

بررسی فرآیند خشک کردن میوه آلبالو در خشک کن مایکروویو - خلاء

علی متولی^۱، سعید مینایی^{۲*}، سلیمان عباسی^۳ و عبدالرحمن قادری^۴^۱ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، ^۲ دانشیار، ^۳ دانشیار و ^۴ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد،

گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۰/۱۵ - تاریخ تصویب ۱۳۸۹/۸/۲۵)

چکیده

در این پژوهش، رفتار خشک شدن و تاثیر شرایط مختلف خشک کردن (۴ سطح توان مایکروویو ۳۶۰، ۶۰۰، ۸۴۰ و ۱۲۰۰ وات و ۴ سطح فشار خلاء ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) توسط خشک کن مایکروویو-خلاء بر تمایل به از دست دادن رطوبت، ضریب انتشار رطوبت موثر و مقادیر انرژی فعال سازی در میوه آلبالو مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس یافته‌های این بررسی ضریب انتشار رطوبت موثر میوه آلبالو بین $3/21 \times 10^{-9}$ تا $20/005 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه به دست آمد. انرژی فعال سازی با استفاده از یک رابطه نمایی بر مبنای رابطه آرنوس محاسبه شد که بیشترین کمترین میزان انرژی فعال سازی به ترتیب ۲۳/۹۱ و ۲۱/۲۳ وات بر گرم به دست آمد. انرژی فعال سازی به دست آمده در خشک کن مایکروویو-خلاء برای میوه آلبالو در سطوح مختلف توان و خلاء در سه روش متفاوت بسیار به یکدیگر نزدیک بود.

واژه‌های کلیدی: آهنگ تبخیر، ضریب انتشار، انرژی فعال سازی، مایکروویو-خلاء، آلبالو

مقدمه

دوقطبی 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 می‌باشند اما هنگامی که میدان الکتریکی اعمال می‌شود مولکول‌ها خودشان را با قطبیت میدان هم‌جهت می‌کنند به عبارت دیگر در یک میدان مایکروویو، قطبیت به 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 (Schiffmann, 1992).

استفاده از خلاء در خشک کن می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش کیفیت محصول خشک‌شده قلمداد شود. اعمال خلاء یا کاهش فشار می‌تواند دمای خشک کردن را کاهش داده و در نتیجه سبب بهبود ویژگی‌های کیفی ماده غذایی گردد (Jaya & Das, 2003; Kompany et al., 1993).
عسگری و همکاران در خشک کردن برگه‌های سیب بدون استفاده از پوشش نشاسته و پکتین به روش ترکیبی مایکروویو- هوای داغ به این نتیجه رسیدند که با اعمال انرژی مایکروویو روی برگه‌ها، حجم و چروکیدگی بافت کاهش می‌یابد در حالی که استفاده از پوشش نشاسته و پکتین تا اندازه‌ای موجب افزایش حجم شد (Askari et al., 2005).

آلبالو به طور عمده در لهستان، روسیه، صربستان، مجارستان، ایران، اتریش، آذربایجان و آلمان تولید می‌شود. براساس آمار فائو (۲۰۰۶)، ایران در حدود ۴۸/۶۷ هزار تن تولید دارد که معادل ۵٪ تولید جهانی است (FAO, 2006). آلبالو برای تهیه محصولات مختلفی مانند نکتار، سس، ژله، آب نبات و مربا به کار برده می‌شود و از خشک کردن به طور گسترده‌ای برای نگهداری طولانی مدت آلبالو استفاده می‌شود (Doymaz, 2006). 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 فرآیند خشک شدن آن را به راحتی قابل حمل و نقل می‌سازد (Koyuncu et al., 2007).

خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو می‌تواند جانشین مناسبی برای خشک کن‌های 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. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای ۳۰۰ مگاهرتز و ۳۰۰ گیگاهرتز نشان‌گر امواج مایکروویو است. برخلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می‌یابد. چرخش

* نویسنده مسئول: s_minaei@gmail.com

انجام آزمایش انتخاب گردید. میزان رطوبت اولیه آلبالوها، به روش خشک کردن در آون به دست آمد (Doymaz, 2005) این روند ۵ بار تکرار شد. نتایج نشان داد که میزان رطوبت اولیه آلبالوها در حدود ۷۲/۹۸ درصد بر پایه ترمی باشد.

فرآیند خشک کردن دانه‌های آلبالو در ۴ سطح توانی (۳۶۰، ۶۰۰، ۸۴۰ و ۱۲۰۰ وات) و ۴ سطح فشار مطلق (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی بار) انجام شد. وزن کردن نمونه‌ها آزمایشی با استفاده از ترازوی (Tecator، مدل ۶۱۰، ساخت کشور فرانسه با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم)، برای ایجاد خلاء 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.

