR نسبت رطوبت است که معادل $\frac{M - M_e}{M_o - M_e}$ می‌باشد، n تعداد جملات خشک کردن (1,2,3...)، r شعاع هندسی فندق (متر)، M_o مقدار رطوبت اولیه (d.b.) و M_e مقدار رطوبت تعادلی (d.b.) است. زمانی که t افزایش می‌یابد تمام جملات به غیر از جمله اول صفر می‌شود. بنابراین معادله بالا همانند رابطه ۴ ساده می‌شود (khir *et al*., 2011):

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (۴)$$

با لگاریتم گیری از معادله ۴ می‌توان آن را به صورت خطی در آورد:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_o - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2}{r^2}\right) \quad (۵)$$

و در نهایت با رسم نمودار $\ln(MR)$ بر حسب زمان خطی با شیب k بدست می‌آید که با مساوی قرار دادن آن با $\frac{D_{eff} \pi^2}{r^2}$ در رابطه ۵ می‌توان ضریب نفوذ مؤثر را بدست آورد:

$$k = \left(\frac{D_{eff} \pi^2}{r^2}\right) \quad (۶)$$

بنابراین برای تعیین رفتار خشک کردن مواد لازم است که پارامترهایی همچون ضریب نفوذ مؤثر بدست آید.

انرژی فعالسازی

برای بدست آوردن انرژی فعالسازی همبستگی بین ضریب نفوذ مؤثر و دما می‌تواند توسط معادله آرنیوس بدست آید:

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۷)$$

که در آن E_a انرژی فعال‌سازی (کیلوژول بر مول)، T دمای مطلق (کلوین) و R ثابت عمومی گازها است (۸/۳۱۴۳ کیلوژول بر کیلومول). با لگاریتم‌گیری از دو طرف معادله ۷، معادله ۸ بدست می‌آید:

$$\ln\left(D_{eff}\right) = \ln\left(D_o\right) - \left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \quad (۸)$$

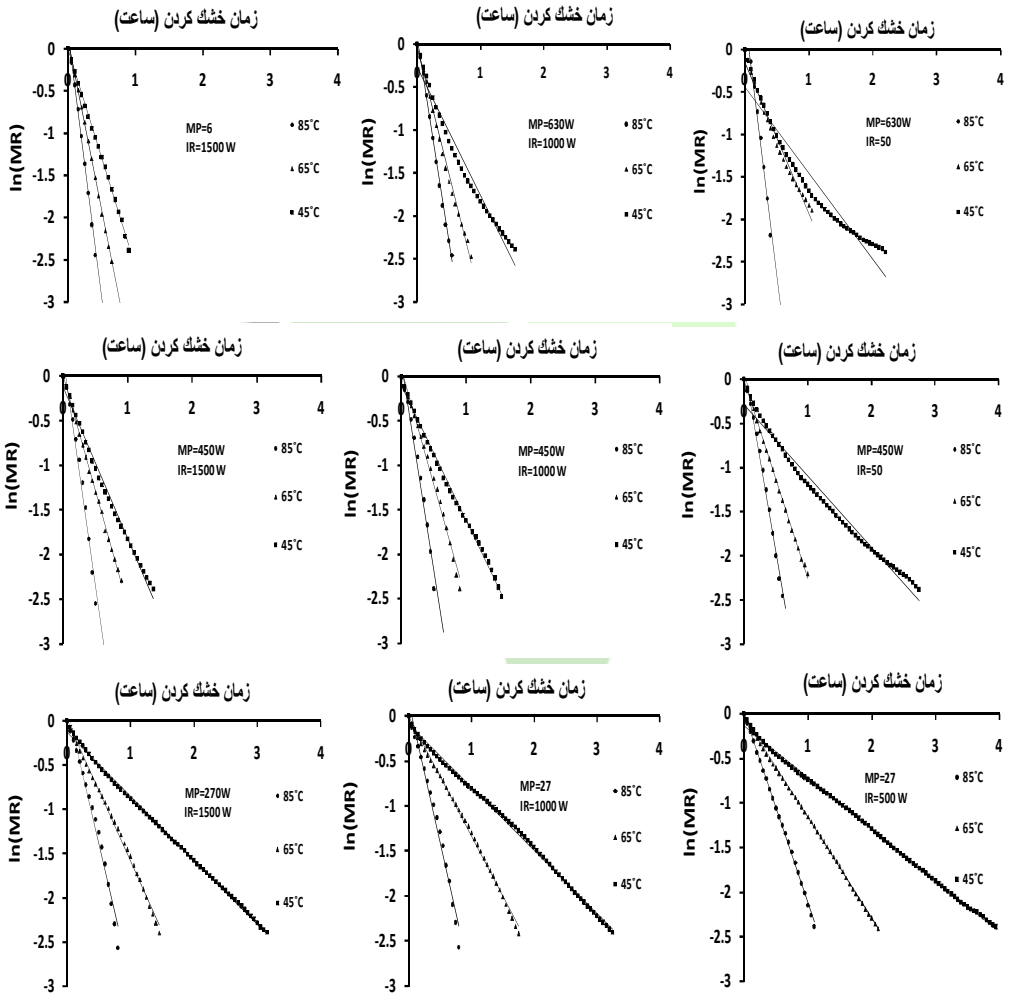
و با رسم نمودار $\ln\left(D_{eff}\right)$ بر حسب $\left(\frac{1}{T}\right)$ خطی با شیب C بدست آمد و در نهایت انرژی فعال‌سازی از شیب خط بدست آمد (Odjo *et al*., 2012):

