

## بهینه‌سازی خشک کردن مغز فندق در خشک‌کن مادون قرمز با پیش‌ تیمار مایکروویو به کمک روش سطح پاسخ

مریم احمدی قویدلان<sup>۱</sup>، رضا امیری چایجان<sup>۲\*</sup>

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

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۴)

### چکیده

در این مطالعه، از یک خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار مایکروویو برای خشک کردن مغز فندق استفاده شد. برای تعیین شرایط بهینه‌سازی نمونه‌های فندق از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی به منظور بررسی تأثیر دمای هوا در سه سطح (۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، توان مادون قرمز در سه سطح (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات) و توان مایکروویو در سه سطح (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات) برای خشک کردن مغز فندق استفاده شد. تجزیه و تحلیل واریانس (فاکتور عدم برازش و مقدار  $R^2$ ) برای تعیین مطلوبیت مدل استفاده شد. از سطوح پاسخ و منحنی‌های تراز برای نشان دادن اثر متقابل متغیرهای مستقل با متغیر پاسخ ایجاد شد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده شرایط بهینه جهت انتخاب مقادیر بیشینه ضریب انتشار مؤثر رطوبت و  $L^*$  (شاخص رنگ) و انتخاب مقادیر کمینه انرژی مصرفی کل، چروکیدگی و شاخص‌های رنگ  $a^*$  و  $b^*$  اعمال شد. با توجه به نتایج، شرایط بهینه در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۴۷۱/۱۴ وات و توان مادون قرمز ۱۳۱۶/۸۹ وات تعیین گردید. در این نقاط بهینه مقادیر متغیرهای پاسخ ضریب انتشار مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی کل، چروکیدگی،  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  به ترتیب  $2/36 \times 10^{-9}$  متر مربع بر ثانیه، ۲/۶۵ کیلووات ساعت، ۱۲/۹۴ درصد، ۵۴/۱۰، ۱۴/۹۷ و ۱۶/۷۰ به دست آمدند.

کلید واژگان: انرژی مصرفی کل، چروکیدگی، شاخص‌های رنگ، ضریب انتشار مؤثر رطوبت

\* مسئول مکاتبات: amirireza@basu.ac.ir

## ۱- مقدمه

زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول (حفظ ویژگی‌های فندق تازه) ضروری به نظر می‌رسد.

روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> مجموعه‌ای از تکنیک‌ها و روش‌های آماری جمع‌آوری اطلاعات است که می‌تواند با مدل‌سازی‌های ریاضی و آماری، اثر عوامل موثر در یک فرآیند را بر متغیرهای پاسخ بهینه‌سازی نماید [۶]. روش سطح پاسخ قادر به کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای ارزیابی پاسخ‌های چند هدفه و اثر متقابل آنها می‌باشد، در نتیجه به زمان و کار کمتری نیاز می‌باشد [۷]. در بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی، نیاز به بهینه‌سازی چند تابع هدف به صورت همزمان می‌باشد. در برخی از این فرآیندها ممکن است هدف بهینه‌سازی و برخی کمینه‌سازی پاسخ‌ها باشد [۸]. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، هیچ پژوهشی در مورد بهینه‌سازی فندق خشک‌شده با خشک‌کن مادون قرمز با پیش‌تیمار مایکروویو به روش سطح پاسخ یافت نشد. بنابراین، هدف این پژوهش تعیین شرایط بهینه خشک‌کردن فندق در خشک‌کن مادون قرمز با پیش‌تیمار مایکروویو با استفاده از روش سطح پاسخ بود.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- خشک‌کن مادون قرمز با پیش‌تیمار

## مایکروویو

در این پژوهش، از یک خشک‌کن مادون قرمز و یک دستگاه اجاق مایکروویو خانگی شارپ مدل R-196ts برای خشک‌کردن نمونه‌های مغز فندق استفاده شد. خشک‌کن مادون قرمز شامل محفظه خشک‌کن، دمنده گریز از مرکز، المنت‌های حرارتی (۸ المنت) و واحد کنترل (شامل کنترل سرعت دمنده و دمای هوای ورودی) بود. چهار لامپ مادون قرمز برای تولید اشعه مادون قرمز هر کدام با توان ۵۰۰ وات در داخل و بالای محفظه خشک‌کن قرار گرفت. با توجه به شرایط آزمایش (سه سطح توان مادون قرمز)، حداکثر از سه لامپ مادون قرمز با توان ۱۵۰۰ وات برای ایجاد توان مادون قرمز استفاده شد. همچنین حداکثر توان مایکروویو در این اجاق ۹۰۰ وات و در پنج

فندق نقش مهمی در تغذیه و سلامت انسان دارد و به دلیل طعم منحصر به فرد و بی‌نظیری که دارد به عنوان مواد افزودنی در انواع مواد غذایی به صورت خام یا برشته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. برای حفظ، بهبود کیفیت، تغییر شکل یا تغییر خصوصیات یک محصول کشاورزی، عملیات واحدی بر روی این محصولات اعمال می‌شود که یکی از این عملیات، خشک کردن می‌باشد. خشک کردن یکی از معمول‌ترین روش‌های نگهداری فندق در طی عملیات پس از برداشت است. خشک کردن یک فرآیند حرارتی پیچیده است که در آن به طور همزمان انتقال حرارت و جرم ناپایدار اتفاق می‌افتد [۲]. فندق به دلیل مقدار چربی بالایی که دارد مستعد به ترشیدگی می‌باشد، اسیدهای چرب غیر اشباع، مواد معدنی از قبیل: آهن، منگنز و مس باعث ترشیدگی فندق می‌شوند. برای جلوگیری از تلفات فندق ناشی از شرایط آب و هوایی نامساعد، آن را با مقدار رطوبت مناسب برداشت می‌کنند و برای جلوگیری از رشد میکروفلورا<sup>۱</sup> و حفظ محصول، به روش صحیحی خشک می‌کنند [۳]. روشهای مختلفی برای خشک کردن مواد جامد توسعه یافته است که هر روش دارای مزایا و معایبی می‌باشد. این روش‌ها عبارتند از: خشک کردن به روش خورشیدی، مایکروویو، مادون قرمز، جابجایی، خلأیی و پاششی [۴]. گرمایش مادون قرمز با پیش‌تیمار مایکروویو، یک فن‌آوری جدید در زمینه خشک‌کردن است که برای حفظ کیفیت محصولات کشاورزی استفاده می‌شود [۵]. خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-مادون قرمز به طور ترکیبی مزایای صرفه‌جویی در زمان خشک کردن توسط خشک‌کن مایکروویو 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 روش مادون قرمز در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-مادون قرمز حذف شود. خشک‌کن مایکروویو در توان‌های بالا زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد [۵]. بنابراین بهینه‌سازی شرایط خشک‌کردن دانه‌های فندق برای کاهش مصرف انرژی،

1. Microflora

2. Response Surface Methodology (RSM)

## ۲-۲- طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

در این مطالعه، متغیرهای مستقل شامل: دمای هوا در سه سطح (۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، توان مایکروویو در سه سطح (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات) و توان مادون قرمز در سه سطح (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات) و متغیرهای وابسته شامل: ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $m^2/s$ )، انرژی مصرفی کل (kWh)، چروکیدگی (%)،  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  در نظر گرفته شدند. از طرح مرکب مرکزی<sup>۲</sup> روش مرکز سطح<sup>۳</sup> برای ساختن یک مدل مرتبه دوم برای متغیرهای پاسخ استفاده شد. به طور کلی، هر طرح مرکب مرکزی شامل یک طرح عاملی  $2^k$ ، نقاط محوری  $2k$  و  $n$  تکرار در نقطه مرکزی می‌باشد. تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز ( $N$ ) در یک طرح مرکب مرکزی جهت تحلیل یک فرآیند از رابطه‌ی (۱) محاسبه شد:

$$N = 2^k + 2k + n$$

برای پاسخ‌های پیش‌بینی شده بر اساس رابطه‌ی (۲) فرض شد که شش تابع ریاضی وجود دارد.