میانگین قطر هندسی دانه های میوه آلبالو به طور جداگانه حساب شد. برای این منظور حجم ۱۰ عدد آلبالو با استفاده از جابه جایی تولون به دست آمد (این عمل در ۳ تکرار انجام شد) سپس با استفاده از حجم جابه جایی تولون حجم یک دانه آلبالو محاسبه شده و حجم تقریباً برابر با حجم کره در نظر گرفته شده و در نهایت شعاع معادل دانه به کمک رابطه (۱) محاسبه شد (Mohsenin, 1996) که شعاع معادل برای دانه آلبالو ۸/۹ میلی متر به دست آمد.

$$v = \frac{4}{3} \pi r_e^3 \quad (1)$$

آهنگ تبخیر برای آلبالو نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (Wong, 2001):

$$DR = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{dt} \quad (2)$$

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. 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 به طور مداوم کاهش می‌یابد. این ویژگی آهنگ تبخیر می‌تواند توسط رابطه (۲) بیان شود (Wong, 2001).

در شرایط ناپایدار اشکال کروی می‌توان مطابق قانون دوم فیک انتقال رطوبت در مرحله نزولی در مدت زمان طولانی خشک شدن می‌توان به صورت معادله (۳) نوشت (Crank, 2001).

در پژوهشی دیگر به مقایسه تأثیر فرآیندهای خشک کردن در خلاء، انجمادی، خورشیدی و مایکروویو با روش سنتی بر ویژگی‌های زعفران پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از روشهای نوین در خشک کردن زعفران سبب افزایش کیفیت محصول نهایی می‌شود (Mazlomi et al., 2008).

همچنین در پژوهشی دیگر به تأثیر نوع خشک کن (جریان هوای داغ و مایکروویو) بر ترکیبات عمده و توانایی بازجذب آب فرآورده‌های خشک شده سیبزمینی پرداخته شد و نتایج نشان داد که مایکروویو به دلیل کاهش زمان خشک کردن سبب حفظ ارزش غذایی و بافتی محصول می‌شود (Salami et al., 2009).

خشک کردن به روش ترکیبی مایکروویو-خلاء مزایای هر دو روش خشک کردن مایکروویو و خلاء را دارد و می‌تواند نسبت انرژی مصرفی را کاهش و کیفیت خشک شدن محصول را افزایش دهد (Zheng-Wei et al., 2004). به علت استفاده از خلاء در خشک کن 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 - خلاء دارای پتانسیل بسیار خوبی برای بالا بردن کیفیت محصول است که در خشک کردن میوه و سبزیجات و دانه‌ها توسط پژوهشگران مختلف مانند (Abbasi and Azari, 2009; Zheng-Wei et al., 2004; Drouzas & Schubert, 1996; Kaensup et al., 2002; Wadsworth et al., 1990)

کاراسلان و تونسر برگ‌های اسفناج را در خشک کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو- همرفتی خشک کرده و اثرات آن را بر زمان خشک کردن، نسبت خشک کردن و تغییرات رنگ مورد بررسی و مقایسه قرار دادند (Karaaslan & Tuncer, 2008). آلکنور و همکاران برش‌های کدو تنبل را با سه روش خشک کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو- همرفتی خشک کرده و بهترین دوره خشک کردن، رنگ و مصرف انرژی را به دست آوردند (Ilknur, 2007).

بنابراین در پژوهش حاضر به دلیل نبود اطلاعات کافی و مستند تأثیر شرایط خشک کردن بر آهنگ از دست دادن رطوبت، ضریب انتشار رطوبت موثر، انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در طی خشک کردن میوه آلبالو توسط مایکروویو- خلاء مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آلبالوهای مورد آزمایش در تیر ماه ۸۸ از یکی از باغ‌های اطراف کرج (محمد شهر) تهیه و برای انجام آزمایش‌ها در یخچال در دمای ۵+ سلسیوس نگهداری شدند. آلبالوهای نارس و فاسد به طور دستی جدا شده و نمونه های یکنواخت برای

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 به دست آورد (Dadali *et al.*, 2007; Ozbek and Dadali, 2007).

