



## بهینه سازی فرآیند خشک کردن بادام به روش سطح پاسخ در خشک کن میکروویو- خلائی

میثم صفری<sup>۱\*</sup> و رضا امیری چایجان<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا همدان،

meysamsafarybasu@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا همدان

### چکیده

بادام گیاهی چند ساله می باشد که در نواحی سردسیر ایران می‌روید. در این مطالعه بهینه سازی خواص خشک شدن بادام با رطوبت اولیه ۴۷٪ بر پایه خشک (d.b.) در یک خشک کن میکروویو- خلائی مورد مطالعه قرار گرفت. سه سطح دمای هوای خشک کن (۶۰، ۴۵ و ۷۵ °C) و سه سطح توان میکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W) و سه فشار خلا (۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa) پارامترهای مورد مطالعه در آزمایش صورت گرفته بودند. هدف از انجام این مطالعه، بهینه سازی مقدار ضریب پخش موثر و چروکیدگی بادام می باشد. با افزایش دما و توان میکروویو، ضریب پخش موثر افزایش می یابد. بیشترین ضریب پخش موثر در دمای ۷۵ °C، توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلا ۲۰ kPa و کمترین مقدار ضریب پخش موثر در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلا ۶۰ kPa بدست آمد. مشاهده شد که تاثیر دما بر روی چروکیدگی، بیشتر از توان میکروویو است. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای ۷۵ °C، توان میکروویو ۶۳۰ W و فشار خلا ۲۰ kPa و کمترین مقدار آن در دمای ۴۵ °C، توان میکروویو ۲۷۰ W و فشار خلا ۶۰ kPa بدست آمد. در ادامه این تحقیق با استفاده از روش بهینه سازی سطح پاسخ (RSM) مدل مناسبی برای یافتن مقدار ضریب پخش موثر و میزان چروکیدگی (پارامترهای خروجی شبکه) مناسب ارائه گردید. در پایان، بهترین شرایط برای داشتن حداکثر ضریب پخش موثر و حداقل چروکیدگی ارائه شد که عبارت بود از دمای ۵۷/۶۸ °C، توان ۶۳۰ W و فشار ۳۴/۹۴ kPa.

**واژه‌های کلیدی:** بادام، بهینه سازی، چروکیدگی، خشک کردن، ضریب پخش موثر

### مقدمه

بادام (*Amygdalus communis L.*) گیاهی چند ساله می باشد که در نواحی سردسیر ایران می‌روید. فصل برداشت بادام در مناطق سردسیر، اواخر تابستان می‌باشد. بادام منبع مهم انرژی با ۶ kcal/g، پروتئین با ۱۵/۶۴٪ و روغن از ۳۲/۵۷٪ تا ۴۰٪ می باشد (Abdallah et al., 1998). میزان رطوبت اولیه برای بادام حدود ۴۵ d.b.٪ می‌باشد که رطوبت نهایی آن در هنگام خشک کردن به حدود ۱۲٪ d.b. (مقصودی، ۱۳۸۹). برای محافظت، نگهداری و جلوگیری از فساد بادام باید رطوبت نهایی آن تقریباً بین ۱۲٪-۱۲/۵ d.b. باشد. این کار فرآیند خشک کردن را امری اجتناب ناپذیر می‌سازد. همچنین با توجه به نیاز مشتریان و پیشرفت تکنولوژی برای دستیابی به بهترین کیفیت و رنگ، این محصول نیز باید در این فرآیند بهینه سازی شود. خشک کردن، حذف حداکثر آب از محصول با هدف افزایش مدت نگهداری است و از قدیمی ترین روشهای حفظ مواد غذایی و محصولات کشاورزی می باشد. در طی فرآیند خشک کردن، آب از ماده غذایی خارج شده و در نتیجه امکان رشد میکروارگانیسم ها و ایجاد واکنش های شیمیایی نامطلوب

