

استفاده از روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی خشک‌کردن فندق در بسترسیتال مادون‌قرمز

مریم احمدی قویدلان^۱ و رضا امیری چایجان^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۱۷

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

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

*مکاتبه: مسئول Email: amirireza@basu.ac.ir

چکیده

برداشت اغلب محصولات کشاورزی در رطوبتی صورت می‌گیرد که مناسب انبارداری نمی‌باشد. بنابراین به منظور جلوگیری از فاسدشدن این محصولات، عملیات خشک‌کردن بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. در این پژوهش، از یک خشک‌کن بسترسیتال مادون‌قرمز برای خشک‌کردن مغز فندق استفاده شد. برای تعیین شرایط بهینه خشک‌شدن نمونه‌های فندق از روش سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی مرکز سطح (Face-Centered Central Composite Design)، جهت بررسی تأثیر دمای هوا در سه سطح ۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس، سرعت هوا در سه سطح ۱/۳۰، ۳/۰۹ و ۴/۸۷ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز در سه سطح ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات به‌عنوان متغیرهای مستقل استفاده شد. از روش تجزیه و تحلیل واریانس (عامل عدم برازش و مقدار R^2) برای تعیین مطلوبیت مدل استفاده شد. سطوح پاسخ و منحنی‌های تراز برای نشان دادن اثر متقابل متغیرهای مستقل با متغیرهای پاسخ (ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی، چروکیدگی و تغییرات کل رنگ (ΔE)) ایجاد شد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، شرایط بهینه جهت انتخاب مقادیر بیشینه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انتخاب مقادیر کمینه انرژی مصرفی، چروکیدگی و تغییرات کل رنگ (ΔE) اعمال شد. با توجه به نتایج، شرایط بهینه خشک‌کردن فندق در خشک‌کن بسترسیتال مادون قرمز به ترتیب در دمای هوای ۴۸/۹۶ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۵۳ متر بر ثانیه و توان مادون‌قرمز ۵۰۰ وات تعیین گردید. در این نقطه بهینه، مقادیر متغیرهای پاسخ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی، چروکیدگی و ΔE به ترتیب $3/13 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه، ۱۸/۷۶ کیلووات ساعت، ۱۱/۱۷ درصد و ۳/۷۱ به‌دست آمدند.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، خشک‌کن، روش سطح پاسخ، فندق، مادون قرمز

مقدمه

(۱۷-۱۵ درصد)، چربی‌ها (۶۰ درصد) و ویتامین‌ها از

اهمیت بالایی برخوردار است (آلفان و همکاران، ۱۹۹۶).

فندق علاوه بر ارزش غذایی بالا از خواص درمانی از

در بین انواع دانه‌ها، فندق به دلیل داشتن ترکیبات مغذی

خاص از جمله پروتئین‌ها (۱۹-۱۵ درصد)، کربوهیدرات‌ها

بیش‌خشک‌شدن که باعث اتلاف زمان و انرژی و احیاناً افت کیفیت و در نهایت ضرر اقتصادی می‌شود، جلوگیری کرد.

در این میان یکی از روش‌های جدید خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی، استفاده از تابش مادون قرمز است. تکنولوژی خشک‌کن مادون قرمز بر اساس خاصیت دفع آب توسط اشعه مادون قرمز است. زمانی‌که ماده در معرض اشعه مادون قرمز قرار می‌گیرد اشعه به سطح ماده برخورد کرده و به داخل آن نفوذ می‌کند و همین امر باعث می‌شود که نوسان مولکول‌ها در داخل ماده افزایش یابد. علت این افزایش این است که اشعه جذب شده باعث می‌شود که به طور همزمان در لایه‌های داخلی و سطح محصول دما افزایش یابد و در نهایت رطوبت توسط هوای خشک‌کردن جذب شود و نرخ خشک‌کردن افزایش یابد. عمق نفوذ اشعه به داخل ماده غذایی، به ترکیب و ساختار ماده غذایی و همچنین به طول موج‌های تابش مادون قرمز بستگی دارد. زمانی‌که ماده غذایی در معرض تابش مادون قرمز قرار می‌گیرد انرژی موج الکترومغناطیس با از دست دادن مقدار انرژی کم به طور مستقیم توسط ماده غذایی خشک شده جذب می‌شود (روئیز سلما و همکاران، ۲۰۰۸). استفاده از ترکیب اشعه مادون قرمز با سایر خشک‌کن‌ها برای افزایش کیفیت محصولات خشک شده از جمله سفتی تکه‌های موز خشک شده (نیمول و همکاران، ۲۰۰۷) و برای محصولاتی با رطوبت بالا مؤثرتر می‌باشد (میسو و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین با توجه به اهمیت غذایی و دارویی فندق استفاده از خشک‌کن مناسب برای خشک‌کردن فندق و تعیین شرایط بهینه خشک‌کردن ضروری به نظر می‌رسد.

در طی فرآیند خشک‌کردن به دلیل انتقال همزمان حرارت و جرم، تنش‌هایی در داخل مواد غذایی ایجاد می‌شود که منجر به تغییرات فیزیکی زیادی از قبیل: فروپاشی دیواره سلولی و چروکیدگی می‌شود و این تغییرات تعیین‌کننده خواص بافت مواد غذایی می‌باشد (پرتچایاواراکرن و

قبیل کاهش خستگی روحی روانی، محافظت از سیستم قلبی-عروقی، درمان مشکلات پوستی و افزایش انرژی برخوردار است (فتحی آچاچلوئی و همکاران، ۱۳۸۷). فندق به دو گونه با پوست و بدون پوست در بازار موجود است. فندق یکی از مهمترین مواد خام مصرفی در صنایع غذایی برای تولید شکلات، بیسکویت، آبنبات، شیرینی و بستنی می‌باشد (کونتینی و همکاران، ۲۰۰۸). به طور کلی ۸۰ درصد فندق تولید شده در صنایع غذایی به صورت ماده خام استفاده می‌شود و باقی آن برای تولید روغن مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمده‌ترین مشکل فندق تازه، ذخیره‌سازی آن می‌باشد.

خشک‌کردن یکی از روش‌های نگهداری صنعتی مواد غذایی است که در آن برای به حداقل رساندن تلفات مواد، با استفاده از هوای داغ مقدار آب و فعالیت‌ها در داخل میوه‌ها و سبزیجات کاهش می‌یابد. خشک‌کردن یک فرآیند حرارتی پیچیده است که در آن به طور همزمان انتقال حرارت و جرم ناپایدار اتفاق می‌افتد (ساهین و دینسر، ۲۰۰۵). حذف رطوبت از محصولات کشاورزی و مواد غذایی یکی از مهمترین فرآیندهای انرژی‌بر در صنایع مختلف است که از اهمیت صنعتی بالایی برخوردار می‌باشد و بازده خشک‌کردن نسبت به زمان و انرژی دارای اهمیت اقتصادی است. فرآیند خشک‌کردن بیش از ۱۵٪ انرژی مورد نیاز کل مصارف صنعتی را به خود اختصاص داده است. همچنین بازدهی انرژی این فرآیند اغلب پایین، بین ۲۵ تا ۵۰٪ می‌باشد. لذا مطالعه و اقدام به کاهش انرژی مصرفی مورد نیاز و زمان فرآیند، جهت افزایش بازدهی فرآیند امری اجتناب‌ناپذیر است (چوا و همکاران، ۲۰۰۱). جهت دستیابی به این اهداف باید به بحث مدیریت خشک‌کردن محصولات کشاورزی شامل چگونگی خشک‌کردن محصولات، مراحل خشک‌کردن، کنترل دقیق عوامل مؤثر بر زمان خشک‌کردن و کنترل دقیق عوامل مؤثر بر کیفیت نهایی محصول خشک شده توجه ویژه‌ای نمود تا بتوان روند خشک‌کردن را به طور صحیح پیش بینی کرد و از