$$C_1 = \frac{E_a}{R} \quad (۹)$$

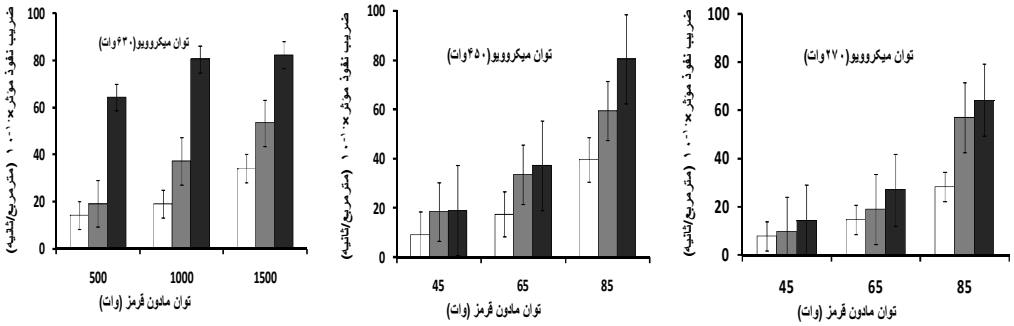
نتایج و بحث

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به سه دلیل متفاوت هستند: الف) روش‌های مورد استفاده برای تعیین مقدار ضریب نفوذ مؤثر، ب) مواد غذایی مورد استفاده و پ) شرایط آزمایش (Pathare and Sharma, 2006). مقادیر ضریب نفوذ مؤثر فندق خشک شده با خشک‌کن مادون قرمز- پیش تیمار میکروویو با استفاده از ترسیم نسبت رطوبت بر حسب زمان با رابطه ۶ بدست آمد. شکل ۱ منحنی Ln(MR) بر حسب زمان برای تمام شرایط خشک کردن (دمای هوا، توان میکروویو و توان مادون قرمز) را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب نفوذ مؤثر دانه‌های فندق در شرایط مختلف خشک کردن در محدوده $۱۰^{-۱۰} \times ۷/۸۱$ و $۱۰^{-۹} \times ۸/۲۲$ مترمربع بر ثانیه بدست آمد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش دمای هوای خشک کردن مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به دلیل انتقال بالای جرم افزایش یافت (شکل ۲). این پدیده می‌تواند به این دلیل باشد که با قرار گرفتن نمونه‌ها در معرض دماهای بالا انرژی گرمایش افزایش می‌یابد و همین امر منجربه افزایش فعالیت مولکول‌های آب و در نهایت افزایش نفوذ رطوبت می‌شود (Xiao *et al*., 2010). همچنین با افزایش توان مادون قرمز و میکروویو مقدار نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت اما تأثیر توان میکروویو نسبت به توان مادون قرمز بیشتر بود و تأثیر گرمایش میکروویو باعث شد که فرآیند انتقال حرارت و جرم در دانه‌های فندق سریع‌تر صورت گیرد و زمان خشک کردن کوتاه‌تر شود (شکل ۳). کاهش زمان خشک کردن به علت افزایش فشار داخلی و گرادیان غلظت می‌باشد که همین امر باعث می‌شود که جریان مایع در اطراف نقاط مرکزی ماده غذایی افزایش یابد. در برخی موارد، کاهش زمان خشک کردن به دلیل افزایش نرخ تولید دارای اهمیت بالاو در برخی به دلیل افزایش کیفیت محصول خشک شده کمتر اهمیت دارد. به طور کلی جذب امواج میکروویو با مواد دی الکتریک، باعث می‌شود که امواج میکروویو انرژی خود را به ماده غذایی بدهند