<sup>1</sup>- Dry basis



به حداقل رسیده و مدت زمان نگهداری مواد غذایی افزایش می یابد (Hassan-Beygi *et al.*, 2009). خشک‌کن ترکیبی میکروویو-خلائی، فواید هر دو روش خشک شدن تحت خلا و خشک شدن در میکروویو را دارد و می تواند هم مصرف انرژی و هم کیفیت فرآورده را بهبود بخشد. از جمله مزایای خشک‌کن میکروویو-خلائی مصرف انرژی کمتر و خشک کردن سریع‌تر محصول با حفظ کیفیت آن است (توکلی پور، ۱۳۸۵). روند خشک شدن میکروویو-خلائی تکه های لایه نازک هویج با معرفی یک مدل نظری مورد مطالعه قرار گرفت که هر دو مدل نظری و اطلاعات تجربی نشان داد نرخ خشک کردن با توان خروجی میکروویو به صورت خطی و با گرمای نهان تبخیر آب در خلا به طور معکوس متناسب است (Cui *et al.*, 2004). روش سطح پاسخ یا  $RSM^2$  از جمله روش های بهینه‌سازی می باشد که با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیکهای ریاضی و آماری مسائل را مدل می کند و نه تنها باعث می شود اجراهای پرهزینه ی شبیه سازی کاهش یابد بلکه روند طبیعی بهینه سازی فرایند را که اغلب غیر خطی می باشد، پیش بینی کرده و نشان خواهد داد. با توجه به بررسی های انجام شده، پژوهشی راجع به بهینه‌سازی بادام در خشک‌کنهای میکروویو-خلائی انجام نشده است. لذا هدف این پژوهش عبارت است از بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن بادام با توجه به نقاط بهینه متغیرهای خروجی فرآیند که شامل ضریب پخش موثر و چروکیدگی است.

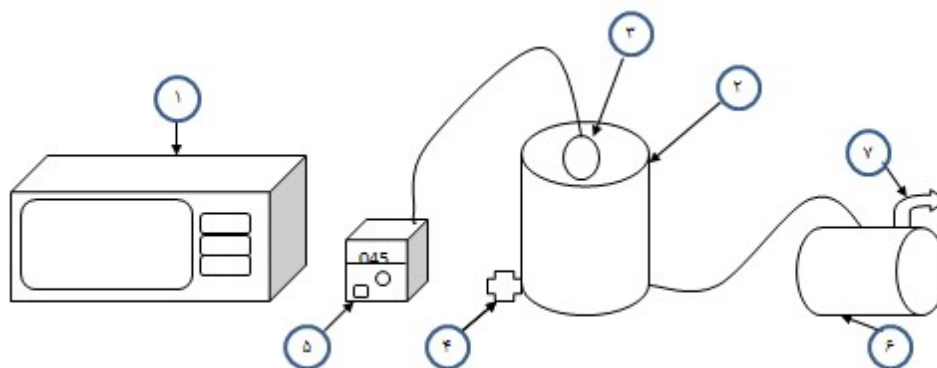
## مواد و روش ها

بادام تازه از باغهای بادام شهرستان اسدآباد واقع در استان همدان تهیه شد و برای انجام آزمایشها در یخچال در دمای  $1 \pm 4^\circ C$  نگهداری شد. محتوای رطوبت اولیه بادام، به روش خشک کردن در آون بدست آمد. به این ترتیب که نمونه های  $10$  گرمی با سه تکرار در آون در دمای  $105^\circ C$  به مدت  $24$  ساعت قرار داده شد و محتوای رطوبتی بادام تازه در حدود  $47\%$  بر مبنای وزن خشک بدست آمد.