با استفاده از رابطه های (۶) و (۷) می توان رابطه بین آهنگ ثابت خشک شدن و ضریب انتشار رطوبت موثر را به دست آورد. مقادیر تئوریک آهنگ ثابت خشک شدن (K) از رابطه (۶) و مقادیر ضریب انتشار رطوبت موثر از رابطه (۷) به دست می آید که رابطه بین آن ها عبارت است از:

$$K_{th} = A.(D_{eff})_{th} \quad (۸)$$

در روش سوم نیز می توان با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۷) آن را به صورت خطی در آورد:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{p} \cdot \frac{m}{1} \quad (۹)$$

با رسم نمودار $(\ln D_{eff})$ در مقابل $(1/p)$ می توان شیب خط (K_2) را برای مایکروویو به دست آورد:

$$K_2 = \frac{E_a}{p} \quad (۱۰)$$

نتایج و بحث

آهنگ تبخیر

معمولاً در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد است و در نتیجه آهنگ از دست دادن رطوبت نیز زیاد است، ولی به تدریج با پیشرفت زمان، میزان رطوبت محصول به طور طبیعی کاهش پیدا کرده و آهنگ کاهش رطوبت نیز کاهش می یابد. به عبارتی گرچه محصول عمده رطوبت خود را در لحظات اولیه مرحله خشک کردن از دست می دهد ولی هنوز زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقیمانده لازم دارد. در همین راستا، یافته های بررسی حاضر نیز نشان می دهند (شکل ۱) که آهنگ تبخیر در لحظات اولیه با گذشت زمان به سرعت افزایش می یابد و به یک نقطه اوجی که بیشترین مقدار آهنگ تبخیر است می رسد و پس از آن با گذشت زمان، آهنگ تبخیر به طور مداوم کاهش می یابد. همان طور که مشاهده می شود توان مایکروویو تاثیر مهمی روی آهنگ تبخیر دارد به طوری که با افزایش توان مایکروویو آهنگ تبخیر نیز افزایش می یابد. همچنین با کاهش میزان فشار مطلق هوا، دمای نقطه جوش آب کاهش یافته و گرمای بخار آب نیز با کاهش فشار هوا کاهش می یابد در نتیجه کاهش فشار هوا آهنگ تبخیر نیز افزایش می یابد. نتایج به دست آمده مشابه نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران است (Maskan, 2000; Sharma & Prasad, 2001; Funebo & Ohlsson, 1998; Giese, 1992; Soysal, 2004)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}) \quad (۳)$$

که در آن MR نسبت رطوبت (بی بعد)، t زمان خشک شدن، D_{eff} ضریب انتشار رطوبت موثر، r_0 شعاع کره است که در طول روند خشک شدن ثابت فرض شده است.

رابطه (۳) برای به دست آوردن ضریب انتشار رطوبت موثر استفاده شده است. در این مرحله شعاع r_0 (دانه آلبالو) ثابت در نظر گرفته می شود. با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۳) می توان رابطه را به صورت خطی نوشت، برای این کار داریم:

$$\ln(MR) = \ln(\frac{6}{\pi^2}) - (\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}) \quad (۴)$$

با رسم لگاریتم طبیعی داده های به دست آمده در طول آزمایش نسبت به زمان، خطی با شیب k_1 به دست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه (۴)، ضریب انتشار رطوبت موثر را می توان به کمک رابطه (۵) محاسبه کرد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_0^2} \quad (۵)$$

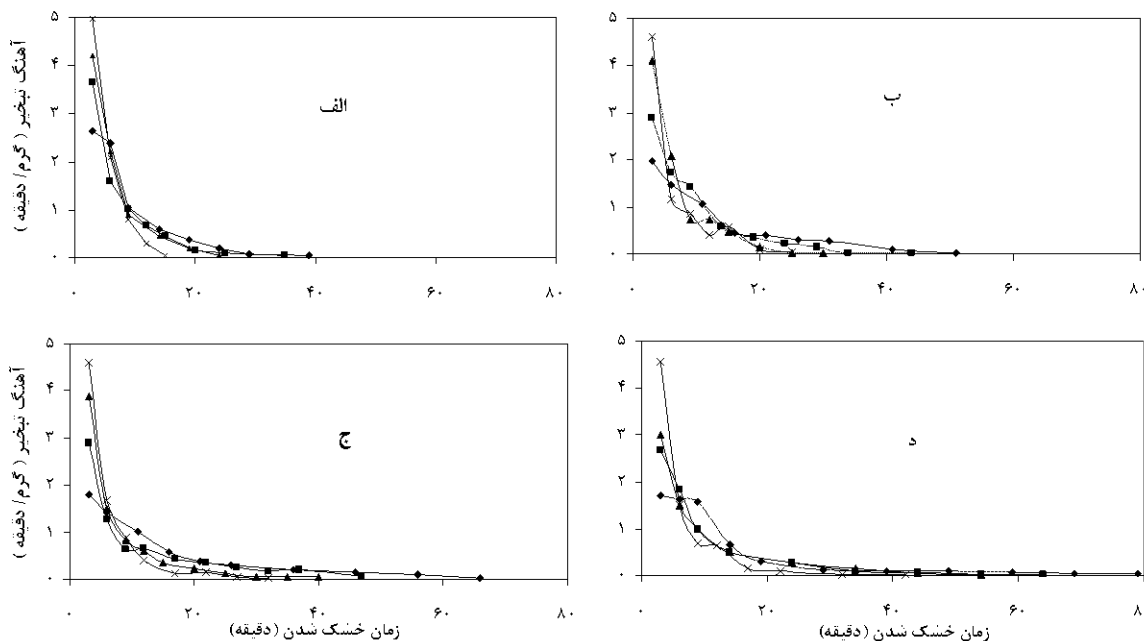
از آنجایی که دما در خشک کن مایکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نیست، برای به دست آوردن انرژی فعال سازی باید از شکل اصلاح شده رابطه آرنوس استفاده کرد. در روش اول می توان از ارتباط بین آهنگ ثابت سینیتیک خشک شدن (K) و نسبت به توان خروجی مایکروویو به وزن نمونه (m/p) به جای دمای هوا استفاده کرد. در این حالت پس از ارزیابی داده ها، با به کار بردن رابطه (۶) 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 به دست آورد (Dadali *et al.*, 2007; Ozbek & Dadali, 2007).