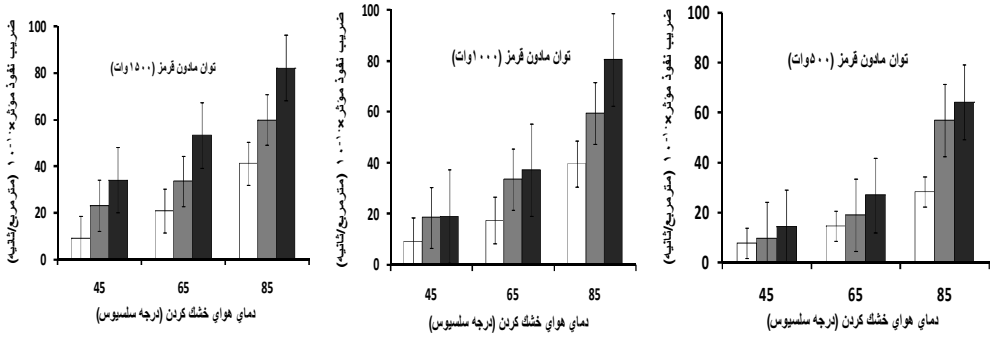
و در نهایت باعث بالا رفتن دما شوند. مواد غذایی عایق‌های خیلی ضعیفی هستند و وقتی این مواد در میدان میکروویو قرار می‌گیرند مقدار زیادی انرژی جذب می‌کنند که نتیجه آن گرمایش سریع می‌باشد (مرتضوی و همکاران ، ۱۳۸۷). نفوذ رطوبت به مقدار رطوبت، ساختار فیزیکی محصول و دمای محیط بستگی دارد. به‌طور کلی ویژگیهای مواد غذایی و اجزای تشکیل دهنده آنها بطور همزمان بر انتقال حرارت و جرم و همچنین بر خصوصیات محصول نهایی اثر می‌گذارند. با توجه به اینکه فندق حاوی ۶۰٪ روغن می‌باشد وجود چربی در آن باعث می‌شود که کار انتقال حرارت و جرم و فرآیند خشک کردن دچار کندی شود و همین امر باعث شد که زمان خشک کردن فندق طولانی‌تر شود (فاطمی، ۱۳۹۱). اما استفاده از خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو این مشکل را برطرف کرد.



شکل ۱. Ln(MR) بر حسب زمان خشک کردن (ساعت) برای دماهای هوای خشک کردن (۴۵، ۶۵، ۸۵ درجه سلسیوس)، توان‌های مادون قرمز (IR=۵۰۰، ۱۰۰۰و ۱۵۰۰ وات) و توان‌های میکروویو (MP= ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات)

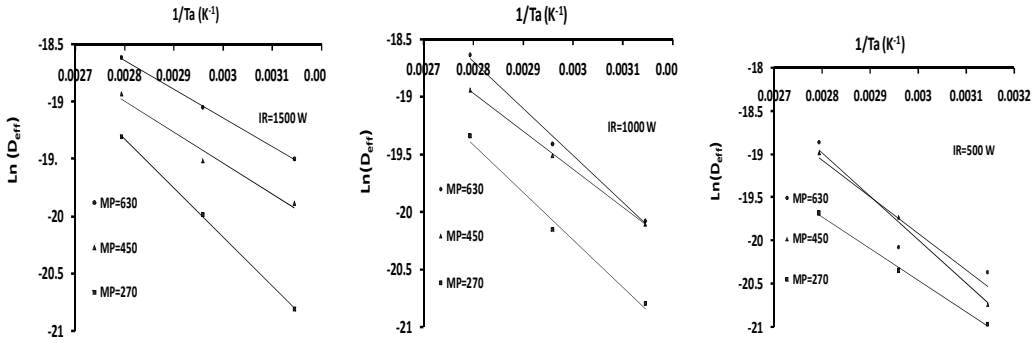


شکل ۲. تغییر ضریب نفوذ مؤثر با دمای هوای خشک کردن (۴۵ درجه سلسیوس □، ۶۵ درجه سلسیوس ■ و ۸۵ درجه سلسیوس ■)، در توان‌های مختلف خشک‌کن ماکروویو و مادون قرمز