برای انجام آزمایشها از خشک‌کن ترکیبی میکروویو-خلائی آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه مهندسی پس از برداشت دانشگاه بوعلی سینا استفاده شد. این خشک‌کن دارای سیستم کنترل دمای خودکار می باشد که دما را در محدوده  $1^\circ C \pm$  ثابت نگه می دارد. نمونه های وزن شده به مدت  $20$  ثانیه در میکروویو قرار داده می شدند و پس از خارج کردن نمونه ها از میکروویو توسط یک دستگاه ترازوی دیجیتال AND (مدل GF-600، ژاپن) با دقت  $0.001$  گرم وزن می شدند و پس از آن به مدت  $5$  دقیقه در خشک‌کن خلائی قرار داده می شدند و پس از خروج مجددا وزن می شدند. در طول آزمایش رطوبت نسبی و دمای محیط و همچنین دمای خشک‌کن ثبت می شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار، کلیه‌ی آزمایش ها  $30$  دقیقه بعد از روش کردن سیستم شروع می شد. سپس ظرف حاوی نمونه ها (حاوی  $15$  گرم نمونه) با احتیاط در محفظه‌ی خشک‌کن قرار داده می شد. بخشهای اصلی سیستم خشک‌کن همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است عبارتند از میکروویو، محفظه گرم کننده هوای خلا، لامپ مادون قرمز، پمپ خلا و سیستم کنترل دما.

آزمایشها در سه سطح دمایی  $45^\circ C$ ،  $60^\circ C$  و  $75^\circ C$  و در سه توان میکروویو  $270$ ،  $450$  و  $630$  W و سه سطح فشار  $20$ ،  $40$  و  $60$  kPa صورت گرفت. دمای محیط در طول آزمایشها بین  $28$  تا  $32$  درجه سلسیوس و میزان رطوبت نسبی محیط  $13$  تا  $22$  درصد بود.

<sup>2</sup> - Response Surface Methodology



شکل ۱. نمای شماتیک خشک کن میکروویو- خلائ (۱) میکروویو ۲- محفظه خلا ۳- لامپ مادون قرمز ۴- شیر ورودی جریان هوا به داخل خشک کن خلا ۵- سیستم کنترل دما ۶- پمپ خلا ۷- شیر تخلیه بخار روغن پمپ خلا).

### ضریب پخش موثر

میانگین قطر هندسی بادام ( $D_g$ ) از معادله زیر محاسبه می شود (Gholami et al., 2012).

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

که در آن  $L$  بیانگر قطر بزرگ،  $W$  بیانگر قطر متوسط و  $T$  بیانگر قطر کوچک دانه های بادام است. به این ترتیب با توجه به فرمول ارائه شده، قطر میانگین هندسی بادام بدست خواهد آمد. قطر هندسی بدست آمده برای بدست آوردن ضریب پخش موثر بکار برده می شود. به طور معمول خشک شدن محصولات در دو مرحله رخ می دهد که مرحله اول با سرعت ثابت و مرحله دوم با نرخ کاهنده روبرو است، که اکثر زمان خشک شدن در مرحله دوم صورت می گیرد.

قانون دوم فیک که توسط کرنک برای شرایط ناپایدار نفوذ در اشکال کروی ارائه شد و در معادله (۱) نشان داده شده است، به طور وسیعی برای توصیف فرآیند خشک کردن در طول کاهش نرخ رطوبت برای بیشتر مواد بیولوژیکی استفاده می شود.

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

که در آن  $D_{eff}$  ضریب پخش رطوبت موثر ( $\frac{m^2}{s}$ )،  $M$  محتوی رطوبت ( $kg\ w^3/kg\ ds^3$ ) و  $t$  زمان (s) می باشد.  $D_{eff}$  نشان دهنده ی قسمت هدایت در تمام مکانیزم های انتقال رطوبت است. این پارامتر معمولاً از منحنی های خشک کردن آزمایشگاهی تعیین می شود. مهمترین فرض در تعیین این پارامتر، این است که خشک کردن به انتقال فقط جرم محدود می شود و نیز فرآیند خشک کردن به صورت ایزوترم (هم دما) در تمام نمونه ها اتفاق می افتد.

