

## مدل سازی برخی خواص حرارتی و فیزیکی مغز بادام در خشک کن خلائى مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو

میثم صفری<sup>۱</sup>، رضا امیری چایجان<sup>۲</sup> و بهنام علائی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۳- دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۲۲ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۳/۱۴	هدف از انجام این مطالعه، ارزیابی تاثیر درجه حرارت هوا، توان میکروویو و فشار خلاء در روند خشک کردن مغز بادام و محاسبه ضریب پخش موثر رطوبت، انرژی فعال سازی، انرژی مصرفی، چروکیدگی و تغییرات کلی رنگ مغز بادام در طی فرآیند خشک کردن بود. در این پژوهش خواص خشک شدن مغز بادام با رطوبت اولیه ۴۷٪ بر پایه خشک در یک خشک کن خلائى مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو با پیش تیمار میکروویو مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش های خشک کردن مغز بادام در سه سطح دمای هوای خشک کن (۴۵، ۶۰ و ۷۵ °C)، سه سطح توان میکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W) و سه فشار خلاء (۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa) و در توان مادون قرمز ۱۰۰ W انجام شد. هفت مدل ریاضی خشک کردن مغز بادام با داده های سینتیک به دست آمده از آزمایش ها برازش داده شد. نتایج نشان داد که مدل میدیلی و همکاران دارای بهترین عملکرد بود. بیشترین و کمترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر به ترتیب $5/33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و $8/03 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمدند. مقادیر انرژی فعال سازی برای مغز بادام بین ۲۸/۷۳ و ۵۱/۸۴ kJ/mol محاسبه شد. بیشترین و کمترین مقدار انرژی مصرفی به ترتیب ۰/۲۶ kWh و ۰/۰۷ kWh به دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار چروکیدگی به ترتیب ۱۴/۱۴٪ و ۷/۷۸٪ تعیین شد. بیشترین میزان تغییر کلی رنگ ۸/۸۵ و کمترین مقدار آن ۲/۶۱ حاصل گردید. با توجه به اهمیت شاخص های کیفی، توصیه می شود که برای داشتن کمترین مقدار چروکیدگی و تغییر رنگ، مغز بادام را در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa خشک کرد.
* عهده دار مکاتبات Email: amirireza@yahoo.com	

### مقدمه

درخت بادام یکی از قدیمی‌ترین درختانی است که در مناطق سردسیری و نیمه‌سردسیری ایران کشت می‌شود. مغز بادام یک منبع مهم انرژی و پروتئین می‌باشد (۲۳). میزان بادام تولیدی ایران در سال ۱۳۹۱ صد هزار تن بوده است (۱۴).

پس از انجام فرآیند پوست‌گیری و قبل از انبار کردن لازم است که رطوبت بادام کاهش یابد. زیرا رطوبت بیش از حد بادام باعث فساد سریع آن می‌شود. این فرآیند باید به طریقی انجام شود که نه تنها مواد غذایی را در مقابل فساد حفظ کند، بلکه به شاخص‌های کیفی محصول، مثل رنگ، عطر، طعم، ارزش غذایی و بافت این مواد کمترین خسارت ممکن وارد شود. میزان رطوبت اولیه برای مغز بادام در هنگام برداشت حدود ۴۵٪ بر پایه خشک می‌باشد که رطوبت نهایی آن در هنگام خشک کردن به حدود ۱۲٪ بر پایه خشک می‌رسد (۲۲). در فرآیند برشته کردن مغز بادام جهت مصرف در آجیل، مقداری از این رطوبت هم کاسته می‌شود.

خشک کردن، فرآیند حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان حرارت و جرم می‌باشد. انتقال حرارت از فضای پیرامون به ماده غذایی، موجب تبخیر رطوبت سطحی می‌شود. همچنین رطوبت می‌تواند از درون جسم به سطح محصول منتقل و سپس تبخیر شود و یا در درون محصول و در حالی میان بخار-مایع، تبخیر گردد و به صورت بخار به سطح محصول آید (۱۲).

طی دو دهه اخیر استفاده از انرژی‌های میکروویو و مادون قرمز به عنوان منبع گرمایش به طور وسیعی گسترش یافته است. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشانگر آن است که استفاده از این نوع انرژی‌ها، ضمن این که آلودگی محیط زیست را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد، فرآیندها را تسریع نموده و در کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش کیفیت محصولات کشاورزی و غذایی نیز مؤثر است (۳۰). از جمله مزایای خشک‌کن خلثی مادون قرمز

با پیش‌تیمار میکروویو مصرف انرژی کمتر و خشک کردن سریع‌تر محصول با حفظ کیفیت آن است (۳۴). در این پژوهش، خشک کردن دو مرحله‌ای بادام در خشک‌کن آزمایشگاهی بررسی شد (۷). آزمایش‌ها در چهار سطح تک دمایی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و شش سطح دو دمایی ۵۰-۶۰، ۶۰-۷۰، ۷۰-۸۰، ۸۰-۶۰ و ۸۰-۷۰ و دو سطح سرعت هوای ۱ و ۲ متر بر ثانیه با سه تکرار انجام گرفت. در پژوهشی، برخی خواص فیزیکی و مکانیکی دو رقم بادام درختی مورد بررسی قرار گرفت (۸).

بررسی‌های انجام شده نشان داد که در زمینه‌ی مدل‌سازی خواص حرارتی و فیزیکی مغز بادام در خشک‌کن خلثی مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو مطالعه‌ای صورت نگرفته است و در نتیجه انجام این امر ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به موارد ذکر شده، اهداف این مطالعه عبارتند از: ارزیابی تاثیر درجه حرارت هوا، توان میکروویو و فشار خلاء در روند خشک کردن مغز بادام در خشک‌کن خلثی مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو و محاسبه خواص حرارتی همچون ضریب پخش موثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی ویژه و محاسبه خواص فیزیکی مانند تغییرات در چروکیدگی و رنگ مغز بادام پس از فرآیند خشک شدن.

### مواد و روش‌ها

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

بادام تازه جهت انجام آزمایش‌ها از باغ‌های بادام شهرستان اسدآباد واقع در استان همدان تهیه و در یخچال در دمای  $1 \pm 4^{\circ}\text{C}$  نگهداری شد. به منظور تعیین رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک، نمونه‌های ۱۰ گرمی مغز بادام به طور تصادفی انتخاب و پس از قرار دادن در ظرف پتری، در داخل آون در دمای  $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شدند (۳۶). برای اطمینان از صحت میزان رطوبت نمونه‌ها، این آزمایش‌ها در ۵ تکرار انجام گردید.