رطوبت اولیه در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند و تا زمان انجام آزمایش‌ها در داخل یخچال در دمای 3 ± 1 درجه سلسیوس ذخیره شدند. برای به‌دست‌آوردن مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها حدود ۵۰ گرم از نمونه‌ها در ظرف پتری دیش در داخل یک آون خشک‌کن با درجه تفکیک یک درجه سلسیوس در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت شش ساعت قرار داده شدند. در طول مدت خشک‌کردن نمونه‌ها، هر یک ساعت یک‌بار توسط یک ترازوی دیجیتالی با درجه تفکیک 0.001 گرم وزن شدند و در پایان دو اندازه‌گیری متوالی (پنجم و ششم) زمانی‌که تغییرات وزن کمتر از یک درصد شد، آن به عنوان مقدار رطوبت اولیه در نظر گرفته شد. مقدار رطوبت اولیه فندق بر پایه خشک با استفاده از رابطه ۱ به‌دست آمد (سیلان و آکتاش، ۲۰۰۸).

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \quad [1]$$

که در آن MC_{db} رطوبت بر پایه خشک، M_i وزن اولیه نمونه (کیلوگرم) و M_d وزن ثانویه نمونه (کیلوگرم) بود. میزان رطوبت اولیه ۴۲ درصد بر پایه خشک به‌دست آمد.

تجهیزات

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۱). خشک‌کن شامل: محفظه خشک‌کن، دمنده گریز از مرکز، المنت‌های حرارتی و واحد کنترل (شامل اینورتر مدل VFD-M، با درجه تفکیک 0.1 هرتز و ساخت تایوان برای کنترل سرعت دمنده و ترموستات آتین، با درجه تفکیک $0.1 \pm$ و ساخت ایران برای کنترل دمای هوای ورودی) می‌باشد. در طول انجام آزمایش‌ها، برای اندازه‌گیری دمای محیط و رطوبت نسبی هوا از یک دستگاه رطوبت‌سنج-دماسنج (Lutron, YK-2005RH) ساخت تایوان استفاده شد. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری دمای محیط با درجه تفکیک 0.1 درجه

همکاران، ۲۰۰۸). پایداری کارتنوئیدها و میزان قهوه‌ای شدن در طول فرآیند خشک‌کردن و انبارداری مسئله مهمی است که در افزایش کیفیت و بازارپسندی محصول تأثیرگذار می‌باشد (کوکا و همکاران، ۲۰۰۷). تغییرات ناشی از خشک‌شدن باعث می‌شود که ویژگی‌های سطحی ماده غذایی تغییر کند و در نهایت منجر به تغییر رنگ ماده غذایی شود.

روش سطح پاسخ^۱ (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل کردن و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل می‌باشد بسیار مفید می‌باشد و هدف از آن بهینه‌کردن متغیرهای پاسخ می‌باشد (مونتگومری، ۲۰۰۱). روش سطح پاسخ یک ابزار مفید برای توصیف شاخص‌های کیفی در طول فرآوری مواد غذایی می‌باشد (تامپسون، ۱۹۸۲). در این فرآیند پارامتر پاسخ در یک مقیاس ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بیشتر مسائل کاربردی بیش از یک عامل در کیفیت و عملکرد یک محصول دخالت دارند که این عوامل باید مورد بررسی قرار گیرند. در بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ، متغیرهای ورودی به عنوان متغیرهای مستقل تعریف می‌شوند و تأثیر این متغیرها بر متغیرهای خروجی (وابسته) مورد مطالعه قرار می‌گیرد (سجادی، ۱۳۸۵). مزیت اصلی RSM کاهش تعداد تکرارهای آزمایش‌ها برای ارزیابی پارامترهای چندگانه و روابط متقابل آنهاست (امیری، ۱۳۸۸).

هدف این پژوهش بررسی تأثیر شرایط خشک‌کردن بسترسیال مادون قرمز بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی فندق خشک‌شده و به‌دست آوردن شرایط بهینه خشک‌کردن آن به روش سطح پاسخ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

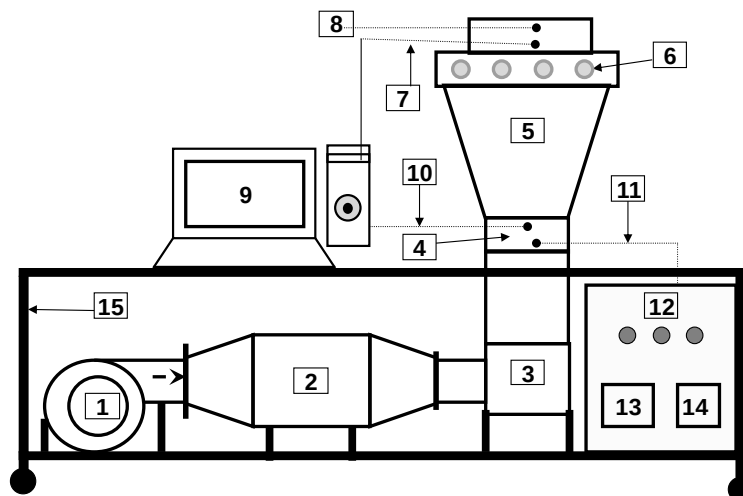
تهیه، نگهداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های فندق تازه از باغ‌های شهرستان رحیم آباد، استان گیلان تهیه شدند. نمونه‌ها به منظور حفظ کیفیت و

¹ Response surface methodology

خشک‌کن استفاده از یک ترمومتر مدل آتین مگا ساخت ایران با درجه تفکیک ۰/۱ درجه سلسیوس، استفاده شد.

سلسیوس و رطوبت نسبی هوا با درجه تفکیک ۱٪ را دارد. همچنین برای اندازه‌گیری دمای هوای داخل محفظه



شکل ۱- طرح شماتیک خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز

(۱)- دمنده و موتور الکتریکی، (۲)- گرمکن الکتریکی، (۳)- محفظه اختلاط، (۴)- ورودی نمونه ها، (۵)- محفظه خشک کن، (۶)- لامپ های مادون قرمز، (۷)- سنسور دمای خروجی، (۸)- سنسور سرعت هوا، (۹)- رایانه، (۱۰)- سنسور دمای هوای ورودی، (۱۱)- ترموکوپل، (۱۲)- تابلو برق، (۱۳)- ترموستات، (۱۴)- اینورتر و (۱۵)- شاسی)

حسب کیلووات ساعت می‌باشد (کویونکو و همکاران، ۲۰۰۷). انرژی مصرفی فندق خشک شده با خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز (E_{t-IR})، از مجموع انرژی صرف شده توسط گرمایش مادون قرمز (E_{IR})، کیلووات ساعت) و گرمایش جابجایی (E_c)، کیلووات ساعت) محاسبه شد (داس و همکاران، ۲۰۰۴):

$$E_{IR} = IR \times t \quad [3]$$

IR توان مصرف شده مادون قرمز (کیلووات) است.

$$E_c = \frac{T_{in} - T_{am}}{3.6 \times 10^6 V_h} (C_{pa} + C_{pv} h_a) Q t \quad [4]$$