قانون دوم فیک می تواند با نادیده گرفتن تاثیرات دما و مجموع گرادیان فشار، انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن پخش رطوبت موثر، ثابت و شعاعی است می توان مقدار آن را با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمود:

<sup>3</sup>- kg Water

<sup>4</sup>- kg Dry Solid



$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (3)$$

که در آن  $n$  تعداد ترم های خشک شدن (۱ و ۲ و ۳...) در نظر گرفته شده از معادله،  $t$  زمان خشک شدن (s)،  $MR$  نسبت رطوبت،  $M_t$  رطوبت در یک زمان مشخص (d.b.)،  $M_o$  مقدار رطوبت اولیه (d.b.)،  $M_e$  مقدار رطوبت تعادلی (d.b.)،  $r_o$  شعاع کره (m) می باشد که در فرآیند خشک شدن ثابت فرض شده است. برای دوره های طولانی آبدایی، زمانی که  $t$  افزایش می یابد، جمله های دیگر به غیر از جمله اول ناچیز در نظر گرفته می شوند و معادله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (4)$$

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می توان به صورت خطی نوشت. با لگاریتم گیری از طرفین معادله بالا، معادله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (5)$$

با رسم نمودار  $\ln(MR)$  نسبت به زمان، خطی با شیب  $k_1$  بدست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه (۴)، ضریب پخش موثر را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_g^2} \quad (6)$$

که در آن  $r_g$  بیانگر شعاع میانگین هندسی بادام است.

### چروکیدگی

در طی فرآیند خشک کردن، شکل و اندازه محصولات تغییر محسوسی می کند. تاثیر در خواص فیزیکی آنها به نوبه خود باعث تغییر بافت محصول نهایی (چروکیدگی) و خواص حمل و نقل محصولات خشک می شود. چروکیدگی زمانی اتفاق می افتد که آب از فضای سلولی حذف شده و هوا جای آن را می گیرد. برای اندازه گیری میزان چروکیدگی محصول، در ابتدا و انتهای هر آزمایش توسط یک کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی متر، سه بعد عمود بر هم ۵ نمونه شماره گذاری شده اندازه گیری و یادداشت شد و سپس با استفاده از معادله (۱) قطر میانگین هندسی نمونه ها در ابتدا و انتهای هر آزمایش بدست آورده شد. سپس حجم اولیه و ثانویه نمونه ها با استفاده از معادله زیر بدست آمد (Sadeghi et al., 2010).

$$V = \left(\frac{\pi D_g^3}{6}\right) \quad (7)$$

که در آن  $V$  بیانگر حجم بادام خواهد بود. در انتها با استفاده از معادله زیر میزان چروکیدگی محصول بدست آمد.

$$S_b = \frac{V_1 - V_2}{V_1} * 100 \quad (8)$$

که در آن  $V_1$  حجم اولیه یا حجم قبل از خشک کردن،  $V_2$  حجم ثانویه یا بعد از خشک کردن و  $S_b$  درصد چروکیدگی می باشد.

## نتایج و بحث

در این مطالعه از نرم افزار Design Expert جهت بهینه سازی فرآیند خشک کردن بادام در خشک کن میکروویو- خلائی استفاده شد. تعیین تعداد و طرح کلی آزمایشها و تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از روش سطح پاسخ به کمک این نرم افزار صورت گرفت. در این روش، بهینه سازی فرآیند خشک کردن بادام با توجه به کمترین مقدار چروکیدگی و بیشترین مقدار ضریب پخش موثر انجام شد. در انجام این پژوهش از طرح مرکب مرکزی (CCD<sup>۵</sup>) استفاده شد.