$$K = K_0 \exp(\frac{-E_a \cdot m}{p}) \quad (۶)$$

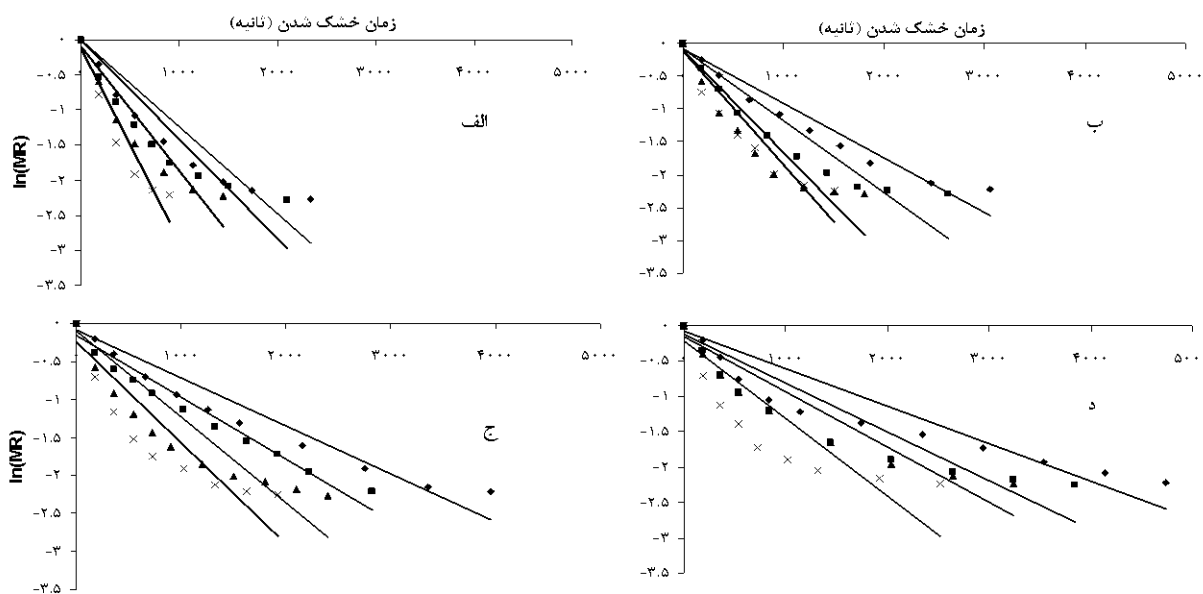
که در آن (K) آهنگ ثابت خشک شدن (min^{-1}) است که از رابطه میدلی به دست می آید. (K_0) عرض از مبدا رابطه (min^{-1}) ، E_a انرژی فعال سازی (W g^{-1}) ، (p) توان خروجی مایکروویو (W) و (m) وزن نمونه ها (g) می باشد.

در روش دوم، برای به دست آوردن انرژی فعال سازی در مایکروویو وابستگی بین ضریب انتشار رطوبت موثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه بر اساس مدل آرنوس می تواند به دست آید (Dadali *et al.*, 2007).

$$D_{eff} = D_0 \exp(\frac{E_a \cdot m}{p}) \quad (۷)$$



شکل ۱- تاثیر توان‌های مختلف مایکروویو (♦ ۳۶۰، ■ ۶۰۰، ▲ ۸۴۰ و × ۱۲۰۰ وات) روی آهنگ تبخیر میوه آلبالو در خشک کردن به روش مایکروویو- خلاء در فشارهای مطلق (الف) ۲۰۰ (ب) ۴۰۰ (ج) ۶۰۰ (د) ۸۰۰ میلی بار



شکل ۲- تاثیر توان‌های مختلف مایکروویو (♦ ۳۶۰، ■ ۶۰۰، ▲ ۸۴۰ و × ۱۲۰۰ وات) روی تغییرات $\ln(MR)$ طی زمان خشک شدن میوه آلبالو در خشک کردن به روش مایکروویو- خلاء در فشارهای مطلق (الف) ۲۰۰ (ب) ۴۰۰ (ج) ۶۰۰ (د) ۸۰۰ میلی بار

ضریب انتشار رطوبت

مقدار ضریب انتشار رطوبت موثر به میزان $3/21 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه در پایین‌ترین توان مایکروویو و بالاترین فشار مطلق می باشد.