T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای هوای ورودی به داخل محفظه خشک‌کن و دمای هوای محیط (درجه سلسیوس)، V_h حجم مخصوص هوا (مترمکعب بر کیلوگرم)، C_{pa} و C_{pv} به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه هوا و بخار (با مقدار ۱۰۰۴/۱۶ و ۱۸۲۸/۸ ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، h_a رطوبت مطلق هوا (کیلوگرم بخار بر کیلوگرم هوای خشک) و Q دبی هوای ورودی به محفظه خشک‌کن

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از قانون دوم فیک استفاده شد. با توجه به کروی بودن فندق فرضیاتی در نظر گرفته شد که توزیع رطوبت در جرم ماده به صورت یکنواخت باشد (ارتورک و همکاران، ۲۰۱۰).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad [2]$$

$$= \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_e n^2 \pi^2 t}{r^2}\right)$$

که در آن MR نسبت رطوبت است، n تعداد جملات خشک کردن (۱، ۲، ۳، ...)، r شعاع هندسی فندق (متر)، M_o مقدار رطوبت اولیه (d.b.) و M_e مقدار رطوبت تعادلی (d.b.) است. مقدار M_e در مقایسه با مقدار M_o یا M_t بسیار کوچک است، بنابراین از آن صرف‌نظر شد. D_e ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه) است.

انرژی مصرفی

انرژی کل مورد نیاز یک دستگاه خشک‌کن برای عملیات خشک‌کردن را انرژی مصرفی می‌گویند که واحد آن بر

استفاده شد. پارامتر L^* از طیف سفید تا مشکی در محدوده صفر تا ۱۰۰، a^* از طیف سبز تا قرمز در محدوده ۱۰۰- تا ۱۰۰+ و b^* از طیف آبی تا زرد در محدوده ۱۰۰- تا ۱۰۰+ توسط این دستگاه اندازه‌گیری شدند (دویماز و همکاران، ۲۰۰۶). تغییرات در هر یک از شاخص‌های رنگ (L^* ، a^* و b^*) کالیبره شد و سپس با استفاده از رابطه‌های ۸، ۹ و ۱۰ محاسبه شدند:

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad [8]$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad [9]$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad [10]$$

تغییرات کلی رنگ از رابطه ۱۱ به‌دست آمد (رمانو و همکاران، ۲۰۰۸):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad [11]$$

که در آن ΔE تغییرات کل رنگ دانه‌های فندق قبل و بعد از خشک‌کردن می‌باشد. L^* ، a^* و b^* مقدار رنگ نمونه‌ها بعد از خشک‌کردن و L_0^* ، a_0^* و b_0^* مقدار رنگ نمونه‌ها قبل از خشک‌کردن می‌باشد.

طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

روش سطح پاسخ، جهت یافتن حالت بهینه برهمکنش فاکتورها و برآورد بهترین شرایط بهینه فرآیند با کمترین تعداد آزمایش قابل اجراست. در این پژوهش به‌منظور بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل دمای هوای خشک‌کردن در سه سطح (۴۵، ۶۵ و ۸۵ درجه سلسیوس)، سرعت هوای خشک‌کردن در سه سطح (۱/۳۰، ۳/۰۹ و ۴/۸۷ متر بر ثانیه) و توان مادون قرمز در سه سطح (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ وات) با متغیرهای پاسخ (وابسته) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه)، انرژی مصرفی (کیلووات ساعت)، چروکیدگی (درصد) و تغییرات کل رنگ (ΔE) از معادله چندجمله‌ای مرتبه دوم زیر استفاده شد:

$$y_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad [12]$$

(مترمکعب بر ثانیه) است. h_a و V_h از طریق نمودار سایکرومتریک به دست آمدند.

چروکیدگی

در هر آزمایش، چروکیدگی مغزهای فندق با استفاده از روش تعیین حجم نمونه‌ها قبل و بعد از خشک کردن محاسبه شد. در این پژوهش اندازه‌گیری‌ها با استفاده از یک کولیس دیجیتال (Groz EDF-6) ساخت آمریکا با درجه تفکیک ۰/۰۱ میلی‌متر انجام شد. به این ترتیب که برای هر آزمایش ابعاد ۲۵ نمونه فندق (قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک)، قبل و بعد از خشک‌کردن اندازه‌گیری شد و میانگین آنها در نظر گرفته شد. قطرهای محصولات دانه‌ای یک اندازه و یکنواخت نیستند، لیکن پیرامون یک قطر متوسطی از دانه‌ها پراکنده هستند. غالباً شکل مواد غذایی مشابه شکل‌های هندسی در نظر گرفته می‌شود، از آنجا که فندق شبیه به کره بود برای بدست آوردن حجم این شکل هندسی، میانگین قطر هندسی (قطر معادل) از رابطه ۵ به‌دست آمد (مؤمن‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹):

$$D = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}} \quad [5]$$

که در آن D قطر میانگین هندسی و A ، B و C (متر) به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک بر حسب متر می‌باشد. حجم فندق قبل و بعد از خشک‌کردن (V_0 و V) از رابطه ۶ به‌دست آمد (دیسا و همکاران، ۲۰۱۰):

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \quad [6]$$

و در نهایت درصد چروکیدگی از رابطه ۷ به‌دست آمد (دیسا و همکاران، ۲۰۰۸):

$$S_h = \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right) \times 100 \quad [7]$$

که S_h درصد چروکیدگی و ΔV تغییرات حجم فندق قبل و بعد از خشک‌کردن است.

رنگ

از یک رنگ‌سنج HP-200 ساخت چین برای اندازه‌گیری رنگ نمونه‌ها پس از خشک‌کردن و در شرایط اولیه

متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ و علامت منفی مدل به مفهوم تأثیر غیر مستقیم متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ بود (چن و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین مقدار ضرایب نشان‌دهنده این بود که آن متغیر مستقل بیشترین تأثیر را بر مقدار متغیر پاسخ دارد.

تأثیر متغیرهای مستقل بر مقدار ضریب نفوذ مؤثر

رطوبت

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر متغیرهای خطی دمای هوا و توان مادون قرمز بر روی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪) معنی‌دار بود. علاوه بر آن اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز و اثر عبارت درجه‌ی دوم دمای هوا نیز معنی‌دار بود (در سطح ۵٪). اثر سرعت هوا، عبارت درجه دوم سرعت، عبارت درجه دوم توان مادون قرمز، اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا و اثر متقابل سرعت هوا و توان مادون قرمز معنی‌دار نبودند.

علامت مثبت ضرایب رگرسیون تخمین زده شده حاصله از مدل طرح مرکب مرکزی (جدول ۲) به مفهوم تأثیر مستقیم دمای هوا و توان مادون قرمز بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بود. همچنین مقدار ضرایب نشان‌دهنده این بود که پارامتر دما بیشترین تأثیر را بر مقدار ضریب نفوذ مؤثر داشت. علامت مثبت بیان‌گر این بود که با افزایش دما و توان مادون قرمز ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت. مقدار بالای R^2 نشان‌دهنده مناسب بودن مدل‌های RSM بود.