### ضریب پخش موثر

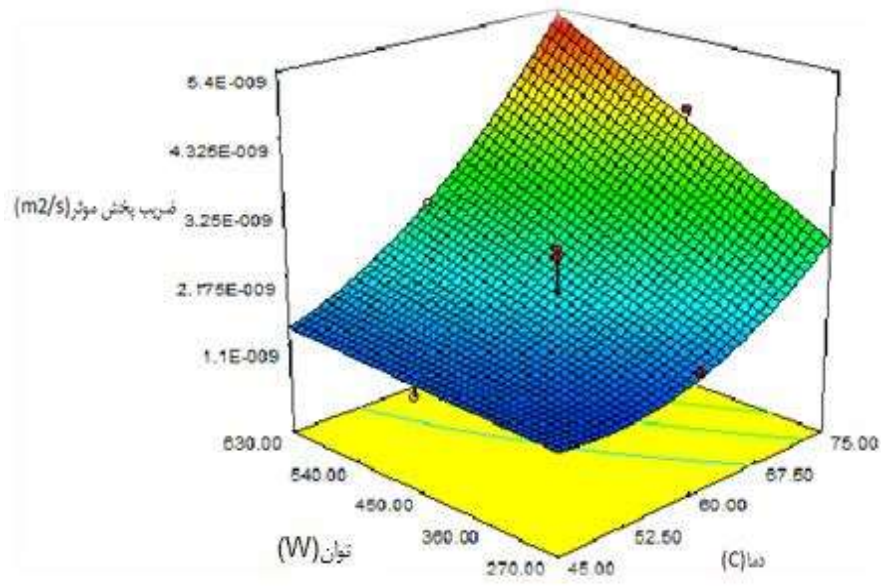
جهت بهینه سازی فرآیند، باید به مقوله کیفیت محصول برای بازاریابی آن توجه کرد. شکل (۲) رابطه بین دمای هوای خشک کن خلائی و توان میکروویو را با ضریب پخش موثر نشان می دهد. با افزایش دما و توان میکروویو، ضریب پخش موثر افزایش می یابد که دلیل این امر تاثیر بارز دما و توان میکروویو در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر در محصول می باشد. مشاهده شد که تاثیر دما بر روی ضریب پخش موثر، بیشتر از توان میکروویو است. معمولا ضریب پخش موثر برای محصولات کشاورزی بین  $\frac{m^2}{s}$   $10^{-11}$  و  $10^{-9}$  می باشد. بیشترین ضریب پخش موثر در دمای  $75^{\circ}C$ ، توان میکروویو  $630W$  و فشار خلا  $20 kPa$  و کمترین مقدار ضریب پخش موثر در دمای  $45^{\circ}C$ ، توان میکروویو  $270W$  و فشار خلا  $60kPa$  بدست آمد. تاثیرات دما و توان میکروویو بر روی ضریب پخش موثر در سطح  $1\%$  و تاثیر فشار خلا بر روی ضریب پخش موثر در سطح  $5\%$  معنی دار شد.