### تجهیزات خشک کن

جهت انجام آزمایش‌ها یک خشک کن خلای مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو ساخته شد (شکل ۱). خشک کن خلای مادون قرمز مورد استفاده از چهار قسمت اساسی شامل محفظه خشک کن خلای، پمپ خلاء، لامپ مادون قرمز و سیستم گرم کن الکتریکی داخل محفظه خلاء تشکیل گردیده است. با توجه به تغییرات درجه حرارت و نیاز به ثبات در دمای آزمایش، لامپ مادون قرمزی که برای گرم کردن محفظه خلاء به کار رفته است به طور مجزا از طریق یک واحد کنترل دما با یک سنسور نوع k و با دقت  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  (مدل Lutron TM-903، ساخت تایوان) روشن و خاموش می‌شد. شرایط خلاء در محفظه خشک کن توسط یک پمپ خلاء (مدل DV-285N-250-PLATINUM، ساخت آمریکا) ایجاد شد. کنترل کننده فشار به منظور تعریف و حفظ فشار مطلق در محفظه خشک کن با دقت  $0.001$  بار (مدل Sensys PSCH0001 BCII، ساخت کره) در طول آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. دمای محفظه خشک کن توسط یک لامپ مادون قرمز ۱۰۰ واتی تامین شد. برای توزین نمونه‌ها از یک ترازوی الکتریکی (مدل AND GF6000، ساخت ژاپن) با قابلیت تفکیک  $0.001\text{ g}$  استفاده گردید. در طی فرآیند خشک کردن، رطوبت نسبی و دمای هوا توسط یک رطوبت سنج (مدل Lutron TM-903، ساخت تایوان) با دقت  $\pm 3\% \text{ RH}$  اندازه گیری شد. دستگاه میکروویو مورد استفاده (مدل Sharp 959slma، ساخت تایلند) دارای قابلیت‌های تنظیم توان میکروویو در زمان‌های مورد نظر با قابلیت تفکیک یک ثانیه بود.

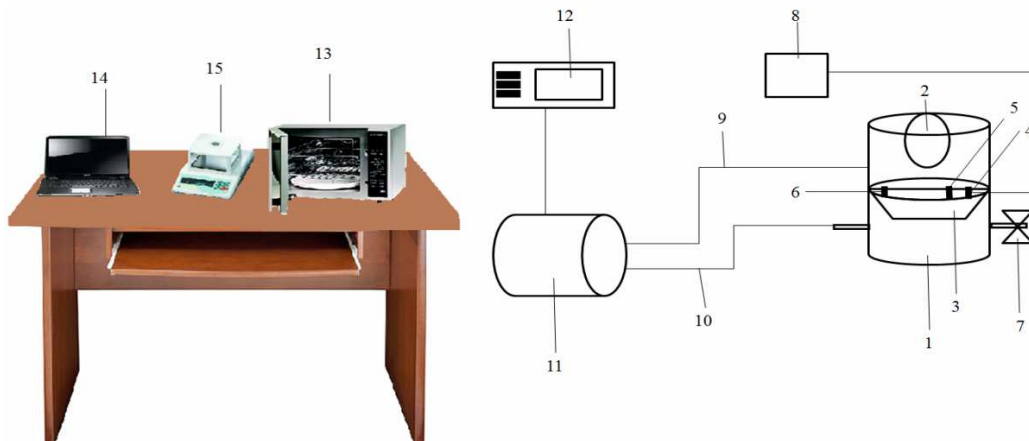
### روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های خشک کردن دانه‌های بادام در سه سطح دمایی  $45^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$  و  $75^{\circ}\text{C}$ ، سه توان میکروویو  $270\text{ W}$ ،  $450\text{ W}$  و  $630\text{ W}$  و سه فشار خلاء  $20\text{ kPa}$ ،  $40\text{ kPa}$  و  $60\text{ kPa}$  انجام شد. در تحقیقی نمونه‌های بادام در چهار سطح  $40$ ،  $55$ ،

$70$  و  $85$  درجه سلسیوس، خشک شد که پس از بررسی‌های لازم، در این آزمایش از سه دمای  $45$ ،  $60$  و  $75^{\circ}\text{C}$  برای خشک کردن بادام استفاده شد (۶). در پژوهشی دیگر، برای خشک کردن انار از فشارهای خلاء  $2$ ،  $20$ ،  $40$  و  $60$  کیلوپاسکال استفاده گردید که از بین این سطوح، سه سطح  $20$ ،  $40$  و  $60\text{ kPa}$  برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد (۲). دستگاه میکروویو مورد استفاده در آزمایش‌ها در پنج سطح توانی بین  $90$  تا  $810$  وات قابل تنظیم بود که از این بین سه سطح توانی  $270$ ،  $450$  و  $630\text{ W}$  برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. حدود  $30$  دقیقه پس از روشن کردن خشک کن هنگامی که خشک کن به شرایط پایدار رسید آزمایش‌ها شروع می‌شد. نمونه‌های وزن شده (حدود  $15$  گرم) به منظور تسریع فرآیند خشک کردن و همچنین بررسی تاثیر دستگاه میکروویو بر روی کیفیت فرآیند خشک کردن بادام، به مدت  $20$  ثانیه در میکروویو قرار داده می‌شدند و پس از خارج کردن نمونه‌ها از میکروویو توسط ترازوی دیجیتال وزن می‌شدند و پس از آن به مدت پنج دقیقه در خشک کن خلاء-مادون قرمز قرار داده می‌شدند و مجدداً توزین می‌شدند. آزمایش‌ها در سه تکرار صورت گرفت. زمان مورد نیاز برای خشک کردن نمونه‌ها به عنوان زمان مورد نیاز جهت کاهش رطوبت نمونه‌ها به  $0.1$  گرم آب در هر گرم ماده خشک در نظر گرفته شد. این مقدار رطوبت که معادل ده درصد رطوبت بر پایه‌ی خشک است با توجه به محاسبه میزان رطوبت بادام‌های خشک شده توسط باغداران و به صورت تجربی به دست آمد.

### برازش منحنی‌های خشک کردن

برای یافتن یک مدل ریاضی مناسب، داده‌های محتوای رطوبت در توان‌های متفاوت میکروویو، دماهای مختلف خشک کردن هوا و فشارهای مختلف خلاء به نسبت رطوبت تبدیل شدند که با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.



شکل (۱) شکل شماتیک خشک‌کن خلأی مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو (۱- محفظه خشک‌کن، ۲- لامپ مادون-قرمز، ۳- محفظه نمونه، ۴- سنسور دما، ۵- ترموستات، ۶- سنسور فشار، ۷- شیر فشارشکن، ۸- ترمومتر، ۹- لوله مکش، ۱۰- درزبند خلأ، ۱۱- پمپ خلأ، ۱۲- کنترل‌کننده فشار، ۱۳- دستگاه میکروویو، ۱۴- کامپیوتر و ۱۵- ترازوی دیجیتال)

Figure (1) Schematic diagram of infrared-vacuum dryer with microwave pretreatment (1- dryer chamber, 2- infrared lamp, 3- almond kernel chamber, 4- temperature sensor, 5- thermostat, 6- pressure sensor, 7- vacuum pressure control valve, 8- thermometer, 9- suction pipe, 10- vacuum gasket, 11- vacuum pump, 12- pressure controller, 13- microwave oven, 14- computer and 15- digital balance)

باید مدلی را انتخاب کرد که دارای بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار  $\chi^2$  و RMSE باشد (۱۳).