شکل ۳. تغییر ضریب نفوذ مؤثر با توان ماکروویو (۳۰ درصد □، ۵۰ درصد ■ و ۷۰ درصد ■)، در دماهای هوای مختلف خشک کردن و توان‌های مختلف مادون قرمز

انرژی فعال‌سازی از ترسیم $Ln(D_{eff})$ بر حسب مقدار عکس زمان خشک کردن و از شیب خط راست بدست آمد (شکل۴). مقدار آن بین ۲۰/۸۱ و ۴۱/۳۳ کیلوژول بر مول محاسبه شد. انرژی فعال‌سازی به ساختار منافذ مواد غذایی بستگی دارد، نتایج نشان داد که مقدار انرژی مورد نیاز برای حذف رطوبت دانه‌های فندق خشک شده در خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو در مقایسه با خشک‌شدن فندق در خشک‌کن مادون قرمز تا حدودی کمتر بود، و قرار دادن دانه‌ها در داخل میکروویو قبل از قرارگرفتن در معرض اشعه مادون قرمز منجربه کاهش انرژی فعال‌سازی شد. مقادیر انرژی فعال‌سازی برای دانه‌های فندق برای شرایط مختلف خشک کردن در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴. $Ln(D_{eff})$ بر حسب $1/T_a$ در توان‌های مختلف میکروویو و مادون قرمز برای نمونه‌های خشک شده با خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو

جدول ۲. مقدار انرژی فعال‌سازی و ضریب تبیین دانه‌های فندق برای دماهای هوای (۴۵، ۶۵، ۸۵ درجه سلسیوس)، توان‌های ماکروویو (۳۰، ۵۰، ۷۰ درصد) و توان‌های مادون قرمز (۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ وات)

توان میکروویو (وات)	توان مادون قرمز (وات)					
	۵۰۰		۱۰۰۰		۱۵۰۰	
	E_a(kJ/mol)	R^2	E_a(kJ/mol)	R^2	E_a(kJ/mol)	R^2
۲۷۰	۳۰/۴۰	۰/۹۹۷	۳۴/۲۷	۰/۹۸۹	۳۵/۵۷	۰/۹۹۹
۴۵۰	۴۱/۳۳	۰/۹۶۹	۲۷/۵۷	۰/۹۹۹	۲۲/۴۰	۰/۹۷۴
۶۳۰	۳۵/۴۹	۰/۹۸۵	۳۳/۹۶	۰/۹۹۴	۲۰/۸۱	۰/۹۹۹

نتیجه‌گیری کلی

مطابق شکل ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دمای هوای خشک کردن، توان مادون قرمز و توان میکروویو افزایش یافت. به طوری‌که بیشترین و کمترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر به ترتیب مربوط به دماهای هوای ۸۵ و ۴۵ درجه سلسیوس، توان مادون قرمز ۱۵۰۰ و۵۰۰ وات و توان میکروویو ۶۳۰ و ۲۷۰ وات بود. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در بین شرایط خشک کردن بیشترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر دانه‌های فندق خشک شده در خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو ، مربوط به توان میکروویو ۶۳۰ وات بود. انرژی فعال‌سازی در خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو برای دانه‌های فندق در محدودهٔ ۲۰/۸۱ و ۴۱/۳۳ کیلوژول بر مول بدست آمد.

منابع

۱. فاطمی، ح. (۱۳۹۱). اصول تکنولوژی نگهداری مواد غذایی. شرکت سهامی انتشار، ص ۲۵۷.