### چروکیدگی

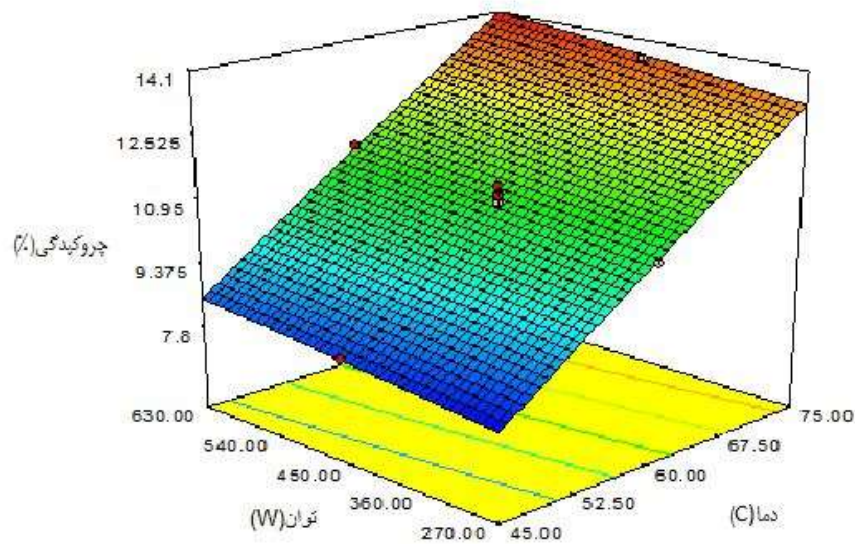
شکل (۳) رابطه بین دمای هوای خشک کن خلائی و توان میکروویو را با چروکیدگی نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش دما، چروکیدگی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می یابد. با افزایش توان میکروویو، چروکیدگی با شیب ملایمی افزایش می یابد. مشاهده شد که تاثیر دما بر روی چروکیدگی، بیشتر از توان میکروویو است. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای  $75^{\circ}C$ ، توان میکروویو  $630W$  و فشار خلا  $20kPa$  و کمترین مقدار آن در دمای  $45^{\circ}C$ ، توان میکروویو  $270W$  و فشار خلا  $60kPa$  بدست آمد. تاثیرات دمای هوا و توان میکروویو بر روی چروکیدگی در سطح  $1\%$  و تاثیر فشار خلا بر روی چروکیدگی در سطح  $5\%$  معنی دار شد.

<sup>5</sup>- Central Composite Design





شکل ۲. اثرات متقابل دما و توان بر ضریب پخش موثر.



شکل ۳. اثرات متقابل دما و توان بر چروکیدگی (%).

## نتیجه گیری

در پایان در بین کلیه ی تیمارهای انتخابی توسط نرم افزار، مقادیر بهینه با توجه به کمترین مقدار چروکیدگی و بیشترین مقدار ضریب پخش موثر برای نزدیک شدن به کیفیت بالای محصول خشک شده، مطابق جدول (۱) انتخاب شدند.

جدول ۱. نتایج بهینه سازی فرآیند خشک کردن بادام در خشک کن میکروویو- خلائی.

شماره آزمایش	دما (°C)	توان (W)	فشار (kPa)	ضریب پخش موثر ( $\frac{m^2}{s}$ )	چروکیدگی (%)	شاخص مطلوبیت
۱	۵۷/۶۸	۶۳۰	۳۴/۹۴	$2/52 \times 10^{-9}$	۱۰/۹۸	۰/۴۳۸۵
۲	۵۷/۶۷	۶۳۰	۳۵/۲۸	$2/51 \times 10^{-9}$	۱۰/۹۷	۰/۴۳۸۵
۳	۵۷/۹۵	۶۳۰	۳۴/۶۹	$2/55 \times 10^{-9}$	۱۱/۰۴	۰/۴۳۸۴
۴	۵۷/۶۵	۶۳۰	۳۵/۹۵	$2/51 \times 10^{-9}$	۱۰/۹۷	۰/۴۳۸۴
۵	۵۷/۶۳	۶۳۰	۳۶/۸۴	$2/50 \times 10^{-9}$	۱۰/۹۶	۰/۴۳۸۳
۶	۵۸/۰۵	۶۳۰	۲۸/۳۹	$2/56 \times 10^{-9}$	۱۱/۰۹	۰/۴۳۵۷
۷	۵۸/۴۸	۶۳۰	۲۴/۱۱	$2/59 \times 10^{-9}$	۱۱/۱۹	۰/۴۳۰۹
۸	۵۹/۳۸	۶۳۰	۴۸/۵۴	$2/58 \times 10^{-9}$	۱۱/۲۱	۰/۴۲۷۳
۹	۴۵	۲۷۰	۲۰/۰۱	$1/47 \times 10^{-9}$	۷/۹۷	۰/۳۹۵۶
۱۰	۴۵	۲۷۰/۰۱	۲۰/۱۶	$1/47 \times 10^{-9}$	۷/۹۷	۰/۳۹۵۶

## منابع

۱-توکلی پور، ح.، ۱۳۸۵. اصول خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی، انتشارات آبیژ. چاپ اول. بهار ۱۳۸۵.