#### محاسبه ضریب پخش موثر رطوبت

فرآیندهای خشک‌کردن مواد غذایی در یک دوره کاهشی صورت می‌پذیرند. در این مرحله برای تعیین ضریب پخش موثر رطوبت با فرض ثابت بودن آن و یک‌نواخت بودن توزیع رطوبت از قانون دوم فیک طبق معادله (۲) استفاده شد (۹).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \nabla[D_e(\nabla M)] \quad (2)$$

که در آن  $D_e$  ضریب پخش موثر ( $m^2/s$ )،  $M$  محتوای رطوبت ( $kg_w/kg_{ds}$ ) و  $t$  زمان خشک‌شدن (s) است.  $D_e$  جهت مکانیزم انتقال رطوبت را بیان می‌کند. این پارامتر به طور کلی از منحنی‌های تجربی خشک‌شدن تعیین می‌شود. با حل تحلیلی معادله (۲) و در صورت کروی فرض کردم مغز بادام، نسبت رطوبت را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن  $MR$  نسبت رطوبت نمونه‌ها و  $M_e$  محتوای رطوبت تعادلی نمونه‌ها بر پایه خشک (%d.b.) و  $M_0$  محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها (%d.b.) است. برای انجام مدل‌سازی ریاضی، هفت مدل خشک‌کردن (جدول ۱) با داده‌های به دست آمده از آزمایش برای یافتن مناسب‌ترین مدل جهت تشریح رفتار خشک‌شدن مغز بادام در خشک‌کن خلأ-مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو برآزش داده شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و انتخاب بهترین مدل برای بیان رفتار خشک‌کردن مغز بادام از نرم‌افزار Curve Expert نسخه ۱/۴ استفاده شد.

از ضریب تبیین ( $R^2$ ) به عنوان معیار اصلی برای انتخاب بهترین مدل استفاده شد (۴۰). علاوه بر  $R^2$ ، سایر اطلاعات آماری از قبیل دو شاخص  $\chi^2$  و ریشه مربعات خطای میانگین (RMSE) نیز برای تطبیق مدل با داده‌های به دست آمده از آزمایش محاسبه شدند. برای بیان بهترین مطابقت،

جدول (۱) معادلات ریاضی خشک کردن مرجع به کاررفته در خشک کن خلائ مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو مغز بادام

Table (1) Mathematical drying equations references used in infrared-vacuum dryer with microwave pretreatment

مرجع Reference	معادله Equation	نام مدل Model name
(۲۷)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i>
(۱۹)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis
(۳۳)	$MR = \exp(-kt^n)$	Page
(۱۰)	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
(۵)	$MR = \exp(-kt)$	Newton
(۳۸)	$MR = 1 + bt + at^2$	Wang and Singh
(۱۲)	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic

$$EC_1 = P_{MW} \times t \quad (۶)$$

که در آن  $EC_1$  انرژی مصرفی خشک کن میکروویو (kWh)،  $P_{MW}$  توان میکروویو (kW) و  $t$  زمان خشک کردن (s) می باشد. انرژی مصرفی در پمپ خلاء و لامپ مادون قرمز در خشک کن خلاء-مادون قرمز با استفاده از معادله های (۷) و (۸) محاسبه می شود (۲۹).

$$EC_2 = L \times t \quad (۷)$$

$$EC_3 = P_V \times t \quad (۸)$$

که در آن  $EC_2$  انرژی مصرفی پمپ خلاء،  $EC_3$  انرژی مصرفی لامپ مادون قرمز (kWh)،  $L$  قدرت اسمی پمپ خلاء (kW) و  $P_V$  توان لامپ مادون قرمز (kW) می باشد.

انرژی مصرفی در خشک کن خلاء-مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو از رابطه (۹) بدست آمد.

$$EC_t = EC_1 + EC_2 + EC_3 \quad (۹)$$

که در آن  $EC_t$  بیانگر انرژی مصرفی کل (kWh) خواهد بود.

### چروکیدگی

چروکیدگی به صورت حجم نهایی به حجم اولیه محصول خشک شده تعریف می گردد (۲۴). برای

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) + \left(-\frac{\pi^2 D_e t}{r_0^2}\right) \quad (۳)$$

که در آن  $t$  زمان خشک شدن (s) و  $r_0$  شعاع کره (m) می باشد. با رسم نمودار  $\ln(MR)$  نسبت به زمان، خطی با شیب  $k_1$  به دست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه (۳)، ضریب پخش موثر را می توان از رابطه (۴) به دست آورد (۳۵).

$$K_1 = \left(\frac{D_e \pi^2}{r_g^2}\right) \quad (۴)$$

که در آن  $r_g$  بیانگر شعاع میانگین هندسی بادام (m) است. با رسم نمودار  $\ln(D_e)$  در مقابل  $\frac{1}{T}$  (عکس دمای مطلق) مطابق معادله (۵) خطی با شیب  $k_2$  به دست خواهد آمد که برابر با  $-\frac{E_a}{R_g}$  خواهد بود (۳۱).

$$K_2 = \frac{E_a}{R_g} \quad (۵)$$

### انرژی مصرفی

انرژی مصرفی (EC) عبارت است از کل انرژی مصرف شده در طول زمان روشن بودن دستگاه خشک کن خلاء-مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو. میزان انرژی مصرفی در دستگاه میکروویو با استفاده از معادله (۶) محاسبه می شود (۳۰).

های  $a^*$  و  $b^*$  دارای محدوده ۱۲۰- تا ۱۲۰ هستند. در نهایت تغییر رنگ کلی رنگ ( $\Delta E$ ) با استفاده از معادله (۱۳) بدست آمد (۱۵).

(۱۳)

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}$$

که در آن  $\Delta E$  بیانگر تغییرات کلی رنگ،  $L_0^*$ ،  $a_0^*$  و  $b_0^*$  مقادیر قبل از خشک کردن و  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  مقادیر بعد از خشک کردن مغز بادام خواهد بود.

### نتایج و بحث

#### سینتیک خشک کردن

منحنی‌های خشک کردن مغز بادام در خشک کن خلاء-مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو در سه سطح توان میکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W و سه سطح فشار خلاء ۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa در دماهای مختلف ۴۵، ۶۰ و ۷۵ °C و در توان مادون قرمز ۱۰۰ W در شکل ۲ نشان داده شده است.

علت کوتاه شدن زمان خشک کردن با افزایش دما و توان، افزایش انرژی درونی نمونه‌ها یعنی انرژی جنبشی مولکولی و افزایش فشار اشباع بخار نمونه‌ها نسبت به محیط اطراف می‌باشد و در نتیجه رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه خواهد بود. همچنین با کاهش فشار خلاء، مدت زمان خشک شدن مغز بادام کاهش یافت. نتایج مشابهی در مطالعه بر روی خشک کردن هویج، کدو و قارچ به دست آمده است که در آن با افزایش دمای خشک کردن و همچنین کاهش فشار خلاء، زمان خشک شدن محصول کاهش یافت (۳، ۱۷). همچنین نتایج به دست آمده بیانگر این بود که توان میکروویو و فشار خلاء در مقابل دمای هوای ورودی، تاثیر کمتری بر فرآیند خشک کردن مغز بادام داشتند.