$$y_k = f_k(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$$

که  $y_k$  پاسخ‌های پیش‌بینی شده و  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  متغیرهای طبیعی (مستقل) می‌باشند. متغیرهای مستقل و سطوح کدبندی شده آنها و تعداد آزمایش‌ها در جداول ۱ و ۲ آمده است. شکل معادلات سطوح پاسخ مرتبه دوم نیز به صورت رابطه‌ی (۳) می‌باشد:

$$y_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j$$

که در رابطه بالا  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}$  و  $\beta_{ij}$  پارامترهای ضرایب رگرسیون می‌باشند.  $x_j$  متغیرهای کد شده ورودی می‌باشد [۱۶]. برازش سطوح پاسخ و بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن با استفاده از نرم‌افزار دیزاین-اکسپرت نسخه ۷ انجام شد، و تجزیه و تحلیل واریانس<sup>۴</sup> بر روی ضرایب مدل درجه دوم با این نرم‌افزار انجام شد. هر فاکتور در طرح مرکب مرکزی در سه سطح مختلف (+۱، ۰ و -۱)، دو نقطه محوری (+ $\alpha$  و - $\alpha$ ) و شش تکرار در نقطه مرکزی مورد مطالعه قرار گرفت و شرایط و نقاط بهینه بر اساس تابع مطلوبیت به دست آمد.

سطح قابل تنظیم بود. با توجه به شرایط آزمایش (سه سطح توان مایکروویو)، تنها از سه سطح توان ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات استفاده شد. آزمایش‌های خشک کردن در سه سطح دمای هوای ۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس (به ترتیب با دامنه سطوحی -۱، ۰، +۱)، سه سطح توان مایکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات (به ترتیب با دامنه سطوحی -۱، ۰، +۱)، سه سطح توان مادون قرمز ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات (به ترتیب با دامنه سطوحی -۱، ۰، +۱) در طرح مکعب مرکزی و سرعت هوای ۲/۵۶ متر بر ثانیه انجام شدند. در آزمایش‌های اولیه نمونه‌های فندق با خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز، از طریق تجزیه واریانس (ANOVA) مشخص شد که سرعت هوای خشک کردن از نظر آماری تأثیر معنی‌داری بر روی پارامترهای خروجی نداشت، همچنین با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۷، از طریق روش سطح پاسخ سرعت بهینه خشک کردن تعیین شد که برابر ۲/۵۶ متر بر ثانیه بود. بنابراین در انجام آزمایش‌ها با خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار مایکروویو، پارامتر سرعت هوای خشک کردن (سرعت بهینه) ثابت در نظر گرفته شد. نمونه‌های فندق تازه واریته بومی محلی از باغ‌های شهرستان رحیم آباد، استان گیلان تهیه شدند. نمونه‌ها با پوست به منظور حفظ کیفیت و رطوبت اولیه در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند و تا زمان انجام آزمایش‌ها در داخل یخچال در دمای  $3 \pm 1$  درجه سلسیوس ذخیره شدند و در زمان انجام آزمایش‌ها مغز نمونه‌ها به طور سالم توسط فندق‌شکن از پوست جدا شد. سپس برای تعیین مقدار رطوبت اولیه فندق، نمونه‌های ۲۳ گرمی در آون در دمای  $100 \pm 1$  درجه سلسیوس به مدت شش ساعت قرار گرفته و خشک شدند [۱۴]. اندازه‌گیری وزن نمونه‌های خشک کن نیز هر سه دقیقه یکبار با استفاده از یک ترازوی دیجیتال AND GF-6000 با درجه تفکیک ۰/۰۰۱ انجام شد. آزمایش‌ها تا زمانی که مقدار رطوبت دانه‌های فندق از مقدار رطوبت اولیه ۰/۵۴٪ بر پایه خشک به مقدار رطوبت ۰/۴٪ بر پایه خشک رسانده شود، ادامه داشت [۱۵].

2. Central Composite Design (CCD)  
3. Face center  
4. ANOVA

1. Design Expert 7

**Table 1** Independent variables and their levels

Independent variables	Symbols		levels		
	Coded Variables	Actual variables	-1	0	+1
Air temperature (°C)	$x_1$	$\varepsilon_1$	45	65	85
Microwave power (W)	$x_2$	$\varepsilon_2$	270	450	630
Infrared power (W)	$x_3$	$\varepsilon_3$	500	1000	1500

**Table 2** Face-centered central composite design of hazelnut kernel drying experiments in an infrared dryer with microwave pretreatment using Design Expert 7 software

Exp. run	Actual values (Coded values)			Replication
	Air temperature (°C)	Microwave power (W)	Infrared power (W)	
1	65 (0)	450 (0)	1000 (0)	6
2	85 (1)	270 (-1)	500 (-1)	1
3	85 (1)	630 (1)	500 (-1)	1
4	65 (0)	450 (0)	1500 (1)	1
5	65 (0)	630 (1)	1000 (0)	1
6	65 (0)	450 (0)	500 (-1)	1
7	45 (-1)	630 (1)	1500 (1)	1
8	45 (-1)	450 (0)	1000 (0)	1
9	85 (1)	450 (0)	1000 (0)	1
10	45 (-1)	270 (-1)	1500 (1)	1
11	65 (0)	270 (-1)	1000 (0)	1
12	45 (-1)	270 (-1)	500 (-1)	1
13	45 (-1)	630 (1)	500 (-1)	1
14	85 (1)	630 (1)	1500 (1)	1
15	85 (1)	270 (-1)	1500 (1)	1

### ۲-۳- شاخص های رنگ

با استفاده از یک رنگ سنج (HP-200، ساخت کشور چین) رنگ نمونه ها قبل و بعد از خشک کردن اندازه گیری شد. برای هر آزمایش، ۲۵ دانه فندق رنگ سنجی شده و میانگین آنها گرفته شد.

و در نهایت با داده های مربوط به نمونه های تازه مقایسه شد. پارامتر  $L^*$  طیف سفید تا مشکی با محدوده ۰-۱۰۰،  $a^*$  طیف سبز تا قرمز با محدوده ۱۰۰- تا ۱۰۰+ و  $b^*$  طیف آبی تا زرد با محدوده ۱۰۰- تا ۱۰۰+ را نشان می دهند [۱۷].

## ۲-۴- چروکیدگی

در هر آزمایش، ابعاد ۲۵ نمونه فندق قبل و بعد از خشک کردن با استفاده از کولیس دیجیتالی (Groz EDF-6, USA) با دقت  $\pm 0.02$  میلی متر اندازه گیری شد. قطرهای محصولات دانه ای یک اندازه و یکنواخت نیستند، لیکن پیرامون یک قطر متوسطی از دانه ها پراکنده هستند. از آنجا که فندق شبیه به کره بود میانگین قطر هندسی از رابطه (۴) به دست آمد [۱۸].

$$D = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}}$$

که در آن  $D$  قطر میانگین هندسی و  $A$ ،  $B$  و  $C$  به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک بر حسب متر می باشد. حجم فندق قبل از خشک کردن ( $V_o$ ) از رابطه (۵) به دست آمد:

$$V_o = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

و در نهایت درصد چروکیدگی از طریق رابطه ی (۶) بدست آمد [۱۸]:

$$S_b = \left(1 - \frac{V}{V_o}\right) \times 100$$

که  $S_b$  درصد چروکیدگی و  $V$  حجم فندق (متر مکعب) بعد از خشک کردن است.