۲-مقصودی، ش.، ۱۳۸۹. فن آوری خشکبار، انتشارات آبنوس. چاپ اول. پاییز ۱۳۸۹.

3-Abdallah, A., M.H. Ahumada and T.M. Gradziel. 1998. Oil content and fatty acid composition of almond kernels from different genotypes and California production regions. Journal of the American Society for Horticultural Science 123: 1029-1033.

4-Arteaga, G.E., E. Li-Chan, M.C. Vazquez-Arteaga and S. Nakai. 1994. Systematic experimental designs for product formula optimization. Food Science and Technology 5: 243 – 254.

5-Gholami, R., A.L.Lorestani, and F. Jaliliantabar. 2012. Determination of physical and mechanical properties of Zucchini (summer squash). Agricultural Engineering International: CIGR Journal 14(1):136-140.

6-Hassan-Beygi, S.R., M. Aghbashlo, M.H. Kianmehr and J. Massah. 2009. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. International Agrophysics 23: 129-135.



7-Kashaninejad, M., M. Ahmadi, A. Daraei, and D. Chabra. 2008. Handling and frictional characteristics of soybean as a function of moisture content and variety. *Powder Technology* 188(1): 1-8.

8-Khazaei, J., M. Sarmadi, and J. Behzad. 2006. Physical properties of sunflower seeds and kernels related to harvesting and dehulling. *Lucrari Stiintifice*, 49.

9-Paksoy, M., and C.Aydin. 2004. Some physical properties of edible squash (*Cucurbita pepo* L.) seeds. *Journal of Food Engineering* 65(2): 225-231.

10-Perez, E. E., G.H. Crapiste, and A.A. Carelli. 2007. Some physical and morphological properties of wild sunflower seeds. *Biosystems Engineering* 96 (1): 41-45.

11-Sadeghi, M., H. Ashtiani Araghi, and A. Hemmat. 2010. Physico-mechanical properties of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain as affected by variety and moisture content. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 12(3): 129- 136.

12-Cui, Z. W., S. Y. Xu and D. W., Sun. 2004. Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices. *Journal of Food Engineering* 65: 157–164.



## Almond drying process optimization using response surface methodology in a microwave - vacuum dryer

Meisam Safary<sup>1\*</sup> and Reza Amiri Chayjan<sup>2</sup>

1- MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan  
meysamsafarybasu@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University of Hamedan

### Abstract

Almond is a perennial plant that grows in cold region of Iran. Optimization study of almond drying properties with initial moisture content of 47% (d.b.) in a microwave-vacuum drying was studied. Three levels of drying air temperature (45, 60 and 75°C) and three microwave power levels (270, 450 and 630 W) and three vacuum pressure (20, 40 and 60 kPa) parameters of the experiment were conducted. The aim of this study was to optimization the shrinkage and effective diffusivity of almond. With increasing temperature and microwave power, the effective diffusivity was increased. The most effective diffusivity was at 75 °C, microwave power 630 W and a vacuum pressure of 20 kPa and the lowest effective diffusivity was at 45 °C, microwave power 270 W and a vacuum pressure of 60 kPa, respectively. It was observed that the effect of temperature on shrinkage was most of the microwave power. The highest shrinkage at temperature of 75 °C, microwave power of 630 W and pressure of 20 kPa was obtained. The lowest shrinkage at temperature of 45 °C, microwave power 270 W and a vacuum pressure of 60 kPa, was occurred. In this study, response surface optimization method (RSM) was used to find a suitable model based on effective diffusivity and shrinkage. The best conditions for maximum effective moisture diffusivity and minimum shrinkage were provided by a temperature of 57.68 °C, microwave power of 630 W and vacuum pressure of 34.94 kPa.

**Key words:** Almond, Optimization, Shrinkage, Drying, Diffusivity