اندازه‌گیری مقدار چروکیدگی مغز بادام، در ابتدا و انتهای هر آزمایش توسط یک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی متر، سه بعد عمود بر هم نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید و سپس با استفاده از معادله (۱۰) قطر میانگین هندسی نمونه‌ها ( $D_g$ ) در ابتدا و انتهای هر آزمایش محاسبه شد (۱۶).

$$D_g = (L \times W \times T)^{1/3} \quad (10)$$

که در آن  $L$ ،  $W$  و  $T$  به ترتیب بیانگر قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک ( $m$ ) مغز بادام است، سپس حجم اولیه و ثانویه نمونه‌ها با استفاده از معادله (۱۱) به دست آمد (۲۸).

$$V_a = \pi \left( \frac{D_g}{6} \right)^3 \quad (11)$$

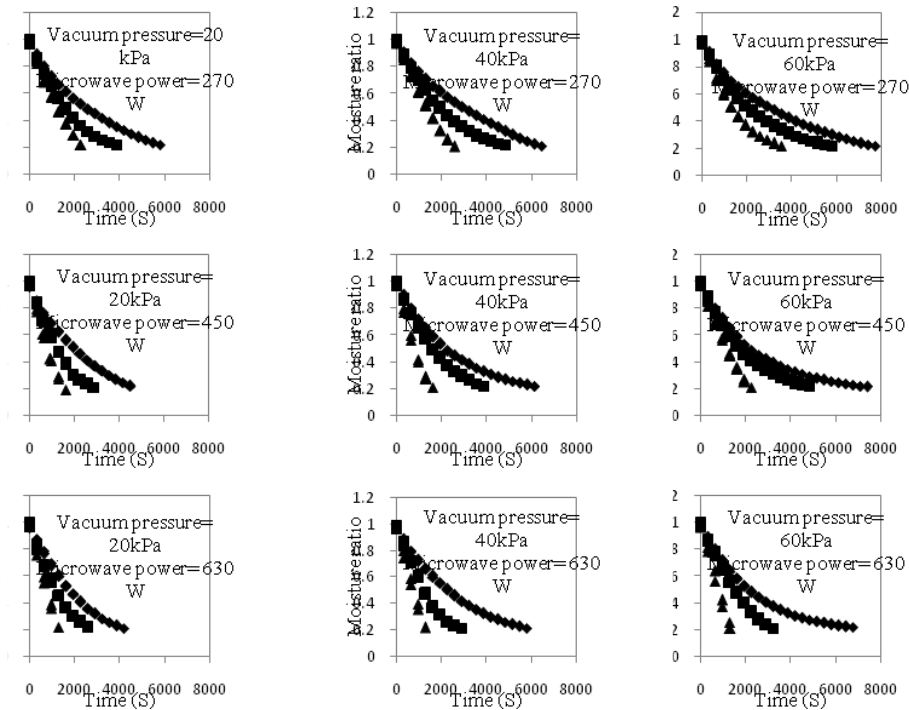
که در آن  $V_a$  بیانگر حجم مغز بادام ( $m^3$ ) خواهد بود. با استفاده از معادله (۱۲) درصد چروکیدگی محصول محاسبه شد (۲۶).

$$S(\%) = \frac{(V_0 - V_a)}{V_0} \times 100 \quad (12)$$

که در آن  $V_0$  حجم اولیه یا حجم قبل از خشک کردن ( $m^3$ ) و  $S$  بیانگر درصد چروکیدگی مغز بادام می‌باشد.

#### رنگ

در این پژوهش، مختصات رنگی  $L^*a^*b^*$  مغز بادام (۳۰ نمونه برای هر آزمایش)، قبل و بعد از خشک کردن با استفاده از روش اسکن دانه‌های بادام توسط اسکنر (مدل G4050 HP، ساخت آمریکا) با استفاده از نرم-افزار فتوشاپ، اندازه‌گیری شد. در این مدل، رنگ‌ها با سه پارامتر مشخص می‌شوند که عبارتند از میزان درخشندگی که با  $L^*$  مشخص می‌شود و دارای محدوده ۰ تا ۱۰۰ است. رنگ مشکی وقتی پدید می‌آید که مقدار درخشندگی صفر باشد و رنگ سفید وقتی پدید می‌آید که میزان درخشندگی صد باشد. میزان رنگ از سبز به قرمز که با  $a^*$  مشخص می‌شود و میزان رنگ از آبی به زرد که با  $b^*$  مشخص می‌شود. لایه-



شکل (۲) نمودارهای خشک کردن مغز بادام در خشک کن خلأی مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو (۴۵°C، ۶۰°C و ۷۵°C) (▲ و ◻)

Figure (2) Drying curves of almond kernels in Infrared-Vacuum dryer with microwave pretreatment (45°C, 60°C and 75°C)

### ضرب پخش موثر رطوبت

مقدار ضریب پخش موثر رطوبت برای محصولات کشاورزی بین  $10^{-9}$  و  $10^{-11}$   $m^2/s$  است. بیشترین مقدار ضریب پخش موثر ( $5/33 \times 10^{-9}$   $m^2/s$ ) در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلأ ۲۰ kPa و کمترین مقدار ضریب پخش موثر ( $7/03 \times 10^{-11}$   $m^2/s$ ) در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلأ ۶۰ kPa به دست آمد. مقادیر به دست آمده برای ضریب پخش موثر رطوبت در شکل ۳ ارائه شده است. مشاهده شد که با افزایش دمای محفظه خشک کن و توان میکروویو، مقدار ضریب پخش موثر رطوبت به دلیل از دست رفتن سریعتر آب در دما و توان بالا افزایش یافت. این امر به این دلیل است که افزایش مصرف انرژی و حرارت باعث افزایش فعالیت مولکول‌های آب و در نتیجه نفوذ بیشتر رطوبت به خارج محصول در دماها و توان‌های بالاتر شد (۳۸).

### مدل سازی ریاضی سینتیک خشک کردن

مقادیر میانگین به دست آمده  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE برای تمامی مدل‌ها محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است. در بین تمام مدل‌های بررسی شده، مدل میدیلی و همکاران بهترین مدل برای تمام دماها، فشارهای خلأ و در تمام توان‌های مورد آزمایش بود. انتخاب این مدل به دلیل مقادیر بالای  $R^2$  و مقادیر پایین  $\chi^2$  و RMSE در تمام شرایط آزمایش بود. نتایج مطالعه بر روی سیب بیانگر این امر بود که مدل میدیلی و همکاران بهترین مدل برای بیان توضیح رفتار خشک شدن سیب است (۲۵). در مطالعه انجام شده بر روی بادمجان نتایج مشابهی به دست آمد که در آن مدل میدیلی و همکاران، می‌توانست برای مدل سازی خروج رطوبت از بادمجان استفاده شود (۱۳). نتایج بدست آمده برای مدل میدیلی و همکاران در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۲) مقادیر میانگین به دست آمده برای  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE برای تمامی مدل‌ها برای خشک کردن مغز بادام در خشک‌کن خلأی مادون قرمز با پیش‌تیمار میکروویو

Table (2) Obtained mean value of  $R^2$ ,  $\chi^2$  and RMSE for all models for drying of almond kernels in Infrared-Vacuum dryer with microwave pretreatment

مدل Model	کای دو ( $\chi^2$ )	خطا (RMSE)	ضریب تبیین ( $R^2$ )
Midilli <i>et al.</i>	0.0754	0.0011	0.999
Modified Henderson and Pabis	0.0989	0.0048	0.9946
Page	0.1017	0.0035	0.9976
Henderson and Pabis	0.1321	0.0109	0.9916
Newton	0.1446	0.016	0.9887
Wang and Singh	0.1125	0.0082	0.9954
Logarithmic	0.0901	0.002	0.9983

### انرژی فعال‌سازی

مقدار انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ ) برای مغز بادام بین ۲۸/۷۳ و ۵۱/۸۴ kJ/mol به دست آمد (جدول ۵). مقادیر حاصله برای انرژی فعال‌سازی مغز بادام در محدوده توصیه شده برای محصولات کشاورزی (۱۲/۷ تا ۱۱۰ kJ/mol) توسط محققان قبلی است (۱). مقدار انرژی فعال‌سازی نشان‌دهنده مقدار انرژی لازم جهت آغاز انتقال جرم از بدنه محصول می‌باشد. در صورتی که آب به صورت سطحی جذب ماده باشد به انرژی کمتری برای شروع تبخیر نیاز دارد. انرژی فعال‌سازی برای توت فرنگی بین ۳۰/۴۶ و ۳۵/۵۷ kJ/mol و برای لوبیا سبز ۳۵/۴۳ kJ/mol به دست آمدند (۲۰، ۱۱). آب موجود در میوه‌ها و محصولات کشاورزی به دو صورت آزاد و پیوندی می‌باشد. دلیل پایین بودن انرژی فعال‌سازی مغز بادام این است که قسمت بیشتر آب موجود در بافت‌های بادام به صورت سطحی و آزاد است و پیوند بین آب و مولکول‌های مغز بادام چندان قوی نیست، به همین دلیل برای تبخیر آب موجود در مغز بادام به مقدار انرژی کمی در طی دوره خشک کردن نیاز است.