برای تجسم اثرات متقابل دو متغیر مستقل روی هر متغیر پاسخ، منحنی‌های تراز و رویه سطح پاسخ برای هر مدل برازش شده ایجاد شد. در شکل ۲ الف و ب به ترتیب با استفاده از رویه سطح پاسخ و منحنی‌های تراز، اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نمونه‌های فندق خشک‌شده در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز، نشان داده شده است. بیشترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر ($10^{-9} \times 1/50 \text{ m}^2/\text{s}$) در دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس و توان مادون قرمز

که در معادله فوق y_k پاسخ‌های پیش‌بینی شده، x_i متغیرهای کد شده متغیرهای طبیعی (مستقل)، k تعداد متغیرها، β_0 ثابت مدل، β_j ضرایب متغیرها، β_{ij} ضریب پارامتر درجه دوم و β_{ij} ضرایب اثرات متقابل متغیرها می‌باشند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۹). ضرایب β از طریق انجام آزمایش و نهایتاً رگرسیون بدست آمدند. برازش سطوح پاسخ و بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن با استفاده از نرم‌افزار دیزاین-اکسپرت نسخه ۷ انجام شد، و تجزیه واریانس (ANOVA) بر روی ضرایب مدل درجه دوم با این نرم‌افزار انجام شد. این پژوهش، به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح مرکب مرکزی مرکز سطح، بهینه‌سازی شد. هر فاکتور در طرح مرکب مرکزی مرکز سطح، در سه سطح مختلف (۱-، ۰ و ۱+)، دو نقطه محوری ($+\alpha$ و $-\alpha$) و شش تکرار در نقطه مرکزی برای تخمین خطای آزمایش مطالعه شد. در صورتی که مقدار نقاط محوری (α) را برابر یک در نظر بگیریم، نقاط محوری بر سطح مماس شده و طرح مرکب مرکزی مرکز سطح (Face-CCD) ایجاد می‌شود. در بیشتر مسائل RSM مناسب است که متغیرهای طبیعی به متغیرهای کد شده $x_1, x_2, \dots, x_n$ تبدیل شوند. در این پژوهش، مقدار متغیرهای مستقل بین ۱- و ۱+ کدبندی شد. در طرح مکعب مرکزی ۲۰ واحد آزمایشی حاصل شد (جدول ۱).

نتایج و بحث

در این پژوهش از روش سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی مرکز سطح به منظور بهینه‌سازی خشک‌کردن فندق با خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز استفاده شد. برای هر متغیر پاسخ یک مدل مرتبه دوم برازش شد. تجزیه و تحلیل رگرسیون و ANOVA برای برازش مدل و تعیین معنی‌داری آماری متغیرهای مدل انجام شد. ضرایب رگرسیون تخمین زده شده مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم و ANOVA به ترتیب در جدول ۲ داده شده است. علامت مثبت ضرایب رگرسیون تخمین زده شده حاصله از مدل طرح مرکب مرکزی به مفهوم تأثیر مستقیم

تأثیر متغیرهای مستقل بر مقدار انرژی مصرفی

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۲) نشان داد که دمای هوا، سرعت هوا و اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا (در سطح ۱٪) اثر معنی‌داری را بر انرژی مصرفی داشتند. درحالی‌که هیچ اختلاف معنی‌داری برای توان مادون قرمز، اثر متقابل سرعت هوا و توان مادون قرمز، اثر متقابل سرعت هوا و عبارت درجه دوم دمای هوا، عبارت درجه دوم سرعت هوا و عبارت درجه‌ی دوم توان مادون قرمز مشاهده نشد، همچنین مقدار R^2 ۰/۹۶ به دست آمد. این مقدار نشان دهنده این بود که مدل پیش‌بینی شده برای پیش‌بینی مقدار انرژی مصرفی مناسب بود. منحنی‌های رویه سطح پاسخ و تراز با استفاده از متغیرهای معنی‌دار دمای هوا و سرعت هوا برای انرژی مصرفی ایجاد شد.

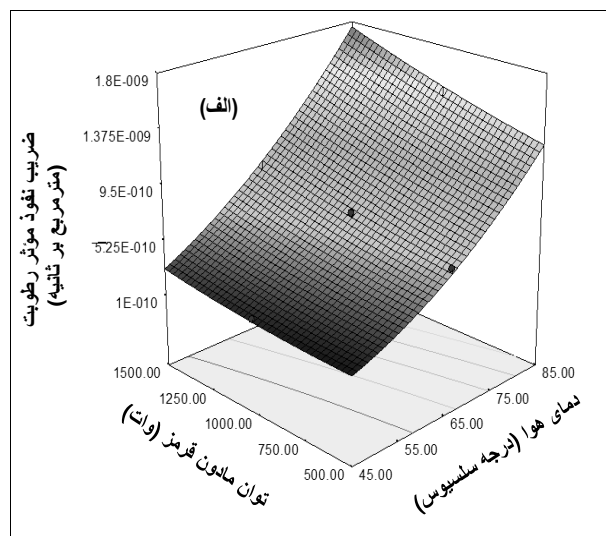
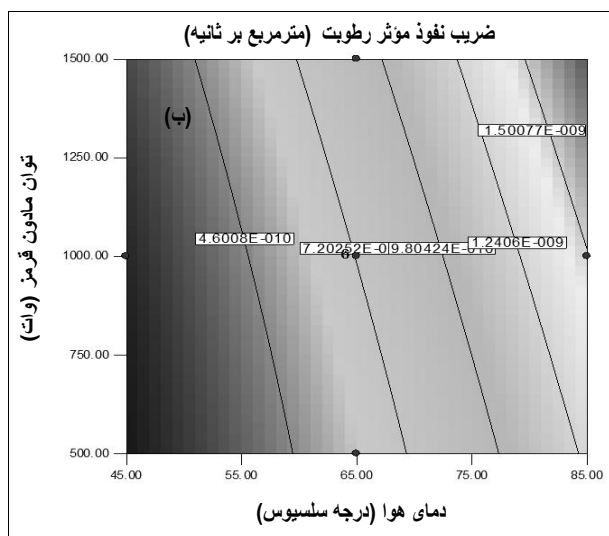
۱۵۰۰ وات و کمترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ($10^{-10} \times 6.0/4$) در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و توان مادون قرمز ۵۰۰ وات مشاهده شد. تأثیر دمای هوا و توان مادون قرمز بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در صورتی که سایر متغیرها در سطح میانه خود ثابت باشند، به گونه‌ای بود که با افزایش دمای هوا (۴۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس) و توان مادون قرمز (۵۰۰ تا ۱۵۰۰ وات) مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به دلیل انتقال جرم به ترتیب از $10^{-10} \times 3.4/2$ به $2/s - m^2$ و از $10^{-10} \times 9.8/5$ به $2/s - m^2$ افزایش یافت. زمانی‌که نمونه‌ها در دمای بالا خشک شدند، افزایش انرژی گرمایش باعث افزایش فعالیت مولکول‌های آب و در نهایت افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت شد (زیائو و همکاران، ۲۰۱۰). این با نتایج به دست آمده توسط سایر محققین مطابقت داشت از قبیل: روبرتز و همکاران (۲۰۰۸) برای دانه‌های انگور در محدوده‌ی دمای ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس، میرزایی و همکاران (۲۰۰۹) برای میوه زردآلو در محدوده‌ی دمای ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس و آغباشلو و همکاران (۲۰۱۰) برای میوه آلبالو در محدوده‌ی دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس در گرمایش مادون قرمز، ماده در معرض اشعه الکترومغناطیس قرار می‌گیرد. برای مواد بیولوژیک، نفوذ اشعه مادون قرمز به داخل ماده باعث نوسان مولکول‌های آب می‌شود. در این حالت مولکول‌ها برای انتقال از مواد متخلخل به انرژی کمتری نیاز خواهند داشت، بنابراین با افزایش توان مادون قرمز ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت (پتاره و شارما، ۲۰۰۶). مقادیر به دست آمده برای ضریب نفوذ مؤثر با مقادیر گزارش شده توسط سایر محققین قابل قیاس بود از جمله: شارما و همکاران (۲۰۰۵) و کاکلار و همکاران (۲۰۰۹) مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را برای تکه‌های پیاز و انگور بی‌دانه خشک شده با خشک‌کن مادون قرمز، به ترتیب $10^{-10} \times 6.2/0$ تا $2/s - m^2$ و $10^{-10} \times 3/5$ تا $2/s - m^2$ گزارش کردند.