با توجه به اینکه ضریب انتشار رطوبت موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد (Rizvi, 1996) و نظر به اینکه در پژوهش حاضر ترکیب آلبالو در آزمایش‌ها ثابت بود لذا احتمالاً دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ موثر در شرایط مختلف خشک کردن مربوط به دماهای مختلف اعمال شده باشد زیرا دما

شکل ۲، تغییرات $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک شدن را در شرایط مختلف توان و فشار مطلق برای خشک کردن میوه آلبالو نشان می‌دهد. با افزایش توان مایکروویو و کاهش میزان فشار مطلق آهنگ تبخیر افزایش یافته و به تبع میزان ضریب نفوذ نیز افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین مقدار ضریب انتشار رطوبت موثر برای میوه آلبالو به میزان $20/005 \times 10^{-9}$ در بالاترین توان مایکروویو و پایین‌ترین فشار مطلق و کمترین

کمترین مقدار مربوط به توان ۳۶۰ وات و فشار مطلق ۸۰۰ میلی بار می‌باشد. مقادیر مختلف میزان ضریب پخش موثر در جدول ۱ آمده است. نتایج به دست آمده مشابه نتایج به دست آمده از تحقیقات سایر پژوهشگران است (Shin Kim & Bhowmik, 1995; Sharma & Prasad, 2004). همچنین لازم به ذکر است در توان‌های بالاتر از ۶۰۰ وات به علت تخریب بافت میوه آلبالو مقادیر به دست آمده ضریب پخش موثر رطوبت دقیق نمی‌باشد (Askari et al., 2005).

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 به دست 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 ۱۲۰۰ وات و

جدول ۱- مقادیر ضریب انتشار رطوبت موثر و ضریب تعیین مدل خطی در صورت اعمال توان‌ها و خلاءهای مختلف در خشک کن مایکروویو- خلاء هنگام

خشک شدن میوه آلبالو

توان مایکروویو		۳۶۰ وات		۶۰۰ وات		۸۴۰ وات		۱۲۰۰ وات	
میزان فشار مطلق (میلی بار)	$D_{eff} \times 10^{-9} (m^2/s)$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-9} (m^2/s)$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-9} (m^2/s)$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-9} (m^2/s)$	R^2	$D_{eff} \times 10^{-9} (m^2/s)$
۲۰۰	۸/۰۳۳۷۹۴	۰/۸۹	۸/۸۳۷۱۷۴	۰/۸۶	۱۱/۱۲۴۷۳	۰/۹۱	۲۰/۰۰۸۴۵	۰/۹۱	۲۰/۰۰۸۴۵
۴۰۰	۶/۴۲۷۰۳۵۶	۰/۹۵	۷/۲۳۰۴۱۵	۰/۸۸	۹/۶۴۰۵۵۳۴	۰/۸۵	۱۰/۰۰۵۵۹۶	۰/۹۰	۱۰/۰۰۵۵۹۶
۶۰۰	۴/۸۲۰۲۷	۰/۹۶	۵/۶۲۳۶۵۶	۰/۹۷	۶/۴۲۷۰۳۶	۰/۸۶	۸/۸۳۷۱۷۴	۰/۸۱	۸/۸۳۷۱۷۴
۸۰۰	۳/۲۱۳۵۱	۰/۹۰	۵/۶۲۳۶۵۶	۰/۸۷	۵/۶۲۳۶۵۶	۰/۹۰	۶/۴۲۷۰۳۶	۰/۷۲	۶/۴۲۷۰۳۶

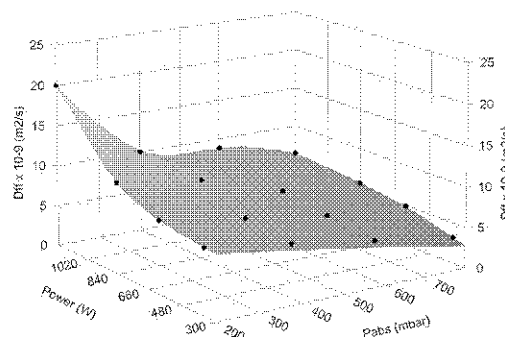
که در رابطه با P توان مایکروویو و P_{abs} میزان فشار اعمال شده می‌باشد.