با افزایش فشار خلأ، ضریب پخش موثر کاهش یافت. در مطالعه‌ای که بر روی ترب سفید در خشک‌کن خلأی صورت گرفت، مشاهده شد که با افزایش دما مقدار ضریب پخش موثر نیز، افزایش یافت (۲۱). نتایج مشابهی در مطالعه صورت گرفته بر روی خشک کردن موز در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز و خلأی (۳۳) به-دست آمد. در تحلیل صورت گرفته بر روی داده‌ها، اثر متقابل دمای هوا-توان میکروویو در سطح ۱٪ و اثر فشار خلأ در سطح ۱٪ معنی دار شدند. نتایج حاصل از روش تحلیل آماری برای ضریب پخش موثر رطوبت در جدول ۴ نشان داده شده است. معادله (۱۴) مقادیر پیش‌بینی شده برای ضریب پخش موثر را بر اساس تابعی از دمای هوا، توان میکروویو و فشار خلأ بیان می‌کند.

$$D_e = 1.1 \times 10^{-8} - 3.2 \times 10^{-10} T - 1.1 \times 10^{-11} P_{MW} - 5.7 \times 10^{-12} P_v + 2.24 \times 10^{-13} T P_{MW} - 2.6 \times 10^{-13} T P_v + 2.88 \times 10^{-14} P_{MW} P_v + 2.7 \times 10^{-12} T^2 - 1.4 \times 10^{-16} P_{MW}^2 - 1.3 \times 10^{-13} P_v^2$$

$$R^2 = 0.9840$$

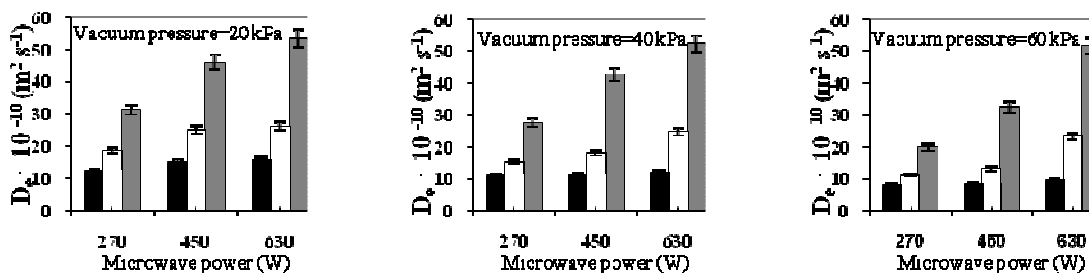
(۱۴)



جدول (۳) نتایج حاصل شده برای مدل میدیلی و همکاران برای خشک کردن مغز بادام در خشک کن خلأی مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو

Table (3) The results obtained for Midilli *et al.* model for drying of almond kernels in infrared-vacuum dryer with microwave pretreatment

دما Temperature (°C)	توان میکروویو Microwave power (W)	فشار خلأ Vacuum pressure (kPa)	ضرایب مدل Model coefficients			ضرایب مدل Model coefficients			
			$\chi^2$	RMSE	R <sup>2</sup>	a	k	n	b
45	270	20	0.0005	0.0590	0.9997	0.9981	1.2911	0.8368	-0.0535
60	270	20	0.0004	0.0620	0.9997	0.9905	2.0606	1.1059	0.0952
75	270	20	0.0002	0.0528	0.9998	0.9958	1.0338	1.0005	-0.1324
45	270	40	0.0009	0.0664	0.9996	1.0014	1.0721	0.8127	-0.1327
60	270	40	0.0003	0.0524	0.9998	0.9941	2.0875	1.0928	0.0949
75	270	40	0.0006	0.0711	0.9995	0.9952	1.2728	1.1339	-0.0757
45	270	60	0.0010	0.0652	0.9996	1.0030	1.4446	0.8068	-0.0179
60	270	60	0.0006	0.0619	0.9997	1.0005	2.0757	0.9822	0.0976
75	270	60	0.0006	0.0677	0.9996	0.9940	2.1875	1.0726	0.1146
45	450	20	0.0008	0.0696	0.9995	0.9887	1.2479	0.8646	-0.0629
60	450	20	0.0013	0.0857	0.9990	0.9875	2.1602	1.2107	0.0942
75	450	20	0.0006	0.0757	0.9993	0.9917	1.6011	1.2574	-0.0031
45	450	40	0.0008	0.0643	0.9996	0.9973	2.0531	0.9863	0.0994
60	450	40	0.0007	0.0693	0.9995	0.9914	1.9936	1.1123	0.0879
75	450	40	0.0007	0.0795	0.9991	0.9923	1.8275	1.2812	0.0527
45	450	60	0.0019	0.0779	0.9992	0.9990	2.3883	0.9558	0.1380
60	450	60	0.0009	0.0711	0.9995	0.9954	2.1966	1.0491	0.1121
75	450	60	0.0013	0.0895	0.9986	0.9930	1.1836	1.0908	-0.1020
45	630	20	0.0011	0.0766	0.9993	0.9852	1.8181	1.0941	0.0524
60	630	20	0.0008	0.0777	0.9992	0.9905	1.6583	1.0749	0.0300
75	630	20	0.0013	0.0940	0.9979	0.9926	1.0105	1.2268	-0.1424
45	630	40	0.0011	0.0714	0.9994	0.9863	1.6950	0.9647	0.0334
60	630	40	0.0018	0.0935	0.9985	0.9840	2.2245	1.2610	0.1014
75	630	40	0.0021	0.1064	0.9966	0.9944	0.9763	1.1791	-0.1543
45	630	60	0.0007	0.0622	0.9997	0.9942	2.3396	0.9836	0.1296
60	630	60	0.0016	0.0888	0.9988	0.9863	1.5887	1.1691	0.0005
75	630	60	0.0041	0.1252	0.9944	0.9899	1.0597	1.3423	-0.1121



شکل (۳) مقادیر به دست آمده برای ضریب پخش موثر مغز بادام (۴۵°C، ۶۰°C و ۷۵°C)

Figure (3) Effective moisture diffusivity coefficient for almond kernels (45 °C, 60 °C and 75 °C)