جدول ۱- نقشه آزمایش‌های فرآیند خشک کردن فندق توسط نرم‌افزار Design Expert با مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده متغیرهای پاسخ

مقادیر کد شده متغیرهای مستقل(مقادیر واقعی)			مقادیر مشاهده شده متغیرهای پاسخ				مقادیر پیش‌بینی شده متغیرهای پاسخ					
واحد آزمایش	نوع نقاط	دمای هوا (درجه سلسیوس)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	توان مادون قرمز (وات)	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m²/s)	انرژی مصرفی (kWh)	چروکیدگی (%)	ΔE	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m²/s)	انرژی مصرفی (kWh)	چروکیدگی (%)	ΔE
۱	حقیقی	۴۵ (-۱)	۱/۳ (-۱)	۵۰۰ (-۱)	۲/۳۷×۱۰ ^{-۱۰}	۱۸/۹	۱۰/۱۴	۴/۵۷	۲/۷۶×۱۰ ^{-۱۰}	۱۸/۷۵	۱۰/۴۸	۳/۷۸
۲	حقیقی	۸۵ (+۱)	۱/۳ (-۱)	۵۰۰ (-۱)	۱/۲۶×۹ ^{-۱۰}	۷/۲۳	۱۹/۲۶	۹/۱۱	۱/۲۷×۹ ^{-۱۰}	۸/۲۶	۱۹/۷۹	۹/۳۸
۳	حقیقی	۴۵ (-۱)	۴/۸۷ (+۱)	۵۰۰ (-۱)	۱/۸۱×۱۰ ^{-۱۰}	۴۲/۲	۱۰/۱۱	۴/۹۰	۱/۸۵×۱۰ ^{-۱۰}	۴۵/۰۰	۱۰/۶۰	۵/۰۱
۴	حقیقی	۸۵ (+۱)	۴/۸۷ (+۱)	۵۰۰ (-۱)	۱/۳۶×۹ ^{-۱۰}	۲۱/۶	۱۸/۹۰	۱۰/۴۸	۱/۳۳×۹ ^{-۱۰}	۲۰/۱۴	۱۸/۶۹	۹/۸۱
۵	حقیقی	۴۵ (-۱)	۱/۳ (-۱)	۱۵۰۰ (+۱)	۴/۶۵×۱۰ ^{-۱۰}	۱۲/۶	۱۵/۸۱	۶/۳۳	۴/۶۹×۱۰ ^{-۱۰}	۱۵/۱۰	۱۵/۹۷	۶/۶۵
۶	حقیقی	۸۵ (+۱)	۱/۳ (-۱)	۱۵۰۰ (+۱)	۱/۸۷×۹ ^{-۱۰}	۵/۸	۲۴/۲۳	۱۱/۴۰	۱/۸۴×۹ ^{-۱۰}	۴/۰۴	۲۳/۶۹	۱۰/۹۴
۷	حقیقی	۴۵ (-۱)	۴/۸۷ (+۱)	۱۵۰۰ (+۱)	۲/۵۷×۱۰ ^{-۱۰}	۴۴/۶	۱۴/۹۸	۵/۰۷	۲/۲۲×۱۰ ^{-۱۰}	۴۴/۶۰	۱۴/۴۰	۴/۴۵
۸	حقیقی	۸۵ (+۱)	۴/۸۷ (+۱)	۱۵۰۰ (+۱)	۱/۸۱×۹ ^{-۱۰}	۱۸/۰۰	۲۱/۲۹	۷/۵۱	۱/۷۴×۹ ^{-۱۰}	۱۹/۱۹	۲۰/۹۰	۷/۹۴
۹	محوری	۴۵ (-۱)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۲/۴۶×۱۰ ^{-۱۰}	۳۹/۳	۱۱/۵۳	۳/۴۳	۲/۳۴×۱۰ ^{-۱۰}	۳۴/۱۳	۱۱/۱۱	۴/۴۲
۱۰	محوری	۸۵ (+۱)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۱/۳۸×۹ ^{-۱۰}	۱۵/۲	۱۸/۴۱	۸/۵۳	۱/۴۹×۹ ^{-۱۰}	۱۶/۱۷	۱۹/۰۱	۸/۹۶
۱۱	محوری	۶۵ (۰)	۱/۳ (-۱)	۱۰۰۰ (۰)	۸/۲۸×۱۰ ^{-۱۰}	۱۱/۲	۱۷/۶۹	۶/۶۵	۸/۰۴×۱۰ ^{-۱۰}	۹/۵۵	۱۷/۱۸	۷/۳۲
۱۲	محوری	۶۵ (۰)	۴/۸۷ (+۱)	۱۰۰۰ (۰)	۵/۸۵×۱۰ ^{-۱۰}	۳۲/۸	۱۵/۱۶	۵/۷۰	۷/۱×۱۰ ^{-۱۰}	۳۰/۲۵	۱۵/۸۴	۶/۴۴
۱۳	محوری	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۵۰۰ (-۱)	۶/۲۳×۱۰ ^{-۱۰}	۲۴/۵	۱۴/۹۷	۳/۵۳	۵/۹۸×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۲۵	۱۳/۸۲	۴/۶۲
۱۴	محوری	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۵۰۰ (+۱)	۷/۷۵×۱۰ ^{-۱۰}	۲۱/۹	۱۶/۳۵	۴/۸۰	۹/۰۱×۱۰ ^{-۱۰}	۱۹/۹۵	۱۷/۶۸	۵/۱۳
۱۵	مرکزی	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۷/۸۴×۱۰ ^{-۱۰}	۲۰/۸۵	۱۶/۸۲	۶/۱۰	۷/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۱۳	۱۵/۲۵	۵/۶۰
۱۶	مرکزی	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۶/۴۳×۱۰ ^{-۱۰}	۲۰/۶۱	۱۴/۱۹	۶/۰۶	۷/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۱۳	۱۵/۲۵	۵/۶۰
۱۷	مرکزی	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۸/۰۷×۱۰ ^{-۱۰}	۲۰/۶۲	۱۴/۲۴	۶/۰۹	۷/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۱۳	۱۵/۲۵	۵/۶۰
۱۸	مرکزی	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۸/۰۹×۱۰ ^{-۱۰}	۲۰/۵۳	۱۴/۹۵	۶/۰۵	۷/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۱۳	۱۵/۲۵	۵/۶۰
۱۹	مرکزی	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۷/۴۳×۱۰ ^{-۱۰}	۲۱/۲	۱۵/۱۴	۶/۰۸	۷/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۱۳	۱۵/۲۵	۵/۶۰
۲۰	مرکزی	۶۵ (۰)	۳/۰۹ (۰)	۱۰۰۰ (۰)	۷/۷۲×۱۰ ^{-۱۰}	۲۰/۶۵	۱۶/۵۶	۶/۰۷	۷/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۲۲/۱۳	۱۵/۲۵	۵/۶۰

جدول ۲- تجزیه و تحلیل واریانس و ضرایب رگرسیون تخمین زده شده مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم برای متغیرهای پاسخ