## ۲-۵- انرژی مصرفی کل

انرژی مصرفی کل فندق خشک شده با خشک کن مادون قرمز به همراه پیش تیمار میکروویو ( $E_t$ )، از مجموع انرژی صرف شده توسط گرمایش جابجایی ( $E_c$ )، مادون قرمز ( $E_{IR}$ ) و میکروویو ( $E_{MW}$ ) محاسبه شد [۱۹]:

$$E_c = \frac{(C_{pa} + C_{pv} h_a) Q t}{3.6 \times 10^6 V_h} (T_{in} - T_{am})$$

که در آن  $E_c$  انرژی مصرفی توسط گرمایش جابجایی (kWh)،  $T_{in}$  و  $T_{am}$  به ترتیب دمای هوای ورودی به داخل محفظه خشک کن و دمای هوای محیط (درجه سلسیوس)،  $V_h$  حجم مخصوص هوا (مترمکعب بر کیلوگرم)،  $Q$  دبی هوای ورودی به محفظه خشک کن (مترمکعب بر ثانیه)،  $t$  زمان کل خشک کردن (ثانیه)،  $C_{pv}$  و  $C_{pa}$  به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه هوا و بخار (با مقدار  $1.004/16$  و  $1.828/8$  ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)

و  $h_a$  رطوبت مطلق هوا (کیلوگرم بخار بر کیلوگرم هوای خشک) است.

$$E_{IR, MW} = P \times t$$

$E_{IR, MW}$  انرژی مصرفی توسط گرمایش مادون قرمز و میکروویو ( $P$ ، kWh)، توان مصرف شده مادون قرمز و میکروویو است، مقدار توان های مادون قرمز  $1$  و  $0.5$  (kW) و توان های میکروویو  $0.27$ ،  $0.45$  و  $0.63$  (kW) بود که همان شرایط آزمایش می باشد [۲۰].

## ۲-۶- ضریب انتشار مؤثر رطوبت

با صرف نظر از اثر چروکیدگی و فرض توزیع یکنواخت رطوبت، ضریب انتشار مؤثر رطوبت از رابطه (۹) به دست آمد [۲۱].

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

$MR$  نسبت رطوبت است که معادل  $\frac{M - M_e}{M_o - M_e}$  می باشد،  $n$  تعداد جملات (1, 2, 3, ...)،  $r$  شعاع هندسی مغز فندق (m)،  $M_o$  مقدار رطوبت اولیه (d.b.) و  $M_e$  مقدار رطوبت تعادلی (d.b.) است (براساس تحقیقات انجام شده، برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_o$  یا  $M$  بسیار کوچک هستند. بنابراین معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن به صورت معادله  $\frac{M}{M_o}$  ساده شد). در یک فرآیند طولانی، از جمله اول رابطه (۹) استفاده می شود و می توان از جملات بعدی به دلیل ناچیز بودن مقدار آنها صرف نظر کرد. از این رو رابطه (۱۰) بدست می آید.

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

می توان با لگاریتم گیری از رابطه (۱۰) آن را به صورت خطی در آورد:

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

آن متغیر مستقل بر مقدار پاسخ (اگر می‌خواهیم بیشینه باشد) تاثیر مثبت (مستقیم) دارد و ضرایب منفی متغیر مستقل، نشان دهنده تاثیر منفی (معکوس) بر متغیر پاسخ خواهد بود. قبل از انجام بهینه‌سازی لازم بود که به مطلوب بودن مدل‌های پیشنهادی پرداخته شود.

### ۳-۱- ضریب انتشار مؤثر رطوبت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی دو متغیر خطی دمای هوا و توان مایکروویو ( $p < 0.0001$ ) بر روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت دانه‌های فندق خشک شده معنی‌دار بودند. علاوه بر آن اثر توان مادون قرمز، اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو و عبارت درجه دوم دمای هوا ( $p < 0.01$ ) نیز معنی‌دار بودند، اما نسبت به دمای هوا و توان مایکروویو تأثیر معنی‌داری کمتری بین این عوامل (اثر توان مادون قرمز، اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو و عبارت درجه دوم دمای هوا با مقدار معنی‌داری  $p < 0.01$ ) وجود داشت.

و در نهایت با رسم نمودار  $Ln(MR)$  بر حسب  $t$  خطی با شیب  $k$  به دست می‌آید که با مساوی قرار دادن آن با  $\left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}\right)$  در رابطه (۱۱) می‌توان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را به دست آورد:

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

### ۳-۲ نتایج و بحث

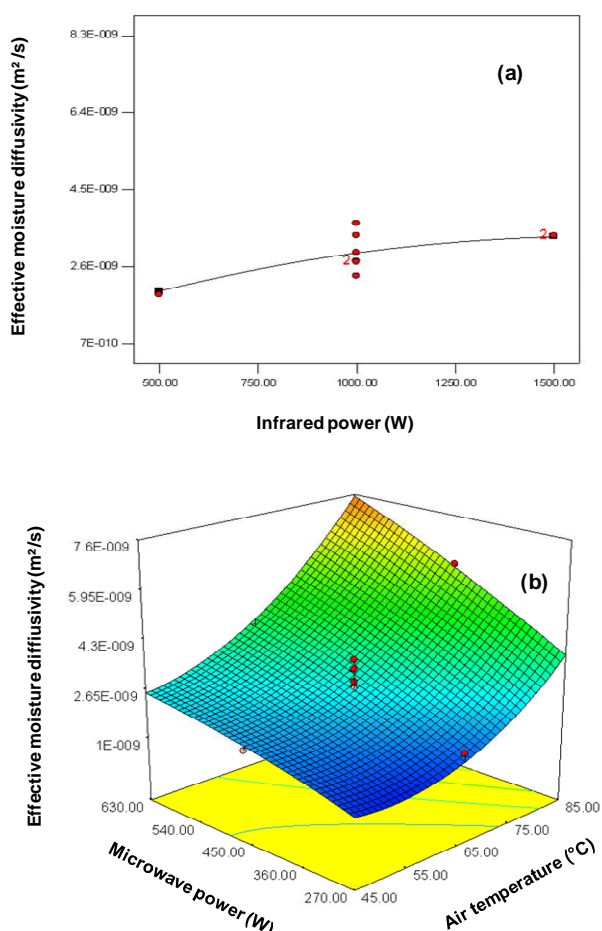
ضرایب معادله رگرسیون حاصله از مدل‌های طرح مرکب مرکزی و اطلاعات آماری محاسبه شده برای متغیرهای پاسخ (ضریب انتشار مؤثر، انرژی مصرفی کل، چروکیدگی،  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$ ) برای دانه‌های فندق خشک شده با خشک‌کن مادون قرمز-پیش تیمار مایکروویو در جدول ۳ نشان داده شده است. ضرایب مثبت یعنی

Table 3 The second order polynomial regression coefficients for response variables