انرژی فعال سازی

با استفاده از روش اول و با رسم نمودار (K) در مقابل (m/p)، انرژی فعال سازی و (K_0) از رابطه (۶) به دست آمد. مدل میدلی در فشار مطلق ۶۰۰ میلی بار و در توان‌های مختلف مایکروویو بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت. با توجه به ضرایب به دست آمده در مدل میدلی (جدول ۲) مشاهده شد که با افزایش توان مایکروویو، آهنگ ثابت خشک شدن (K) افزایش یافت. با استفاده از آنالیز آماری و با رسم نمودار آهنگ ثابت خشک شدن در برابر وزن نمونه/ توان مایکروویو و با به کارگیری مدل دادالی و همکاران در محیط نرم افزار MATLAB و برازش آن بر داده‌های رسم شده (شکل ۴ الف) مقدار انرژی فعال سازی برای میوه آلبالو حدود ۲۳/۰۴ وات بر گرم به دست آمد.

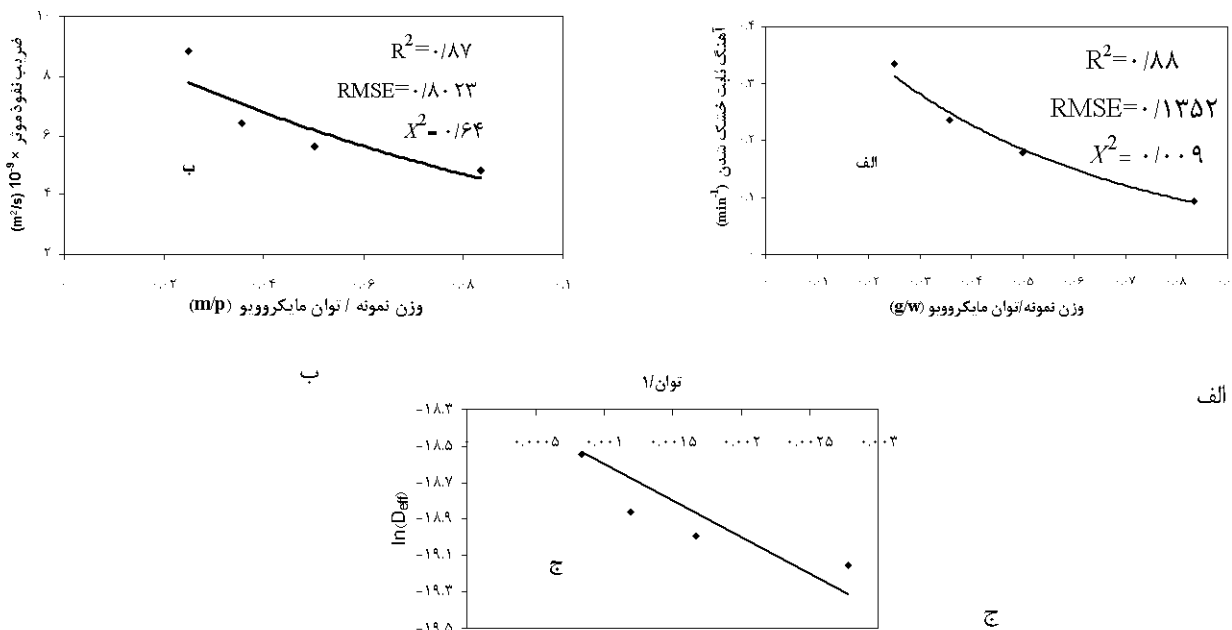
در روش دوم برای به دست آوردن انرژی فعال سازی مقادیر ضریب انتشار رطوبت موثر را در فشار مطلق ۶۰۰ میلی بار و توان‌های مختلف مایکروویو (جدول ۱) را در مقابل (وزن نمونه/ توان مایکروویو) در محیط نرم افزار MATLAB رسم کرده و با استفاده از برازش مدل دادالی و همکاران بر داده‌های رسم شده (شکل ۴ ب) مقدار انرژی فعال سازی را به دست آورد. مقدار انرژی فعال سازی در روش دوم برای میوه آلبالو ۲۱/۲۳ وات بر گرم به دست آمد.

در شکل ۳ نیز با استفاده از تحلیل رگرسیونی چند متغیره، ارتباط همزمان ضریب پخش موثر، توان مایکروویو و میزان خلاء نمایش داده شده است. رابطه ۱۲ یک رابطه رگرسیونی با $R^2=0/9005$ بین ضریب نفوذ موثر، توان مایکروویو و میزان خلاء را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه ۱۲ 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 ۱۲ محاسبه نمود. با استفاده از چنین معادلاتی لزوم انجام آزمایشات در سطوح مختلف توان و فشار هوا بسیار کم می‌شود.