متغیرها	درجه آزادی	ضرایب تخمین زده شده				مجموع مربعات				F-values			
		ΔE	S_h (%)	E_{t-IR} (kwh)	D_e (m ² .s ⁻¹)	ΔE	S_h (%)	E_{t-IR} (kwh)	D_e (m ² .s ⁻¹)	ΔE	S_h (%)	E_{t-IR} (kwh)	D_e (m ² .s ⁻¹)
مدل	۹	۷/۲۶× ^{۱۰} -۱۰	۲۲/۱۴	۱۵/۲۶	+۵/۶۱	۴/۴۵× ^{۱۸} -۱۰	۲۰۲۸/۹۳	۲۱۲/۳۷	۷۶/۱۳	۶۱/۸۳ ^{**}	۲۸/۳۸ ^{**}	۱۹/۲۹ ^{**}	۱۲/۳۸ ^{**}
β_1	۱	۶/۲۹× ^{۱۰} -۱۰	-۸/۹۸	۳/۹۵	+۲/۲۷	۳/۹۶× ^{۱۸} -۱۰	۸۰۵/۸۷	۱۵۶/۲۶	۵۱/۶۶	۴۹۴/۶۹ ^{**}	۱۰۱/۴۴ ^{**}	۱۲۷/۷۶ ^{**}	۷۵/۶۳ ^{**}
β_2	۱	-۴/۷۲× ^{۱۱} -۱۰	۱۰/۳۵	-۰/۶۷	-۰/۴۴	۲/۲۲× ^{۲۰} -۱۰	۱۰۷۰/۶۰	۱۰۷۰/۶۰	۱/۹۴	۴/۴۷	۱۳۴/۷۶ ^{**}	۳/۶۵ ^{NS}	۲/۸۴ ^{NS}
β_3	۱	۱/۵۱× ^{۱۰} -۱۰	-۱/۱۵	۱/۹۳	+۰/۲۵	۲/۲۸× ^{۱۹} -۱۰	۱۳/۲۹	۳۷/۱۳	۰/۶۳	۳۷/۱۳	۱/۶۷ ^{NS}	۳۰/۳۶ ^{**}	۰/۹۲ ^{NS}
β_{12}	۱	۳/۷۲× ^{۱۱} -۱۰	-۳/۵۹	-۰/۳۱	-۰/۲۰	۱/۱۱× ^{۲۰} -۱۰	۱۰۳/۱۸	۱۰۳/۱۸	۰/۳۲	۰/۷۵	۱۲/۹۹ ^{**}	۰/۶۱ ^{NS}	۰/۴۷ ^{NS}
β_{13}	۱	۹/۳۶× ^{۱۱} -۱۰	-۰/۱۴	-۰/۴۰	-۰/۳۳	۷/۰۲× ^{۲۰} -۱۰	۰/۱۶	۱/۲۷	۰/۸۶	۱/۲۷	۲/۰۲ ^{NS}	۱/۰۴ ^{NS}	۱/۲۶ ^{NS}
β_{23}	۱	-۳/۹۱× ^{۱۱} -۱۰	۰/۸۲	-۰/۴۲	-۰/۸۶	۱/۲۲× ^{۲۰} -۱۰	۵/۳۳	۱/۴۳	۵/۸۹	۱/۴۳	۰/۶۷ ^{NS}	۱/۱۷ ^{NS}	۸/۶۳ [*]
β_1^2	۱	۱/۳۷× ^{۱۰} -۱۰	۳/۰۲	-۰/۱۹	+۱/۰۹	۵/۱۷× ^{۲۰} -۱۰	۲۵/۰۳	۰/۱۰	۳/۲۵	۰/۱۰	۳/۱۵ ^{NS}	۰/۰۸ ^{NS}	۴/۷۶ ^{NS}
β_2^2	۱	۳/۰۶× ^{۱۱} -۱۰	-۲/۲۳	۱/۲۶	+۱/۲۸	۲/۵۸× ^{۲۱} -۱۰	۱۳/۷۱	۴/۳۶	۴/۵۲	۴/۳۶	۱/۷۳ ^{NS}	۳/۵۶ ^{NS}	۶/۶۲ [*]
β_3^2	۱	۲/۳۳× ^{۱۱} -۱۰	-۱/۰۳	-۱/۰۳	-۰/۷۳	۱/۴۹× ^{۲۱} -۱۰	۲/۹۴	۰/۶۸	۱/۴۵	۰/۶۸	۰/۳۷ ^{NS}	۰/۵۵ ^{NS}	۲/۱۲ ^{NS}
باقیمانده	۱۰	$\lambda \times^{۲۰}-۱۰$				$\lambda \times^{۲۰}-۱۰$	۷۹/۴۴	۱۲/۲۳	۶/۸۳				
عامل عدم برازش	۵						۷۹/۱۴	۵/۸۳	۶/۸۳				۳۹۰۲/۲۶ ^{**}
R^2		۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۱								
Adj- R^2		۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۸۴								



شکل ۲- الف) منحنی رویه سطح پاسخ و ب) منحنی تراز برای اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نمونه‌های فندق خشک‌شده در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز

افزایش سرعت هوا موجب می‌شد تا سرعت انتقال حرارت از داخل محفظه خشک‌کن به محیط افزایش یافته، دمای محفظه و به تبع آن نرخ خشک‌شدن نمونه‌ها کم و انرژی مصرفی زیاد شود. این افزایش انرژی مصرفی در سرعت هوای ورودی بالا به نظر می‌رسد، با وجود اینکه افزایش تابش مادون قرمز باعث افزایش نرخ خشک شدن و کاهش زمان خشک شدن شده است، اما باعث افزایش در انرژی مصرفی نیز شده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که سرعت هوای پایین و دمای هوای بالا به علت کاهش مصرف انرژی، مناسب بود. افضل و همکاران (۱۹۹۹) در بررسی انرژی مصرفی جو در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-جابجایی دریافتند که استفاده از خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-جابجایی باعث کاهش مقدار انرژی مصرفی نسبت به نمونه‌های خشک‌شده با خشک‌کن جابجایی در دماهای مختلف شد، آنها همچنین مشاهده کردند که با کاهش سرعت هوا به علت کاهش زمان خشک‌کردن، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافت. نتایج مشابه دیگری نیز توسط سایر محققین گزارش شده است از جمله: خوش تقاضا و

شکل ۳ الف و ب اثر متقابل دمای هوا و سرعت هوا را بر انرژی مصرفی در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز نشان می‌دهد. مطابق شکل، بیشترین مقدار انرژی مصرفی (۳۹/۳۹ کیلووات ساعت) در محدوده دمای هوا ۴۵ تا ۵۲ درجه سلسیوس و در محدوده سرعت هوای ۳/۸۲ تا ۴/۸۶ m/s و کمترین مقدار انرژی مصرفی (۱۳/۶۰ کیلووات ساعت) در محدوده دمای هوای ۵۴ تا ۸۵ درجه سلسیوس و در محدوده سرعت هوای ۱/۳۱ تا ۲/۴۷ m/s به دست آمد. از این شکل می‌توان دریافت که با افزایش دمای هوا و کاهش سرعت هوا انرژی مصرفی کاهش یافت. دلیل آن می‌توانست این باشد که در دمای بالا و سرعت هوای پایین، آب آزاد محصول سریعتر تبخیر شده و زمان خشک‌کردن به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش انرژی مصرفی شد (افضل و همکاران، ۱۹۹۹). در سرعت هوای پایین، تماس مؤثر بین هوا و نمونه‌های فندق افزایش یافت و منجر به کاهش انرژی مصرفی شد. در این خشک‌کن به دلیل قرار گرفتن لامپ‌های مادون قرمز در خروجی خشک‌کن با افزایش سرعت هوای ورودی، نرخ خشک شدن کاهش و زمان خشک شدن افزایش پیدا کرد.