Estimated coefficients	Effective moisture diffusivity (m <sup>2</sup> /s)	Energy consumption (kWh)	Shrinkage (%)	L*	a*	b*
$\beta_0$	$2.93 \times 10^{-9}$	2.27	14.67	51.18	15.06	15.54
$\beta_1$	$1.91 \times 10^{-9***}$	-1.13***	2.93***	1.32***	0.15***	-0.72**
$\beta_2$	$1.28 \times 10^{-9***}$	-1.55***	2.09***	-0.53*	0.12**	0.23#
$\beta_3$	$6.65 \times 10^{-10**}$	-0.5*	1.01*	0.45**	0.002#	-0.54*
$\beta_{12}$	$5.71 \times 10^{-10**}$	0.61*	1.37**	0.06#	-0.006#	0.17#
$\beta_{13}$	$1.20 \times 10^{-10#}$	0.53*	0.59#	-0.25*	-0.001#	0.009#
$\beta_{23}$	$2.94 \times 10^{-10#}$	0.29#	0.48#	0.20*	0.009#	-0.33#
$\beta_1^2$	$1 \times 10^{-9**}$	0.042#	0.85#	1.06***	-0.03#	0.70#
$\beta_2^2$	$-1.61 \times 10^{-10#}$	1.28**	-0.12#	0.03#	-0.04#	0.25#
$\beta_3^2$	$-2.65 \times 10^{-10#}$	0.19#	-0.11#	0.39*	0.22**	0.29#
Lack of Fit (P-Value)	0.79	0.15	0.66	0.68	0.75	0.58
R <sup>2</sup>	0.97	0.94	0.93	0.98	0.92	0.83
Adj-R <sup>2</sup>	0.95	0.89	0.88	0.96	0.84	0.67
Pre-R <sup>2</sup>	0.86	0.65	0.56	0.94	0.72	0.36

\*\*\* Significant at 0.1%, \*\* Significant at 1%, \* Significant at 5% and # Not significant at  $p < 0.05$

قرمز انتقال حرارت بین دانه‌های فندق و دمای هوای خشک کردن افزایش و در نهایت انتقال جرم (تبخیر رطوبت از سطح محصول) افزایش یافت [۲۲]. ازبک و دادالی [۹]، خشک کردن برگ نعنای با خشک کن میکروویو را مورد مطالعه قرار دادند و مقدار ضریب انتشار مؤثر را در محدوده  $۱۰^{-۱۱}$  تا  $۳/۹۸۲ \times ۱۰^{-۱۰} \text{ m}^2 \text{ s}^{-۱}$  گزارش کردند.



**Fig 1** (a) Infrared effect on the effective moisture diffusivity, (b) response surface and contour plots for effective moisture diffusivity: interaction effect between air temperature and microwave power

### ۲-۳- انرژی مصرفی کل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر متغیرهای خطی دمای هوا، توان میکروویو ( $p < 0.0001$ )، توان مادون قرمز، اثر متقابل

همچنین اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز، اثر متقابل توان مادون قرمز و توان میکروویو، عبارت درجه دوم توان میکروویو و عبارت درجه دوم توان مادون قرمز از نظر آماری معنی دار نبودند. مقدار  $p$  عامل عدم برازش برای ضریب انتشار مؤثر رطوبت  $۰/۷۹$  به دست آمد و نشان دهنده این بود که مدل پیش بینی شده توسط روش سطح پاسخ به خوبی داده‌های تجربی ضریب انتشار مؤثر را برازش می‌کند. همچنین مقادیر ( $۰/۹۷$ )  $R^2$ ، ( $۰/۹۵$ )  $Adj-R^2$ ، ( $۰/۸۶$ )  $Pre-R^2$  و ( $۱۲/۶۱$ )  $C.V.$  نیز بر مطلوبیت مدل پیش‌بینی شده دلالت می‌کند.

در شکل ۱ اثر توان مادون قرمز و اثر همزمان دمای هوا و توان میکروویو بر روی ضریب انتشار نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است، تأثیر توان مادون قرمز بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت در صورتی که سایر متغیرها در سطح میانه خود ثابت باشند، به گونه‌ای بود که با افزایش توان مادون قرمز از  $۵۰۰$  تا  $۱۵۰۰$  وات، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت از  $۲ \times ۱۰^{-۹}$  تا  $۳/۳۳ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه افزایش یافت. بیشترین مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $۶/۴۵ \times ۱۰^{-۹}$  متر مربع بر ثانیه) در محدوده دمای هوای  $۸۰/۰۳$  تا  $۸۵$  درجه سلسیوس و محدوده توان میکروویو  $۵۱۴/۱۳$  تا  $۶۳۰$  وات و کمترین مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت ( $۱/۵۳ \times ۱۰^{-۹}$  متر مربع بر ثانیه) در محدوده دمای هوای  $۴۵$  تا  $۶۵$  درجه سلسیوس و محدوده توان میکروویو  $۲۷۰$  تا  $۳۴۱/۹۵$  وات مشاهده شد. با افزایش توان میکروویو از  $۲۷۰$  تا  $۶۳۰$  وات، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت از  $۱۰ \times ۱/۴۹$  تا  $۴/۰۵ \times ۱۰^{-۹}$  مترمربع بر ثانیه افزایش یافت. با ثابت نگه داشتن دمای هوا و افزایش توان میکروویو، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت که تأثیر آن در دمای هوای  $۸۵$  درجه سلسیوس حداکثر و به مقدار  $۷/۵۱ \times ۱۰^{-۹}$  متر مربع بر ثانیه رسید. این نتایج می‌تواند به دلیل افزایش انتقال حرارت بین دانه‌های فندق و دمای هوای خشک کردن در اثر افزایش دمای هوا و توان مادون قرمز و در نهایت افزایش انتقال جرم باشد [۲۲]. اما با توجه به شیب منحنی تأثیر توان میکروویو نسبت به توان مادون قرمز بیشتر بود. افزایش توان میکروویو باعث افزایش جنبش مولکول‌های آب، افزایش فرآیند انتقال حرارت و جرم در دانه‌های فندق و در نهایت منجر به افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت شد [۲۳]. همچنین در اثر افزایش دمای هوا و توان مادون

دمای هوا و توان مایکروویو ( $p < 0.01$ )، اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز و عبارت درجه دوم توان مایکروویو ( $p < 0.05$ )، بر انرژی مصرفی کل فرآیند خشک‌کردن دانه‌های فندق معنی‌دار بود. درحالی‌که اثر متقابل توان مایکروویو و توان مادون قرمز و عبارت درجه دوم دمای هوا، توان مایکروویو و توان مادون قرمز در یک سطح احتمال مشخص معنی‌دار نبودند. همچنین مقادیر  $p$  فاکتور عدم برازش (۰/۱۵)،  $R^2$  (۰/۹۴)،  $Adj-R^2$  (۰/۸۹)،  $Pre-R^2$  (۰/۶۵) و  $C.V.$  (۱۸/۴۸) نیز بر مطلوبیت مدل پیش‌بینی شده دلالت می‌کردند.