شکل ۳- تاثیر متقابل توان مایکروویو و فشار مطلق بر ضریب انتشار رطوبت موثر هنگام خشک کردن میوه آلبالو با استفاده از خشک کن مایکروویو- خلاء

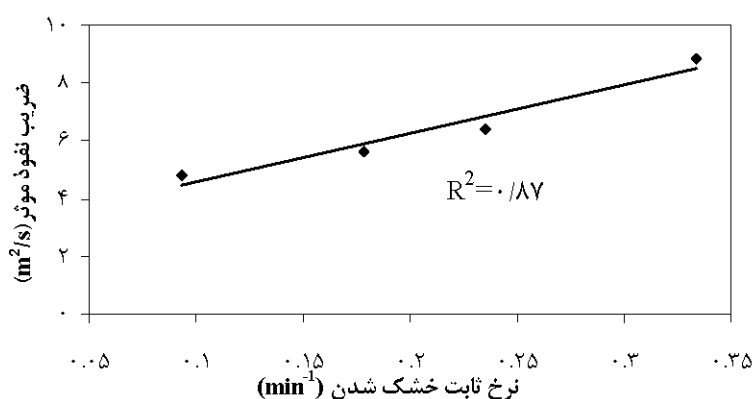
$$D_{eff} = 7/4633 - 0/013607P + 0/008475P_{abs} + 0/00001418P^2 + 0/000000405(P_{abs})^2 - 0/00001599P_{abs} \times P \quad (12)$$



شکل ۴- انرژی فعال سازی محاسبه شده توسط سه روش مختلف (الف) آهنگ ثابت خشک شدن در مقابل m/p (ب) ضریب پخش موثر در مقابل m/p (ج) $\ln D_{eff}$ در مقابل $1/p$

جدول ۲- مقادیر آنالیز آماری و ضرایب مدل میدلی در فشار مطلق ۶۰۰ میلی بار

R^2	χ^2	RMSE	b (min^{-1})	a	n	K (min^{-1})	توان مایکروویو
۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۱۰۰۹	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۱۰۶۲	۱/۰۰۶	۰/۸۴۱۱	۰/۰۹۳۶	۳۶۰
۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۱۷۴۸	۰/۰۰۱۵۸۲	۱/۰۰۵	۰/۷۴۹۶	۰/۰۱۷۸۱	۶۰۰
۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۰۳۰	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۳۹۷۸	۰/۰۰۱	۰/۸۸۷۴	۰/۲۳۵۳	۸۴۰
۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۷۹	۰/۰۰۸۹۰۶	۰/۰۰۲۹۷۷	۰/۰۰۱	۰/۷۱۳۵	۰/۳۳۳۸	۱۲۰۰



شکل ۵- ارتباط بین مقادیر تئوری آهنگ ثابت خشک شدن و مقادیر تئوری ضریب انتشار رطوبت موثر برای میوه آلبالو

سه روش با نتیجه تحقیق بلما و دادالی (۲۰۰۷) مشابهت دارد (Ozbek & Dadali, 2007). رابطه بین آهنگ ثابت خشک شدن و ضریب انتشار رطوبت موثر در شکل (۵) نشان داده شده است. ضریب تعیین (R^2) برای ارتباط بین داده‌ها در شکل زیر ۰/۹۵ به دست آمد که

در روش سوم برای به دست آوردن انرژی فعال سازی از شیب خط نمودار $\ln(D_{eff})$ در مقابل $(1/p)$ استفاده شد (شکل ۴ ج) و با تقسیم شیب نمودار به وزن نمونه ها انرژی فعال سازی تعیین گردید. مقادیر انرژی فعال سازی در حالت سوم برای میوه آلبالو ۲۳/۹۱ وات بر گرم به دست آمد. نتایج به دست آمده در

فهرست نمادها

a, n, D_0, A, K_0	ثابت
D_{eff}	ضریب انتشار رطوبت موثر
D_r	آهنگ تبخیر
dt	فاصله زمانی بین وزن دو وزن گیری (دقیقه)
E_a	انرژی فعال سازی
K	نرخ ثابت خشک شدن
k_1	شیب خط
m	وزن نمونه (گرم)
MC_t	محتوای رطوبت در زمان t (گرم)
MC_{t+dt}	محتوای رطوبت در زمان $t+dt$ (گرم)
M_c	محتوای رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)
M_0	محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)
MR	نسبت رطوبت (بی بعد)
M_t	محتوای رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)
n	تعداد وزن گیری
P	توان مایکروویو (وات)
P_{abs}	فشار مطلق (میلی بار)
r_c	شعاع متوسط (میلی متر)
t	زمان خشک شدن (دقیقه)
v	حجم (متر مکعب)