شرایط مختلف، در شکل ۵ نشان داده شده است. دمای هوا بیشترین تاثیر را بر میزان چروکیدگی داشت. با افزایش دما و توان میکروویو، میزان چروکیدگی نیز افزایش یافت. همچنین مشاهده گردید که با افزایش فشار، مقدار چروکیدگی افزایش یافت. دلیل این امر، آن است که وقتی که در طول فرآیند خشک شدن، آب از مغز بادام خارج می شود، عدم تعادل فشار بین مغز بادام در محفظه خشک کن و محیط بیرون ایجاد می شود که می تواند باعث اعمال تنش و در نتیجه سبب چروکیدگی بادام گردد. بنابراین در فشار خلاء کمتر و در نتیجه در اختلاف فشار کمتر بین داخل محفظه خشک کن و بیرون آن، مقدار چروکیدگی مغز بادام کمتر بود (۴). در مطالعه ای که بر روی برپاس صورت گرفت با افزایش دما و فشار خلاء، مقدار چروکیدگی افزایش یافت (۴). نتایج حاصل از روش تحلیل آماری، نشان دهنده تاثیر معنی دار دمای هوا، توان میکروویو و فشار خلاء بر روی چروکیدگی در سطح ۱٪ در طی فرآیند خشک کردن مغز بادام است که احتمالاً با توجه به این واقعیت که دمای هوا و توان میکروویو بالاتر، باعث انتقال جرم سریع تر در مغز بادام شده و بر این اساس محصول بیشتر دچار چروکیدگی می شود. در طی فرآیند خشک شدن مغز بادام، آب درون بافتی تبخیر شده و همین امر باعث کاهش فشار مایع و تنش در دیواره سلولی آن و در نهایت منجر به چروکیدگی محصول می شود (۱۸). نتایج حاصل از روش تحلیل آماری برای چروکیدگی در جدول ۷ نشان داده شده است. معادله (۱۶) مقادیر پیش بینی شده برای چروکیدگی را بر اساس تابعی از دمای هوا، توان میکروویو و فشار خلاء بیان می کند.

### انرژی مصرفی

بیشترین مقدار انرژی مصرفی (۰/۲۶ kWh) در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa و کمترین مقدار انرژی مصرفی (۰/۰۷ kWh) در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلاء ۶۰ kPa به دست آمد. مقادیر محاسبه شده برای انرژی مصرفی در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، با افزایش دمای هوا، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافت. هنگامی که دمای هوا افزایش یافت، زمان مورد نیاز برای خشک شدن محصول نیز کاهش یافت. بنابراین انرژی مصرفی نیز کاهش می یابد. در مطالعاتی که بر روی کدو و میوه زرشک صورت گرفت، نتایج مشابهی به دست آمد (۱ و ۳۵). نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش توان میکروویو و فشار خلاء، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافت که دلیل آن استفاده بیشتر از انرژی میکروویو در مدت زمان خشک کردن به جای استفاده از انرژی حرارتی در خشک کن خلائی مادون قرمز است. با استفاده از روش تحلیل آماری، مشاهده شد که اثر متقابل دما-توان میکروویو و اثر متقابل دما-فشار خلاء در سطح ۱٪ بر انرژی مصرفی معنی دار شدند. نتایج حاصل از روش تحلیل آماری برای انرژی مصرفی در جدول ۶ نشان داده شده است. رابطه بین پارامترهای ورودی و انرژی مصرفی به صورت معادله (۱۵) حاصل شد.

### چروکیدگی

بیشترین مقدار چروکیدگی (۱۴/۱۴٪) در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلاء ۶۰ kPa و کمترین مقدار آن (۷/۷۸٪) در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa به دست آمد. مقادیر به دست آمده برای

## رنگ

امر، وجود اکسیژن کمتر در فشار خلاء پایین تر در داخل محفظه خشک کن است. نتیجه مشابهی در مطالعه بر روی برپاس مشاهده شد که در آن میزان تغییر رنگ محصول با زیاد شدن دما و فشار خلاء، افزایش یافت (۴). شکل ۶ نشان دهنده مقادیر به دست آمده برای  $\Delta E$  در آزمایش‌های گوناگون است. معادله (۱۷) مقادیر پیش‌بینی شده برای تغییرات رنگ را بر اساس تابعی از دمای هوا، توان میکروویو و فشار خلاء بیان می‌کند. تمامی معادلات اشاره شده در متن با استفاده از روش آنالیز آماری ANOVA بدست آمده‌اند.

با توجه به اهمیت شاخص‌های کیفیت (رنگ و چروکیدگی) در این پژوهش، می‌توان دریافت که کمترین تغییرات رنگ ( $\Delta E = 2/61$ ) و چروکیدگی ( $1/7/78$ ) در دمای  $45^\circ\text{C}$ ، توان میکروویو  $270\text{ W}$  و فشار خلاء  $20\text{ kPa}$  حاصل شدند. با توجه به مقدار اهمیت متغیرهای مستقل و اولویت‌های تولید، این نقطه تغییر می‌کند.

بیشترین میزان تغییر رنگ ( $\Delta E = 8/85$ ) در دمای  $45^\circ\text{C}$ ، توان میکروویو  $630\text{ W}$  و فشار خلاء  $60\text{ kPa}$  و کمترین مقدار آن ( $\Delta E = 2/61$ ) در دمای  $45^\circ\text{C}$ ، توان میکروویو  $270\text{ W}$  و فشار خلاء  $20\text{ kPa}$  بدست آمد. نتایج حاصل از روش تحلیل آماری، نشان دهنده تاثیر معنی‌دار اثر متقابل دمای هوا-توان میکروویو در سطح  $1\%$  و اثر فشار خلاء در سطح  $1\%$  بر روی  $\Delta E$  در طی فرآیند خشک کردن مغز بادام است. نتایج حاصل از روش تحلیل آماری برای میزان تغییر رنگ در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش دمای هوا، میزان تغییر رنگ محصول بیشتر خواهد شد. دلیل این امر افزایش واکنش‌های قهوه‌ای شدن در طی افزایش دمای هوا است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش توان میکروویو، تغییر رنگ افزایش می‌یابد که علت آن، بروز سوختگی سطحی در توان‌های بالاتر است. افزایش فشار خلاء نیز باعث بیشتر شدن میزان تغییر رنگ شد. دلیل این

$$EC_i = 0.1 - 9.35 \times 10^{-3} T - 5.70 \times 10^{-5} P_{MW} - 1.38 \times 10^{-3} P_V - 2.90 \times 10^{-6} TP_{MW} + 3.88 \times 10^{-5} TP_V - 3.97 \times 10^{-7} P_{MW} P_V - 1.06 \times 10^{-4} T^2 + 9.84 \times 10^{-8} P_{MW}^2 - 2.35 \times 10^{-5} P_V^2 \quad R^2 = 0.9798 \quad (15)$$

$$S = -1.65 + 0.21 T + 4.99 \times 10^{-4} P_{MW} + 5.32 \times 10^{-3} P_V + 1.14 \times 10^{-5} TP_{MW} - 7.52 \times 10^{-5} TP_V + 6.39 \times 10^{-6} P_{MW} P_V - 2.40 \times 10^{-4} T^2 + 7.42 \times 10^{-7} P_{MW}^2 + 2.19 \times 10^{-5} P_V^2 \quad R^2 = 0.9994 \quad (16)$$

$$\Delta E = -4.74 + 0.06 T + 0.02 P_{MW} + 0.02 P_V - 1.07 \times 10^{-4} TP_{MW} - 2.87 \times 10^{-5} TP_V - 3.73 \times 10^{-5} P_{MW} P_V + 3.94 \times 10^{-4} T^2 - 4.83 \times 10^{-6} P_{MW}^2 + 1.14 \times 10^{-4} P_V^2 \quad R^2 = 0.9715 \quad (17)$$