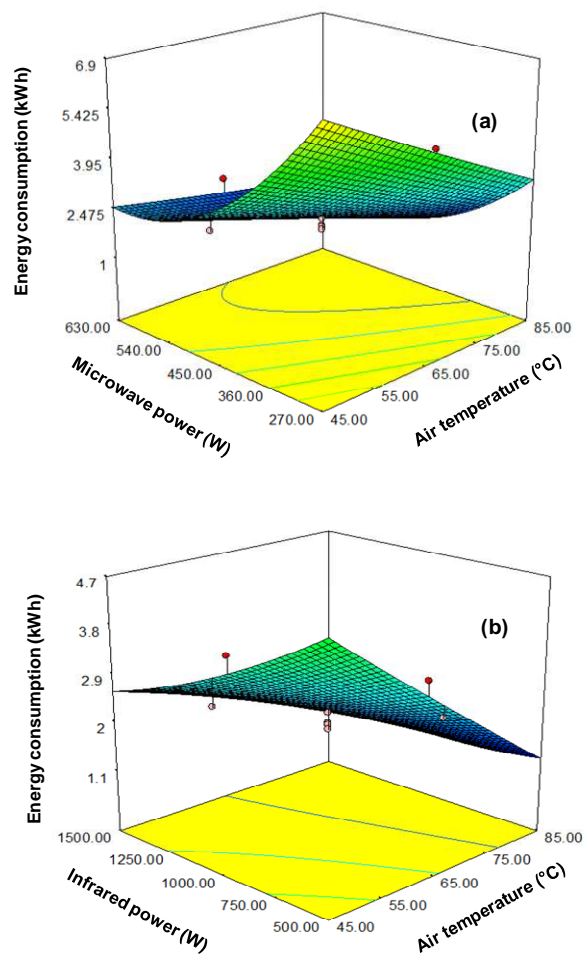
در شکل ۲ اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو و اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است بیشترین مقدار انرژی مصرفی (۵/۹۰ کیلووات ساعت) در محدوده دمای هوای ۴۵ تا ۵۵/۴۵ درجه سلسیوس و در محدوده توان مایکروویو ۲۷۰ تا ۳۱۰/۹۶ وات و کمترین مقدار انرژی مصرفی (۱/۳۷ کیلووات ساعت) در دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس و در محدوده توان مایکروویو ۴۲۱/۱۶ تا ۶۱۳/۱۳ وات به‌دست آمد. با ثابت نگه‌داشتن دمای هوا و افزایش توان مایکروویو، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافته بود که تأثیر آن در دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس حداکثر بود. تأثیر توان مایکروویو بر کاهش انرژی مصرفی در محدوده‌ی ۴۵۰ تا ۶۳۰ وات نسبت به محدوده‌ی ۲۷۰ تا ۴۵۰ وات بیشتر می‌باشد که این امر به دلیل این است که تأثیر توان مایکروویو بر انرژی مصرفی بسیار بیشتر می‌باشد. در توان مایکروویو بیشتر، آب آزاد محصول سریع‌تر تبخیر شده و زمان خشک‌شدن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و در اثر کاهش زمان خشک‌شدن، انرژی مصرفی کل کاهش می‌یابد. درویشی [۲۴] در خشک‌کردن تکه‌های سیب‌زمینی با خشک‌کن مایکروویو و نیک‌بخت و همکاران [۲۵] در خشک‌کردن دانه‌های انار با خشک‌کن لایه نازک-مایکروویو دریافتند با افزایش توان مایکروویو انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. همچنین در تأثیر همزمان دمای هوا و توان مادون قرمز بر انرژی مصرفی، بیشترین مقدار انرژی مصرفی (۳/۹۴ کیلووات ساعت) در محدوده دمای هوای ۴۵ تا ۵۳/۰۶

درجه سلسیوس و در محدوده توان مادون قرمز ۵۰۰ تا ۷۶۹/۱۸ وات و کمترین مقدار انرژی مصرفی (۱/۳۷ کیلووات ساعت) در دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس و در محدوده توان مادون قرمز ۵۰۰ تا ۱۴۵۰/۷۱ وات به‌دست آمد. با ثابت نگه‌داشتن دمای هوا و افزایش توان مادون قرمز، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافت، اما تأثیر توان مادون قرمز بر انرژی مصرفی نسبت به دمای هوا بیشتر بود. با افزایش متغیرهای مستقل دمای هوا، توان مایکروویو و توان مادون قرمز، مدت زمان صرف شده برای خشک‌کردن نمونه‌های فندق کاهش یافت و همین امر منجر به کاهش انرژی مصرفی کل برای حذف رطوبت شد [۲۶]. این نتایج بیان‌گر این است که اگرچه در دماهای بالا، مقدار توان‌های به‌کار رفته و نرخ انرژی بالا بودند اما انرژی مصرفی کل به علت کاهش زمان خشک‌کردن پایین بود. از این‌رو دمای هوای خشک‌کردن بالا به علت کاهش زمان خشک‌کردن و کاهش مصرف انرژی مناسب می‌باشد [۲۷]، که این از نقطه‌نظر کیفی محصول، بازارپسندی و کاهش هزینه‌های خشک‌کردن هم مناسب می‌باشد. کاهش زمان خشک‌کردن به علت افزایش فشار داخلی و گرادیان غلظت می‌باشد که همین امر باعث می‌شود انتقال جرم افزایش یابد و در نهایت آب آزاد محصول سریع‌تر تبخیر شده و زمان خشک‌شدن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. در برخی موارد، کاهش زمان خشک‌کردن به دلیل افزایش نرخ تولید دارای اهمیت بیشتر و در برخی موارد به دلیل افزایش کیفیت محصول خشک‌شده اهمیت کمتری دارد. نتایج مشابهی برای خشک‌کردن زرشک گزارش شده است [۲۰]. ضرایب منفی معادله رگرسیون ارائه شده توسط مدل پیش‌بینی شده برای انرژی مصرفی کل نمونه‌های فندق خشک‌شده که در جدول ۳ آورده شده است، نشان‌دهنده این بود که مقدار انرژی مصرفی کل با متغیرهای مستقل دمای هوا، توان مایکروویو و توان مادون قرمز نسبت عکس داشت. همچنین مقدار ضرایب در مدل پیش‌بینی شده نشان داد که دمای هوا نسبت به توان مایکروویو و توان مادون قرمز بیشترین تأثیر را بر میزان انرژی مصرفی کل داشت.



فاکتور عدم برازش به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۸۸، ۰/۵۶، ۶/۹۲ و ۰/۶۶ توسط مدل ارئه شدند و به دلیل مقادیر بالای  $R^2$  و معنی‌دار نبودن فاکتور عدم برازش، مدل ارئه شده به عنوان مدل مناسبی انتخاب شد. از مدل پیش‌بینی شده مشاهده شد که مقدار چروکیدگی به طور معنی‌داری با دمای هوا، توان مایکروویو و توان مادون قرمز تغییر کردند و همزمان با افزایش دمای هوا، توان مایکروویو و توان مادون قرمز مقدار چروکیدگی افزایش یافت.

در شکل ۳، اثر توان مادون قرمز و اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو (توسط منحنی سطح پاسخ) بر روی متغیر پاسخ چروکیدگی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است با افزایش متغیرهای مستقل مقدار چروکیدگی افزایش یافت. با افزایش توان مادون قرمز از ۵۰۰ به ۱۵۰۰ وات، مقدار چروکیدگی از ۱۳/۵۵ به ۱۵/۵۷ درصد افزایش یافت. در شکل ۳، با ثابت نگه‌داشتن توان مایکروویو و افزایش دمای هوا، مقدار چروکیدگی افزایش یافت. همچنین با افزایش همزمان دمای هوا و توان مایکروویو مقدار چروکیدگی نمونه‌های فندق افزایش معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار چروکیدگی (۲۰/۱۱ درصد) در محدوده دمای هوای ۷۹/۵۳ تا ۸۵ درجه سلسیوس و در محدوده توان مایکروویو ۵۴۰/۸۲ تا ۶۳۰ وات و کمترین مقدار چروکیدگی (۱۲/۳۲ درصد) در دمای هوای ۴۵ تا ۶۳ درجه سلسیوس و در محدوده توان مایکروویو ۲۷۰ تا ۳۸۵/۰۱ وات به‌دست آمد. در این خشک‌کن، دمای هوا به عنوان مؤثرترین عامل بر مقدار چروکیدگی دانه‌های فندق انتخاب شد. به طور کلی، حرارت دادن و از دست دادن رطوبت باعث ایجاد تنش‌هایی در ساختار سلولی ماده غذایی می‌شود و همین امر منجر به تغییر شکل و کاهش اندازه ماده غذایی می‌شود. میوه‌ها و سبزیجات مقدار رطوبت بالایی دارند و به دلیل چروکیدگی ساختارشان تغییر می‌کند. سلول‌های حیوانی و سبزیجات دارای یک خاصیتی به نام ترگر<sup>۱</sup> هستند که مایع موجود در دیواره سلولی فشاری را بر روی سلول اعمال می‌کند و باعث فشرده شدن مایع داخل سلول می‌شود. در طول فرآیند خشک کردن، آب از سلول خارج می‌شود و باعث کاهش کششی می‌شود که آب بر دیواره سلولی وارد می‌کند و همین کاهش کشش منجر به چروکیدگی شدن ماده