۲. سینگ، آ.، آرهلدمان، د. ترجمه: مرتضوی، س.ع.، سیف کردی، ع.ا.، محمدی نافچی، ع.، و نوری، ل. ۱۳۸۷. اصول مهندسی صنایع غذایی. چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ شماره ۲۴۵، ص ۴۱۶.

3. Çağlar, A., İ.T. Toğrul, and H. Toğrul. 2009. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. Food and Bioproducts processing 87: 292-300.
4. Ceylan, İ., and M. Aktaş. 2008. Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural networks. Applied Energy 85: 841-854.
5. Ozay, G., F. Seyhan, C. Pembeci, S. Saklar, and A. Yilmaz. 2008. Factors influencing fungal and aflatoxin levels in Turkish hazelnuts (Corylus avellana L.) during growth, harvest, drying and storage: A 3-year study. Food Additives and Contaminants 25(2): 209-218.
6. Şimşek, A. 2007. The use of 3D-nonlinear regression analysis in mathematics modeling of colour change in roasted hazelnuts. Journal of Food Engineering 78: 1361-1370.
7. KavakAkpinar, E., Y. Bicer, and C. Yildiz. 2003. Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering 59: 99-104.
8. Doymaz, İ. 2012. Sun drying of seedless and seeded grapes. Journal of Food Science Thecnology 49(2):214-220.
9. Erenturk, S., M.S. Gulaboglu, and S. Gultekin. 2010. Experimental determination of effective moisture diffusivities of whole-and cut-rosehips in convective drying. Food and Bioproducts Processing 88: 99-104.
10. Khir, R., Z. Pan, A. Salim, B.R. Hartsough, and S. Mohamed. 2011. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. LWT - Food Science and Technology 44: 1126-1132.
11. Krokida, M.K., and Z.B. Maroulis. 1999. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. Drying technology 17(3):449-466.
12. Mulet, A., A. Berna, S. Rosello, and F. Pinaga. 1987. Effect of air flow rate on carrot drying. Drying Thecnology 5(2) :245-258.
13. Odjo, S., P. Malumba, J. Dossou, S. Janas, and F. Béra. 2012. Influence of drying and hydrothermal treatment of corn on the denaturation of salt-soluble proteins and color parameters. Journal of Food Engineering 109, 561-570.
14. Pathare, P.B., and G.P. Sharma. (2006). Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. Biosystems Engineering 93 (3): 285-291.
15. Sahin AZ., and I. Dincer. 2005. Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. Journal of Food Engineering 71:119-126.
16. Tireki, S., G. Şumnu, and A. Esin. 2006. Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. European Food Research and Technology (2006) 222: 8-14.
17. Xiao, H.W., Ch.L. Pang, L.H. Wang, J.W. Bai, W.X. Yang, and Zh.J. Gao. 2010. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. Biosystems Engineering 105: 233–240.

Effective moisture diffusivity and activation energy of dri hazelnut kernels by infrared dryers with microwave pretreated

Maryam Ahmadi Ghavidelan[1*] and Reza Amiri Chayjan[2]

1- MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan
maryam.ahmadi18@yahoo.com
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan

Abstract

Drying is an important stage at the post-harvest processing of agricultural products. It is also as a high-energy consumed process. Therefore, during this study, drying process of hazelnut in three levels of drying air temperature (45, 65 and 85˚C), infrared powers (500, 1000 and 1500W) and microwave power (270, 450 and 630 W) was investigated. Effective moisture diffusivity and activation energy of hazelnut kernels during this drying process were computed. Constant air velocity of 2.56 m/s was applied during drying processes. Experiments were performed by using an infrare dryers with microwave pretreated. Fick's second law was used to calculate the effective moisture diffusivity. Results showed that effective moisture diffusivity increased by increasing air temperature, microwave and infrared powers. Effective moisture diffusivity values were at the range of 7.81×10^{-10} and 8.22×10^{-9} m^2/s. Also the effect of microwave power on the effective moisture diffusivity of hazelnut kernels was studied. Results indicated that the effective moisture diffusivity increased by the increasing of microwave power. The relation between the effective moisture diffusivity and air temperature was attained by Arrhenius equation. Maximum and minimum values of the activation energy in concerning to hazelnut kernels were between 41.33 and 20.81KJ/mol, respectively.

Key words: Activation energy, Infrared dryers with microwave pretreated, Effective moisture diffusivity, Hazelnut.