و توان مادون قرمز نسبت مستقیم داشت. همچنین مقدار ضرایب تخمین زده شده نشان داد که دمای هوا نسبت به توان مادون قرمز بیشترین تأثیر را بر مقدار چروکیدگی داشت.

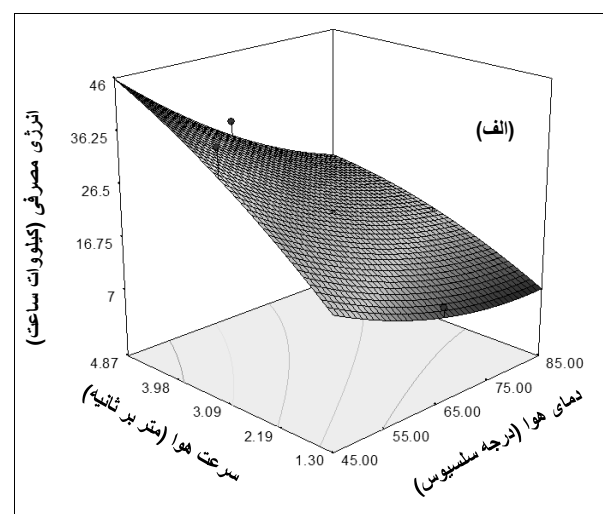
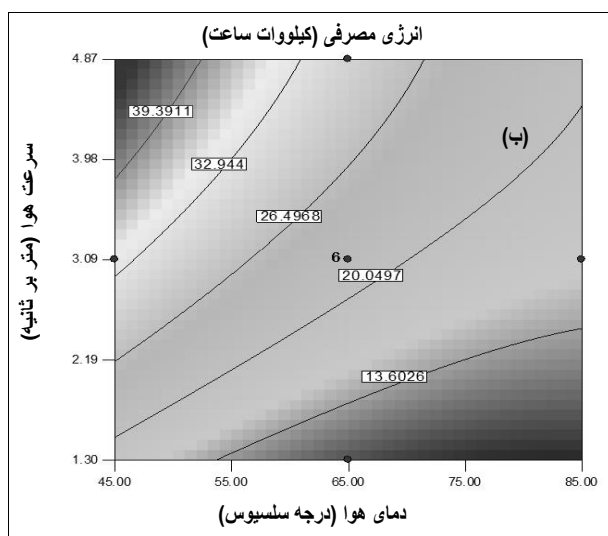
شکل ۴ الف و ب به ترتیب اثر دمای هوا و توان مادون قرمز را بر چروکیدگی نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است هر دو متغیر مستقل، اثرهای افزایشی بر چروکیدگی داشتند. در صورتی که تمام متغیرها در سطح میانه خود ثابت باشند، با افزایش دمای هوا از ۴۵ به ۸۵ درجه سلسیوس و توان مادون قرمز از ۵۰۰ به ۱۵۰۰ وات مقدار میانگین چروکیدگی به ترتیب از ۱۱/۱۱٪ به ۱۹/۰۱٪ و از ۱۳/۸۲٪ به ۱۷/۶۸٪ افزایش یافت. بیشترین چروکیدگی در دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس و توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات و کمترین چروکیدگی در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و توان مادون قرمز ۵۰۰ وات اتفاق افتاد. افزایش توان مادون قرمز باعث افزایش دمای سطح محصول شد و این افزایش دما منجر به افزایش انتقال جرم و فروپاشی ساختار سلولی شد و در نهایت میزان چروکیدگی فندق افزایش یافت (روئزلوپز و همکاران، ۲۰۱۲).

همکاران (۲۰۰۷) برای برنج و آغباشلو و همکاران (۲۰۰۸) برای زرشک به این نتیجه رسیدند.

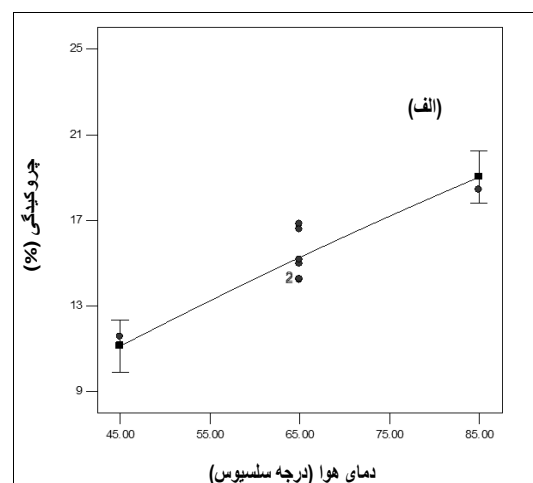
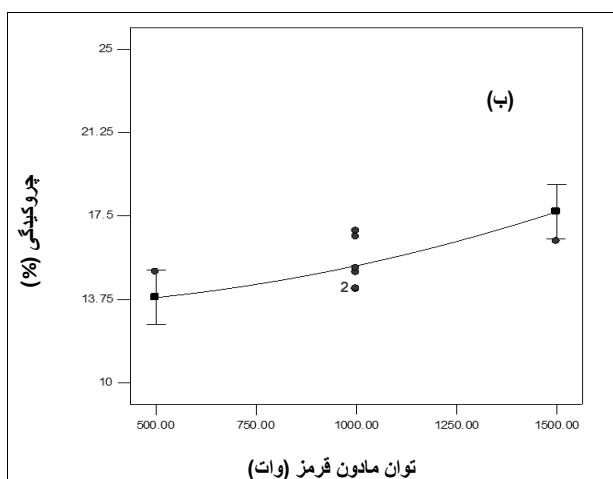
کویونکو و همکاران (۲۰۰۷) برای خشک‌کردن میوه زالزالک (*Crataegus monogyna* Jacq.) گزارش کردند که با افزایش دما، مقدار انرژی مصرفی کاهش یافت. همچنین نیمول و همکاران (۲۰۰۷) برای خشک‌کردن موز از یک خشک‌کن ترکیبی سوپرهیت-مادون قرمز استفاده کردند. آنها مقدار انرژی مصرفی پمپ خلأ را در فشار هفت کیلوپاسکال بین ۲/۷۵ و ۴/۶۳ کیلووات ساعت گزارش کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای هوا انرژی مصرفی کاهش یافت.

تأثیر متغیرهای مستقل بر چروکیدگی

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس جهت بررسی اثر دمای هوا، سرعت هوا و توان مادون قرمز بر مقدار چروکیدگی نمونه‌های فندق خشک‌شده با خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که فقط دمای هوا و توان مادون قرمز (در سطح ۱٪) اثر معنی‌داری بر مقدار چروکیدگی داشتند، همچنین مقدار R^2 ۰/۹۴ به دست آمد. علامت مثبت ضرایب تخمین زده شده مدل پیش‌بینی شده برای چروکیدگی نمونه‌های فندق خشک‌شده، نشان‌دهنده این بود که مقدار چروکیدگی با متغیرهای مستقل دمای هوا



شکل ۳- الف) منحنی رویه سطح پاسخ و ب) منحنی تراز برای اثر متقابل دمای هوا و توان مادون قرمز بر انرژی مصرفی نمونه‌های فندق خشک‌شده در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز



شکل ۴- درصد چروکیدگی نمونه‌های فندق به عنوان تابعی از الف) دمای هوا و ب) توان مادون قرمز در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز

هوای ۳/۰۹ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۱۰۰۰ وات به‌دست آمد.