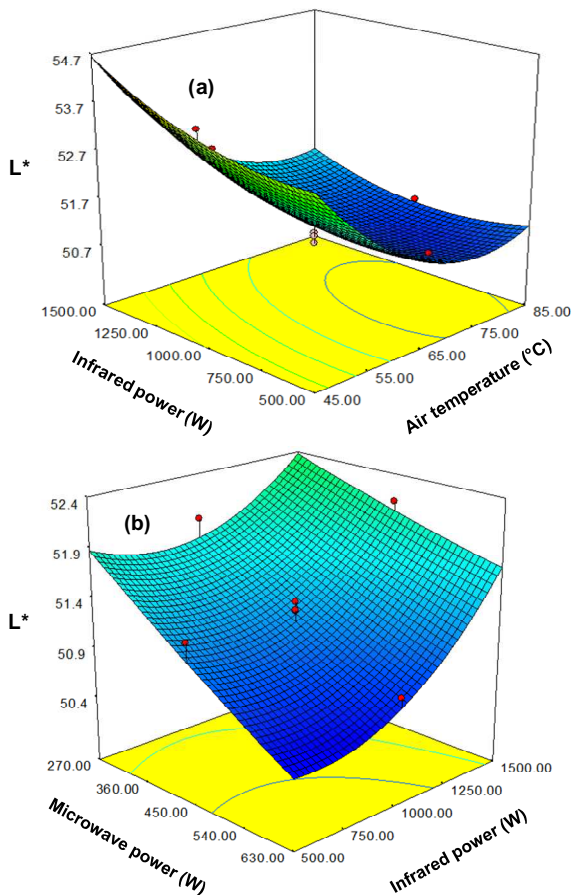


**Fig 2** Response surface and contour plots for energy consumption: (a) interaction effect between air temperature and microwave power, (b) interaction effect between air temperature and infrared power

### ۳-۳- چروکیدگی

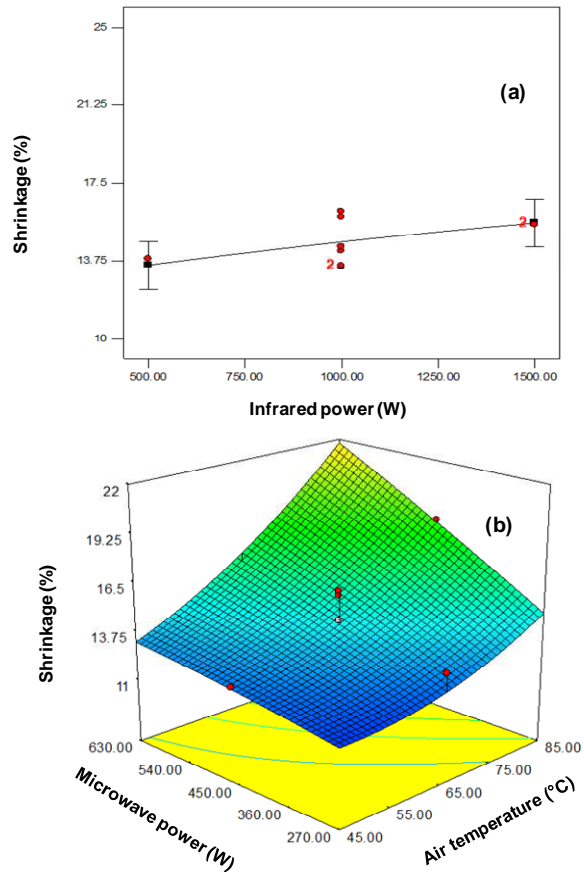
مقدار چروکیدگی نمونه‌های فندق خشک‌شده بین ۱۰/۸۹ و ۲۴/۵۲ درصد تغییر کرد. جدول ۲ ضرایب معادلات به‌دست آمده توسط مدل برازش شده با داده‌های آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که دمای هوا، توان مایکروویو ( $p < 0.0001$ )، توان مادون قرمز و اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو از نظر آماری معنی‌دار می‌باشند ( $p < 0.01$ ) ولی اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز، اثر متقابل توان مایکروویو و توان مادون قرمز، عبارت درجه دوم دمای هوا، توان مایکروویو و توان مادون قرمز معنی‌دار نبودند و اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد. مقادیر  $R^2$ ،  $Adj-R^2$ ،  $Pre-R^2$ ، C.V. و همچنین مقدار p

دوم توان مادون قرمز ( $p < 0.05$ ) اثر معنی داری را بر شاخص رنگ  $L^*$  دانه های فندق خشک شده داشتند. در شاخص  $L^*$  هر دو متغیر دما و توان مایکروویو تأثیر بالایی داشتند اما برای تغییرات در رنگ نمونه های فندق خشک شده تأثیرگذارترین عامل، دمای هوای خشک کردن بود و دمای بالای خشک کردن باعث تیره تر شدن نمونه های فندق شد (شکل ۴). مقادیر عدم برازش،  $R^2$ ،  $Adj-R^2$ ،  $Pre-R^2$  و  $C.V.$  برای شاخص رنگ  $L^*$  به ترتیب  $0.68$ ،  $0.98$ ،  $0.96$ ،  $0.94$  و  $0.46$  به دست آمدند. همچنین برای شاخص رنگ  $a^*$  دانه های فندق خشک شده مشاهده شد که متغیرهای دمای هوا ( $p < 0.0001$ )، توان مایکروویو و عبارت درجه دوم توان مادون قرمز ( $p < 0.01$ ) اثر معنی داری را داشتند.



**Fig 4** Response surface and contour plots for color index  $L^*$ : (a) interaction effect of air temperature and infrared power, (b) interaction effect of infrared power and microwave power

می شود [۲۸]. بیشترین چروکیدگی در نخستین مراحل خشک کردن رخ می دهد. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده برای کاهش درصد چروکیدگی دانه های فندق، دماهای پایین را می توان به عنوان راه حلی مناسب برای کاهش درصد چروکیدگی در فرآیند خشک کردن توصیه کرد که با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین مطابقت دارد [۲۹].