جدول (۴) نتایج آنالیز آماری به دست آمده برای ضریب پخش موثر مغز بادام

Table (4) Results of fitting quadratic models to the data for effective moisture diffusivity of almond kernel

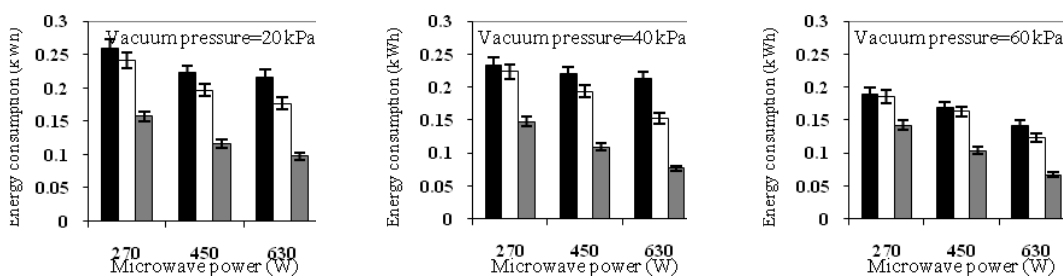
میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی DF	منبع Source
$8.05 \times 10^{-18} **$	2	T
$7.12 \times 10^{-19} **$	2	$P_{MW}$
$1.07 \times 10^{-18} **$	2	$P_V$
$4.38 \times 10^{-18} **$	4	$T \times P_{MW}$
$7.17 \times 10^{-20} \text{ ns}$	4	$T \times P_V$
$1.29 \times 10^{-19} \text{ ns}$	4	$P_{MW} \times P_V$
$1.71 \times 10^{-19} **$	8	$T \times P_{MW} \times P_V$
$1.58 \times 10^{-20}$	54	Error
	80	Total

T=Temperature,  $P_{MW}$ =Microwave power,  $P_V$ = Infrared power  
\*\* Significant at %1, \* Significant at %5, ns Non significant

جدول (۵) مقادیر به دست آمده برای انرژی فعال‌سازی در شرایط مختلف خشک کردن مغز بادام در خشک‌کن خلأی مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو

Table (5) Activation energy values obtained for various drying conditions of almond kernels in infrared-vacuum dryer with microwave pretreatment

انرژی فعال‌سازی Activation Energy (kJ mol <sup>-1</sup> )	ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )	توان میکروویو Microwave power (W)	فشار خلأ Vacuum pressure (kPa)
28.73	0.9986	270	20
34.14	0.9865	450	20
35.45	1	630	20
28.47	0.9932	270	40
40.12	0.9584	450	40
48.7	0.9903	630	40
23.4	0.8923	270	60
41.78	0.9382	450	60
51.84	0.9978	630	60



شکل (۴) مقادیر بدست آمده برای انرژی مصرفی در خشک‌کن خلأی مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو (۴۵°C، ۶۰°C و ۷۵°C).

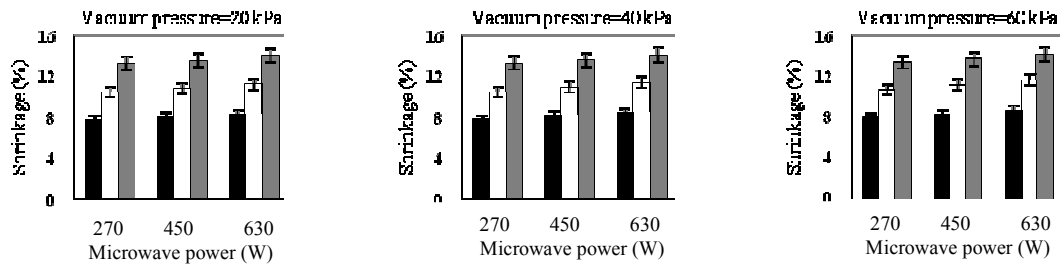
Figure (4) The values obtained for energy consumption in Infrared-Vacuum dryer with microwave pretreatment (45°C, 60°C and 75°C)

جدول (۶) نتایج آنالیز آماری به دست آمده برای انرژی مصرفی مغز بادام

Table (6) Results of fitting quadratic models to the data for energy consumption of almond kernel

میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی DF	منبع Source
0.011 **	2	T
$3.58 \times 10^{-3}$ **	2	P <sub>MW</sub>
$1.22 \times 10^{-3}$ **	2	P <sub>V</sub>
$7.36 \times 10^{-4}$ **	4	T×P <sub>MW</sub>
$1.63 \times 10^{-3}$ **	4	T×P <sub>V</sub>
$2.45 \times 10^{-5}$ ns	4	P <sub>MW</sub> ×P <sub>V</sub>
$1.60 \times 10^{-5}$ ns	8	T×P <sub>MW</sub> ×P <sub>V</sub>
$3.04 \times 10^{-5}$	54	Error
	80	Total

T=Temperature, P<sub>MW</sub>=Microwave power, P<sub>V</sub>= Infrared power  
\*\* Significant at %1, \* Significant at %5, ns Non significant



شکل (۵) مقادیر به دست آمده برای چروکیدگی مغز بادام (■۷۵°C، □۶۰°C، ■۴۵°C)  
 Figure (5) The values obtained for the shrinkage of almond kernels (■45°C, □60°C and ■75°C)

جدول (۷) نتایج آنالیز آماری به دست آمده برای چروکیدگی مغز بادام

Table (7) Results of fitting quadratic models to the data for shrinkage of almond kernel

میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی DF	منبع Source
26.58 **	2	T
0.7 **	2	P <sub>MW</sub>
0.094 **	2	P <sub>V</sub>
0.011 **	4	T×P <sub>MW</sub>
6.11×10 <sup>-3</sup> *	4	T×P <sub>V</sub>
6.34×10 <sup>-3</sup> *	4	P <sub>MW</sub> ×P <sub>V</sub>
6.85×10 <sup>-3</sup> *	8	T×P <sub>MW</sub> ×P <sub>V</sub>
1.12×10 <sup>-3</sup>	54	Error
	80	Total

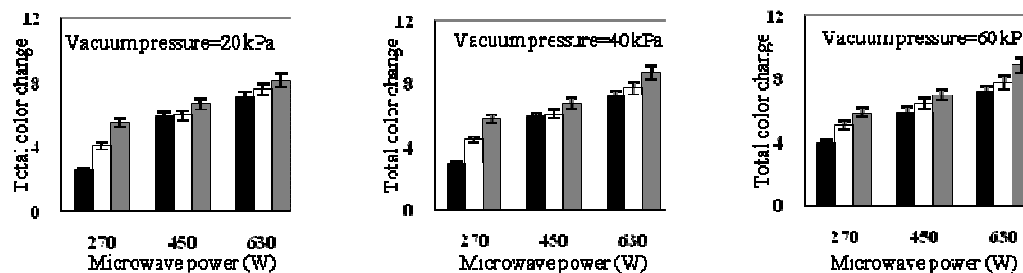
T=Temperature, P<sub>MW</sub>=Microwave power, P<sub>V</sub>= Infrared power  
 \*\* Significant at %1, \* Significant at %5, ns Non significant

جدول (۸) نتایج آنالیز آماری به دست آمده برای تغییرات کلی رنگ مغز بادام

Table (8) Results of fitting quadratic models to the data for total color change of almond kernel

میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی DF	منبع Source
0.94 **	2	T
9.85 **	2	P <sub>MW</sub>
0.12 *	2	P <sub>V</sub>
0.99 **	4	T×P <sub>MW</sub>
8.91×10 <sup>-4</sup> ns	4	T×P <sub>V</sub>
0.22 **	4	P <sub>MW</sub> ×P <sub>V</sub>
0.32 **	8	T×P <sub>MW</sub> ×P <sub>V</sub>
0.018	54	Error
	80	Total

T=Temperature, P<sub>MW</sub>=Microwave power, P<sub>V</sub>= Infrared power  
 \*\* Significant at %1, \* Significant at %5, ns Non significant



شکل (۶) مقادیر به دست آمده برای تغییرات کلی رنگ مغز بادام (■ 45°C، □ 60°C و ■ 75°C)

Figure (6) The obtained values for the total color change of almond kernel (■ 45°C, □ 60°C and ■ 75°C)

۶۳۰ W و فشار خلاء ۶۰ kPa به دست آمد. بیشترین مقدار چروکیدگی (۱۴/۱۴٪) در دمای ۷۵ °C توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلاء ۶۰ kPa و کمترین مقدار آن (۷/۷۸٪) در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa به دست آمد. بیشترین میزان تغییر رنگ ( $\Delta E=8/85$ ) در دمای ۷۵ °C توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلاء ۶۰ kPa و کمترین مقدار آن ( $\Delta E=2/61$ ) در دمای ۴۵ °C توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa به دست آمد. با توجه به اهمیت شاخص‌های کیفی، توصیه می‌شود که برای داشتن کمترین مقدار چروکیدگی و تغییر رنگ، مغز بادام را در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa خشک نمود.

### نتیجه گیری

نتایج نشان داد که مدل میدیلی و همکاران برای پیش‌بینی سینتیک خشک کردن مغز بادام بهترین مدل بود. بیشترین مقدار ضریب پخش موثر ( $5/33 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) در دمای ۷۵ °C، توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa و کمترین مقدار ضریب پخش موثر ( $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۶۰ kPa به دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار انرژی فعال‌سازی برای مغز بادام به ترتیب ۵۱/۸۴ و ۲۸/۷۳ kJ/mol بود. بیشترین مقدار انرژی مصرفی (۰/۲۶ kWh) در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلاء ۲۰ kPa و کمترین مقدار انرژی مصرفی (۰/۰۷ kWh) در دمای ۷۵ °C، توان میکروویو

### منابع

1. 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 beriberi fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49: 2865–2871.
2. Alaei, B., and Amiri Chayjan, R. 2015. Drying Characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39 (5): 469-479.
3. Arevalo-Pinedo, A., and Murr, F.E.X. 2007. Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80(1): 152–156.
4. Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., and Benjapiyaporn, C. 2010. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems Engineering*, 105: 130–138.

5. Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59: 121–126.
6. Beheshti, B., Khoshtaghaza, M.H., Bassiri, A., and Minaee, S. 2005. Selection of a suitable Thin Layer Drying Model for Almond. IV International Symposium on Pistachios & Almonds. 22-25 May. Tehran. Iran. (in Persian with English abstract).
7. Beheshti, B., and Mokhtari, F. 2014. Investigation of Two-Stage Drying of Almond and its Influence on Drying Time. The 8<sup>th</sup> national congress on agriculture machinery engineering (biosystem) and mechanization. 29-31 January. Mashhad. Iran. (in Persian with English abstract)
8. Bodaghi, V., Rasekh, M., Afkari-Sayyah, A.H., Yaghoubian, B. and Golmohammadi, A. 2011. Some physical and mechanical properties of two varieties of Almond. *Journal of Food science and technology*, 8(29): 49-57.
9. Dimatteo, M., Cinquant, A., Galiero, G., and Crescitelli, S. 2000. Effect of novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 46: 83-89.
10. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61: 359–364.
11. Doymaz, I. 2005. Drying behavior of green beans. *Journal of Food Engineering*, 69: 161–165.
12. Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79: 243–248.
13. Ertekin, C., and Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63: 349–359.
14. FAO, 2012. Statistics. [www.FAO.org.html](http://www.FAO.org.html) (accessed May 2013).
15. Fritzen-Freire, C.B., Prudêncio, E.S., Amboni, R.D. M.C., Pinto, S.S., Negrão-Murakami, A.N., and Murakami, F.S. 2012. Microencapsulation of bifidobacteria by spray drying in the presence of prebiotics. *Food Research International*, 45: 306–312.
16. Gholami, R., Lorestani, A.L., and Jaliliantabar, F. 2012. Determination of physical and mechanical properties of Zucchini (summer squash). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(1): 136-140.
17. Giri, S.K., and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 512–521.
18. Hashemi, G., Mowla, D., and Kazemini, M. 2009. Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating. *Journal of Food Engineering*, 92: 331–338.

19. Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337–344.
20. Lee, G., and Hsieh, F. 2008. Thin-layer drying kinetics of strawberry fruit leather. *Transaction of the ASABE*, 51:1699–1705.
21. Lee, J.H., and Kim, H.J. 2009. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. *LWT - Food Science and Technology*, 42: 180–186.
22. Maghsoudi, S. 2010. *Food Drying Technology*. Iran agriculture science. Tehran. (in Persian)
23. Mahmoodi, M., Taheri, M., Khazaei, J. and Mohamadi, N. 2008. Modeling Some Mechanical Properties Distributions of Almond Using Weibull Function. 18<sup>th</sup> National Congress on Food Technology, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract)
24. Mayor, L., and Sereno, A.M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61: 373–386.
25. Menges, H.O., and Ertekin, C. 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77: 119–125.
26. Mercier, S., Villeneuve, S., Mondor, M., and Des Marchais, L.P. 2011. Evolution of porosity, shrinkage and density of pasta fortified with pea protein concentrate during drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44: 883- 890.
27. Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20: 1503–1513.
28. Mirzabe, A.H., Khazaei, J., Chegini, G.R. and Gholami, O. 2013. Some physical properties of almond nut and kernel and modeling dimensional properties. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(2): 256-265.
29. Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., and Amirnejat, H. 2011. Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy*, 36: 6433-6441.
30. Ozkan, A., Akbudak, B., and Akbudak, N. 2007. Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78: 577–583.
31. Ruiz Celma, A., Rojas, S., and Lopez-Rodriguez, F. 2008. Mathematical modelling of thin layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing*, 47: 1810–1818.
32. Sharma, G.P., and Prasad, S. 2001. Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50: 99–105.
33. Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P., and Soponronnarit, S. 2009. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92: 100–106.



34. Tavakolipour, H. 2007. Drying of food and agricultural products. Aeezh, Tehran, Iran.
35. Tunde-Akintunde, T.Y., and Ogunlakin, G.O. 2011. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity and energy requirements during the drying of pretreated and untreated pumpkin. *Energy Conversion and Management*, 52: 1107–1113.
36. Valverde, M., Madrid, R., and Garcia, A.L. 2006. Effect of the irrigation regime, type of fertilization, and culture year on the physical properties of almond (cv. Guara). *Journal of Food Engineering*, 76: 584–593.
37. Wang, C.Y., and Singh, R.P. 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No: 3001.
38. Xiao, H.W., Pang, C.L., Wang, L.H., Bai, J.W., Yang, W.X., and Gao, Z.J. 2010. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering*, 105: 233–240.