نشان می‌دهد مقادیر انرژی فعال سازی به دست آمده از دو روش بسیار نزدیک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

رفتار خشک شدن میوه آلبالو به صورت لایه نازک در خشک کن مایکروویو - خلاء در توان‌ها و در خلاءهای مختلف بررسی شد و ملاحظه گردید که خشک شدن میوه آلبالو 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 خلاء ایجاد شده روی داد و بعد از آن با گذشت زمان، آهنگ تبخیر به طور مداوم کاهش یافت. ضریب انتشار رطوبت موثر در خشک کردن میوه آلبالو با خشک کن مایکروویو - خلاء با افزایش توان مایکروویو و افزایش میزان خلاء افزایش یافت. انرژی فعال سازی در خشک کردن مایکروویو - خلاء با ۳ روش محاسبه شد که مقادیر به دست آمده از سه روش بسیار به یکدیگر نزدیک بودند. برای سطوح ثابت فشار خلاء آهنگ ثابت خشک شدن رابطه مستقیمی با توان خروجی مایکروویو و رابطه معکوسی با گرمای بخار آب در همان فشار خلاء داشت.

REFERENCES

- Abbasi, S. & Azari, S. (2009). Novel microwave-freeze drying of onion slices. *International Journal of Food Science & Technology*, 44, 974-979.
- Askari, G.R., Emmam-Djomeh, Z., Mosavi, M.A.E. (2005). Investigation on some physical properties of dried apple slices using a combination of hot air and microwave driers. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 6(24), 1-14.
- Crank, J. (2001) *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press.
- Dadali, G., Apar, D. K. & Ozbek, B. (2007a). Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*, 25(5), 917-924.
- Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of sour-cherry. *Journal of Food Engineering*, 78, 591-596.
- Doymaz, I. (2006). Influence of pretreatment solution on the drying of sour-cherry. *Journal of Food Engineering*, 78, 591-596.
- Drouzas, A. E. & Schubert, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28, 203-209.
- FAO. (2006). Statistical Database. Available from: <http://www.fao.org/>.
- Funebo, T., & Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38, 353-367.
- Giese, J. (1992). Advances in microwave food processing. *Food Technology*, 46, 118-122.
- Ilknur, A. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT*, 40, 1445-1451.
- Jaya, S. & Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21, 1215-1234.
- Kaensup, W., Chutima, S. & Wongwisets, S. (2002). Experimental study on drying of chilli in a combined microwave-vacuum-rotary drum dryer. *Drying Technology*, 20, 2067-2079.
- Karaaslan, S. N. & Tuncer, I. K. (2008). Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 100, 44-52.
- Kompany, E., Benchamol, J., Allaf, K., Ainseba, B. & Bouvier, J. M. (1993). Carrot dehydration for instant rehydration: dehydration kinetics and modeling. *Drying Technology*, 11, 451-470.
- 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.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71-78.
- Mazlomi, M.T., Taslimi, A., Jamshidi, E., Atefi, M., Hajseyed Javadi, N., Komili Fonod, R., Seyed Ahmadiyan, F., Flahat Pishe, H.R., Chobdar, N., Hadiyan, Z., Golestan, B. & Shafiqhi, S.A. (2008). Comparison of drying process effect in vacuum, freeze, solar and microwave with conventional method on properties of saffron. *Journal of The Faculty of Medicine*. 13 (3), 213-223.

- Mohsenin, N. (1996). *Physical Characteristics: Physical Properties of Plant and Animal Materials*. New York, Gordon and Breach Science Publisher.
- Ozbek, B. & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83, 541–549.
- Rizvi, S. S. H. (1996). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A.
- Salimi, A., Maghsodlo, Y., Mirzaei, H.A. and Kashaninejad, M. (2009). Effect of drier type, cultivar, product and water temperature on major components and rehydration ratio of dried potato products. *J. Agric. Sci. Natur. Resour*, 16(1), 1-13.
- Schiffman, R.F. (1992), Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Technology*, 46 (12), 50–52, 56.
- Sharma, G. P. & Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave -hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50, 99–105.
- Sharma, G.P. & Prasad, S. (2004) Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave- convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65, 609–617.
- Shin Kim, S. & Bhowmik, R.S. (1995). Effective moisture diffusivity of plain yoghurt undergoing microwave vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 24, 137–148.
- Soysal, Y. (2004). Microwave drying characteristics of parsley. *Biosystems Engineering*, 89,167–173.
- Wadsworth, J. I., Velupillai, L. & Verma, L. R. (1990). Microwave–vacuum drying of parboiled rice. *Transactions of the ASAE*, 33,199–210.
- Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground Vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc.
- 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.
- Zheng-Wei, C., Shi-Ying, X. & Da-Wen, S. (2004). Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices, *Journal of Food Engineering*, 65, 157–164.