**Fig 3** (a) Infrared effect on the shrinkage, (b) response surface and contour plots for shrinkage: interaction effect between air temperature and microwave power

### ۳-۴- شاخص های رنگ $L^*$ و $a^*$ و $b^*$

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که دمای هوا، توان مایکروویو، عبارت درجه دوم دمای هوا ( $p < 0.0001$ )، توان مادون قرمز ( $p < 0.01$ )، اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز، اثر متقابل توان مایکروویو و توان مادون قرمز و عبارت درجه

توان مادون قرمز در محدوده ۱۳۰۳/۲۶ تا ۱۳۱۷/۴۷ وات قرار داشت. این شرایط بهینه متغیرهای مستقل برای بیشینه متغیرهای پاسخ ضریب انتشار مؤثر رطوبت و شاخص رنگ  $L^*$  و کمینه متغیرهای پاسخ انرژی مصرفی، چروکیدگی و شاخص‌های رنگ  $a^*$  و  $b^*$  به دست آمدند. مقادیر پاسخ‌های بهینه شده با درجه مطلوبیت ۰/۶۲ به ترتیب برای متغیرهای مذکور  $m^2/s^{-9}$   $۲/۳۶ \times ۱۰$ ،  $۲/۶۵$  kWh،  $۱/۱۲/۹۴$ ،  $۵۴/۱۰$ ،  $۱۴/۹۷$  و  $۱۶/۷۰$  به دست آمدند. نتایج مقادیر بهینه شده متغیرهای مستقل و متغیرهای پاسخ با روش تابع مطلوبیت بر اساس شاخص مطلوبیت در جدول ۳ نشان داده شده است. در راه حل انتخابی مشاهده شد که با وجود این که در دمای هوای پایین ( $۴۵^\circ C$ )، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت کمتر شد اما در این دما مقادیر متغیرهای پاسخ انرژی مصرفی، چروکیدگی،  $a^*$  و  $b^*$  نیز کمتر و شاخص رنگ  $L^*$  بیشتر بود و این برای حفظ کیفیت محصول، بازاری پسندی و کاهش هزینه‌های خشک‌کردن مناسب بود. بالا بودن شاخص رنگ  $L^*$  نشان دهنده این بود که در این شرایط بهینه، نمونه‌ها روشن‌تر بودند و کمتر دچار تغییر رنگ شدند. در این راه‌حل انتخابی، توان بالای مایکروویو و توان بالای مادون قرمز علاوه بر تأثیر مثبت بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت باعث کاهش چروکیدگی و انرژی مصرفی فندق خشک‌شده، شدند. از طریق منحنی‌های سطوح پاسخ به دست آمده برای اثر متقابل متغیرهای مستقل در راه حل پیشنهادی مشاهده شد که بیشترین ضریب انتشار مؤثر رطوبت توسط اثر متقابل دمای هوا (در دمای بالا) و توان مایکروویو (در توان بالا) تعیین شد و اثر متقابل آنها از نظر آماری معنی‌دار بودند. همچنین برای کمترین انرژی مصرفی و چروکیدگی، تأثیرگذارترین عوامل، به ترتیب اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز (در توان بالا) و اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو بود. در منحنی سطوح پاسخ اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو بر چروکیدگی مشاهده شد که مقادیر چروکیدگی در این اثر متقابل نسبت به سایر اثرهای متقابل (اثر متقابل دمای هوا و توان مایکروویو، اثر متقابل توان مایکروویو و توان مادون قرمز) کمتر بود و همچنین کمترین مقدار چروکیدگی در دمای هوای پایین و توان مایکروویو پایین اتفاق افتاد. در شاخص رنگ  $L^*$  اثر متقابل توان مایکروویو پایین و توان مادون قرمز بالا بیشترین تأثیر را در حفظ بافت و رنگ فندق داشت. در این محدوده تغییر  $L^*$  دانه‌های فندق خشک‌شده نسبت به نمونه‌های تازه کمتر بود. در چند راه‌حل پیشنهاد شده دیگر،

در شاخص رنگ  $b^*$  نیز اختلاف معنی‌داری دمای هوا ( $p < 0.01$ ) و توان مادون قرمز ( $p < 0.05$ ) بر روی این متغیر پاسخ مشاهده شد. سایر شاخص‌های آماری نیز مطلوبیت مدل را برای برآزش داده‌های آزمایش نشان دادند. این تغییر در رنگ نمونه‌های خشک‌شده می‌توانست به علت واکنش‌های قهوه‌ای شدن مایلارد در طول فرآیند خشک‌کردن باشد [۳۰]. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص‌های رنگ در دماهای پایین به مقادیر نمونه‌های تازه نزدیک‌تر بودند. ارسال و ازجان [۳۱] گزارش کردند که مقادیر  $L^*$  تکه‌های لفل خشک‌شده با آن تحت دماهای هوای  $۵۰^\circ C$  و  $۷۰^\circ C$  کاهش یافت، دلیل آن را به تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای در طول فرآیند خشک‌کردن نسبت دادند.

### ۳-۵- بهینه‌سازی

با استفاده از روش تابع مطلوبیت، ۱۰ راه‌حل برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت بین ۰/۵۱ و ۰/۶۲ به دست آمدند. نتایج نشان داد که تا حدودی مقادیر بهینه متغیرهای مستقل در راه‌حل‌های مختلف با هم متفاوت بودند. از راه‌حل‌های پیشنهاد شده بر اساس شاخص مطلوبیت، بهینه‌ترین شرایط خشک‌کردن فندق در دمای هوای  $۴۵^\circ C$ ، توان مایکروویو  $۴۷۱/۱۰ W$  و توان مادون قرمز  $۱۳۱۷/۴۷ W$  به دست آمد. این شرایط بهینه با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین مطابقت داشت، از جمله کریمی و رفیعی [۳۲] برای بهینه‌سازی خشک‌کردن برگ سنبل (اسطوخودوس<sup>۱</sup>) با استفاده از روش سطح پاسخ و شبکه عصبی، یون و چانگ [۳۳] برای بهینه‌سازی دما و زمان برشته‌کردن ذرت با استفاده از روش سطح پاسخ، یویسال و همکاران [۳۴] برای بهینه‌سازی برشته‌کردن فندق با گرمایش مایکروویو-مادون قرمز با استفاده از روش سطح پاسخ، اربای و آیسر [۳۵] برای بهینه‌سازی خشک‌کردن برگ‌های زیتون با هوای داغ با استفاده از روش سطح پاسخ و لین و همکاران [۳۶] برای بهینه‌سازی آب‌زدایی تکه‌های سیب‌زمینی با خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز و انجمادی با روش سطح پاسخ، نیز شرایط بهینه‌ای که بدست آوردند در محدوده‌ی شرایط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. در بین راه‌حل‌های بهینه پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار با شاخص مطلوبیت بیشتر (۰/۶۲)، دمای هوا در کمترین مقدار ( $۴۵^\circ C$ )، توان مایکروویو در محدوده  $۴۷۱/۱۰$  تا  $۴۸۴/۴۷$  وات و

1. lavender

- during roasting. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13: 97-107.
- [2] Sahin A.Z., and Dincer, I. (2005). Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. *Journal of Food Engineering*, 71:119-126.
- [3] Demirtas, C., Ayhan, T., and Kaygusuz, K. (1998). Drying Behaviour of Hazelnuts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76: 559-564.
- [4] Guine, R.P.F., Pinho, S., and Barroca, M.J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food and Bioproducts Processing*, 89: 422-428.
- [5] Tireki, S., Şumnu, G., and Esin. A. (2006). Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying. *European Food Research and Technology*, 222: 8-14.
- [6] Gongjian, F., Yonbin, H., Zhenxin, G., and Deming, C. (2008). Optimizing conditions for anthocyanins extraction from purple sweet potato using response surface methodology (RSM). *LWT - Food Science and Technology*, 41: 155-160.
- [7] Montgomery, D.C. (2005). Design and analysis of experiments. John Wiley and Sons, New York, USA, (pp 405-458).
- [8] Eren, İ., and Kaymak-Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79: 344-352.
- [9] Ozbek, B., and Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83: 541-549.
- [10] Umesh Hebbar, H., Vishwanathan, K.H. and Ramesh, M.N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65 (4): 557-563.
- [11] Sharma, G.P., Verma, R.C., and Pathare, P.B. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67 (3): 361-366.
- [12] Dondee, S., Meeso, N., Soponronnarit, S., and Siriamornpun, S. (2011). Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying. *Journal of Food Engineering*, 104(1): 6-13.
- [13] Kaveh, M., and Amiri Chayjan, R. (2014). Prediction of some physical and drying properties of terebinth fruit (*Pistacia atlantica L.*) using Artificial Neural Networks. *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, 13: 65-78.

مقادیر دمای هوا و توان مایکروویو به ترتیب  $85^{\circ}\text{C}$  و  $270\text{ W}$  و محدوده توان مادون قرمز  $750/98$  تا  $1091/50$  وات بود. با وجود این که دمای هوای بالا باعث افزایش ضریب نفوذ مؤثر شد اما مقدار چروکیدگی و انرژی مصرفی افزایش و مقدار شاخص رنگ  $L^*$  کاهش یافت که این از نظر بازاریابی مناسب نبود. تحقیقاتی برای تعیین شرایط بهینه محصولات کشاورزی صورت گرفته است که به نتایج برخی از آنها اشاره می‌شود. شرایط بهینه خشک‌کردن برگ‌های زیتون به روش جابجایی در دمای متوسط هوای  $51/16^{\circ}\text{C}$ ، سرعت متوسط هوای  $1/01\text{ m}^2/\text{s}$  و بیشترین زمان خشک‌کردن  $298/68\text{ min}$  گزارش شد [35]. همچنین لین و همکاران [36] آبدیاری تکه‌های سیب‌زمینی را با استفاده از خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-انجمادی انجام دادند. آنها شرایط بهینه متغیرهای مستقل آزمایش: دمای هوای خشک‌کردن، فاصله بین نمونه و گرمایش مادون قرمز و ضخامت را به ترتیب در محدوده  $34$  تا  $37$  درجه سلسیوس،  $50\text{ mm}$  و محدوده  $7$  تا  $8$  میلی‌متر گزارش کردند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای پاسخ با استفاده از طرح مرکب مرکزی برای تعیین شرایط بهینه خشک‌کردن فندق در خشک‌کن مادون قرمز با پیش‌تیمار مایکروویو مورد ارزیابی قرار گرفت. شرایط بهینه خشک‌کردن فندق در دمای هوای  $45^{\circ}\text{C}$ ، توان مایکروویو  $471/10\text{ W}$  و توان مادون قرمز  $1317/47\text{ W}$  پیشنهاد شد. مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ ضریب انتشار مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی، چروکیدگی و شاخص‌های رنگ  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  به ترتیب  $16/70 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ ،  $2/36\text{ kWh}$ ،  $2/65$ ،  $12/94$ ،  $54/10$  و  $14/97$  و به دست آمدند. استفاده از این شرایط بهینه به منظور کاهش ضایعات و کاهش تعداد آزمایش‌ها برای خشک‌کردن فندق با خشک‌کن مادون قرمز و پیش‌تیمار مایکروویو مناسب بود.

#### ۵- منابع

- [1] Demir, A.D., and Cronin, K. (2005). Modeling the kinetics of textural changes in hazelnuts

- drying of pomegranate arils using artificial neural networks and response surface methodology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13: 81-91.
- [26] Koyuncu, T., Pinar, Y., and 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.
- [27] Li, Z., Raghavan, G.S.V., and Wang, N. (2010). Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT-Food Science and Technology*, 43: 291-297.
- [28] Hashemi, G., Mowla, D., and Kazemeini, 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.
- [29] Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., and Benjapiyaporn, C. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems Engineering*, 105: 130-138.
- [30] Ibanoglu, E. (2002). Kinetic study on colour changes in wheat germ due to heat. *Journal of Food Engineering*, 51: 209-213.
- [31] Arslan, D., and Özcan, M.M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioprocess Technology*, 89: 504-513.
- [32] Karimi, F., and Rafiee, S. (2011). Optimization of air drying process for lavender leaves. *International Agrophysics*, 25: 229-239.
- [33] Youn, K.S., and Chung, H.S. (2012). Optimization of the roasting temperature and time for preparation of coffee-like maize beverage using the response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 46: 305-310.
- [34] Uysal, N., Sumnu, G. and Sahin. S. (2009). Optimization of microwave-infrared roasting of hazelnut. *Journal of Food Engineering*, 90: 255-261.
- [35] Erbay, Z., and Icier, F. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 91: 533-541.
- [36] Lin, Y.P., Lee, T.Y., Tsen, J.H., and King, V.A.E. (2007). Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying. *Journal of Food Engineering*, 79: 1295-1301.
- [14] Ceylan, İ., and Aktaş, M. (2008a). Energy analysis of hazelnut drying system-assisted heat pump. *International Journal of Energy Research*, 32: 971-979.
- [15] Ceylan, İ., and Aktaş, M. (2008b). Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural networks. *Applied Energy*, 85: 841-854.
- [16] Yang, Z.H., Huang, J., Zeng, G.M., Ruan, M., Zhou, C.S., Li, L., and Rong, Z.G. (2009). Optimization of flocculation conditions for kaolin suspension using the composite flocculant of MBFGA1 and PAC by response surface methodology. *Bioresource Technology*, 100: 4233-4239.
- [17] Arikan, M.F., Ayhan, Z., Soysal, Y., and Esturk, O. (2011). Drying characteristics and quality parameters of microwave-dried grated carrots. *Food and Bioprocess Technology*, 5: 3217-3229.
- [18] Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., and Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*, 100: 662-668.
- [19] Das, I., Das, S.K., and Bal, S. (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 62: 9-14.
- [20] Ozkan, A., Akbudak, B., and Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78: 577-583.
- [21] 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.
- [22] Shi, J.L., Pan, Z.L., McHugh, T.H., Wood, D., Hirschberg, E., and Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT-Food Science and Technology*, 41: 1962-1972.
- [23] Darvishi, H. (2012). Mathematical modeling, moisture diffusion and energy consumption in thin layer drying of alfalfa. *Middle-East. Journal of Scientific Research (MEJSR)*, 12: 511-516.
- [24] Darvishi, H. (2012). Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14: 94-102.
- [25] Nikbakhta, A. M., Motevalib, A., and Minaeib, S. (2014). Energy and exergy investigation of microwave assisted thin-layer

## Optimization of hazelnut kernel drying in an infrared dryer with microwave pretreatment using response surface methodology

Ahmadi Ghavidelan, M. <sup>1</sup>, Amiri Chayjan, R. <sup>2\*</sup>

1. MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: 2014/12/05 Accepted: 2015/05/25)

In this study, hazelnut kernels were dried in an infrared dryer with microwave pretreatment. To determine the optimization conditions of the hazelnut samples, response surface methodology and central composite design were used to investigate the effect of temperature levels (45, 65 and 85 ° C), infrared power levels (500, 1000 and 1500 W) and microwave power levels (270, 450 and 630 W) on drying of hazelnut kernels. The adequacy and accuracy of the fitted models (Lack of Fit and R<sup>2</sup>) were checked with analysis of variance (ANOVA). Response surfaces and contour plots were created to show the interaction between the independent and the response variables. Based on the experiments, the optimum conditions for the highest values of effective moisture diffusivity and L\* (color index) and the lowest values of consumption energy, shrinkage and a\*, b\* (color indices) were determined at air temperature of 45°C, microwave power of 470.86 W and infrared power of 1316.72 W. The optimum values of the response variables affecting the effective moisture diffusivity, consumption energy, shrinkage, L\*, a\* and b\* were obtained 2.35×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, 2.65 kWh, 12.94%, 54.10, 14.97 and 16.70, respectively.

**Keywords:** Color indices, Effective moisture diffusivity, Shrinkage, Total consumption energy.

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: amirireza@basu.ac.ir