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (جدول ۲) نشان داد که دمای هوا (در سطح ۱٪)، اثر متقابل سرعت هوا و توان مادون قرمز و عبارت درجه دوم سرعت هوا (در سطح ۵٪) تأثیر معنی‌داری بر تغییرات کل رنگ (ΔE) نمونه‌های فندق داشتند. همچنین مقدار R^2 ۰/۹۱ به‌دست آمد. ضریب مثبت (جدول ۲) بیان‌گر این بود که با افزایش دمای هوا تغییرات کل رنگ (ΔE) افزایش یافت.

شکل ۵-الف اثر دمای هوا بر تغییرات کل رنگ (ΔE) نمونه‌های فندق را نشان می‌دهد. مطابق شکل، دمای هوا یک اثر افزایشی بر تغییرات کل رنگ (ΔE) داشت. در صورتی‌که تمام متغیرها در سطح میانه خود ثابت باشند، با افزایش دمای هوا از ۴۵ به ۸۵ درجه سلسیوس ΔE از ۴/۴۲ به ۸/۹۶ افزایش یافت. مطابق نتایج، دمای هوا مؤثرترین عامل در تیره‌تر شدن دانه‌های فندق بود. در اکثر موارد، تخریب ترکیبات رنگدانه‌ها در دماهای بالا بیشتر است. همچنین در شکل ۵-ب اثر متقابل سرعت هوا و توان مادون قرمز در دمای ثابت ۶۵ درجه سلسیوس بر تغییرات کل رنگ (ΔE) مشاهده شد. بر این اساس افزایش سرعت هوا تا میزان مشخص ۳/۹۳ متر بر ثانیه، ΔE را کاهش داد ولی بعد از آن ΔE را افزایش

تأثیر متغیرهای مستقل بر تغییرات رنگ

شاخص روشنی (L^*)، شاخص قرمزی (a^* مثبت) و شاخص زردی (b^* مثبت) دانه‌های فندق تازه استفاده شده در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز به ترتیب ۵۹/۷۱، ۱۵/۱۸ و ۲۰/۲۱ به دست آمدند. تغییر رنگی که در میوه‌ها و سبزیجات در طول فرآیند خشک‌کردن رخ می‌دهد تنها به‌علت تبخیر آب سطح محصول نیست بلکه به‌دلیل واکنش‌های خاصی از قبیل واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی، قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی و واکنش‌های کاراملی نیز می‌باشد (وادیمبال و جایان، ۲۰۰۷). مقدار L^* نمونه‌های فندق خشک شده نسبت به مقدار L^* نمونه‌های تازه کاهش یافت و خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز باعث تیره‌تر شدن نمونه‌ها شد. کاهش در L^* نشان‌دهنده‌ی تیره‌تر شدن نمونه‌های فندق به علت تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای از طریق واکنش مایلارد بود. مقدار a^* و b^* نیز نمونه‌های فندق خشک شده نسبت به مقدار a^* و b^* نمونه‌های تازه افزایش یافت. بیشترین مقدار تغییرات کل رنگ (ΔE) دانه‌های فندق (۱۱/۴۰) در دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۳۰ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات و کمترین مقدار آن (۳/۴۳) در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس، سرعت

قرمز بهتر بود. سازیلک و یونال (۲۰۰۵) شرایط مطلوب شاخص‌های رنگ L^* و a^* تکه‌های سیر در طول فرآیند آب‌زدایی را گزارش کردند. آنها مقادیر بیشتر L^* و مقادیر کمتر a^* را در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به عنوان شرایط مطلوب گزارش کردند، در حقیقت نمونه‌های روشن‌تر را با قرار دادن تکه‌های سیر در دمای پایین به‌دست آوردند. همچنین پات و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که دمای هوای بالا و خشک‌کردن بیش از حد باعث افزایش قابل توجه قرمزی (شاخص a^*) در تکه‌های انبه خشک‌شده شدند.

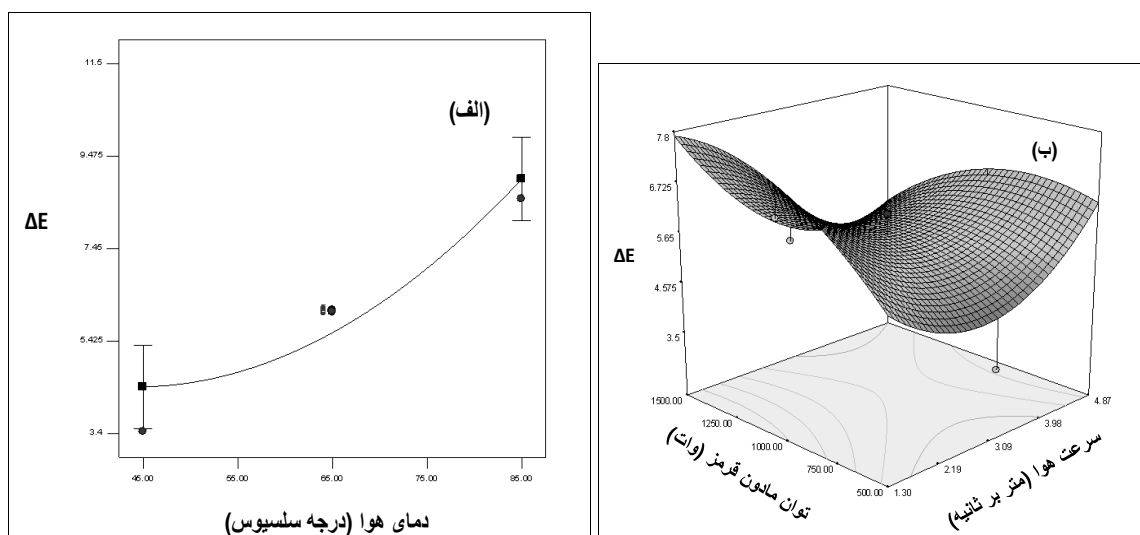
بهینه‌سازی

با استفاده از روش تابع مطلوبیت (با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۷)، ده راه‌حل برای تعیین شرایط بهینه با مقدار شاخص مطلوبیت ۰/۹۲ برای داده‌های آزمایشی حاصله از خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز، ارائه شد. راه‌حل‌های پیشنهاد شده با استفاده از تابع مطلوبیت نشان داد که شرایط بهینه خشک‌کردن فندق در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز در دمای هوای ۴۸/۹۶ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۵۳ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۵۰۰ وات به‌دست آمد. نرم‌افزار شرایط بهینه متغیرهای مستقل را بر اساس هدف ماکزیمم‌سازی یا مینیمم‌سازی متغیرهای پاسخ تعیین کرد و در این پژوهش، شرایط بهینه‌ای بر اساس بیشینه مقدار متغیر پاسخ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و کمینه مقادیر متغیرهای پاسخ انرژی مصرفی کل، چروکیدگی و تغییرات کل رنگ (ΔE) بود. در این نقاط بهینه مقادیر متغیرهای پاسخ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی، چروکیدگی و ΔE به ترتیب $3/13 \times 10^{-1}$ مترمربع بر ثانیه، ۱۸/۷۶ کیلووات ساعت، ۱۱/۱۷ درصد و ۳/۷۱ به‌دست آمدند. در شکل ۶ یکی از منحنی‌های مطلوبیت بر حسب متغیرهای مستقل و پاسخ نشان داده شده است. مقادیر پیش‌بینی شده مشخصه‌های خشک‌کردن در این شرایط بهینه برای پیش‌بینی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی، چروکیدگی و

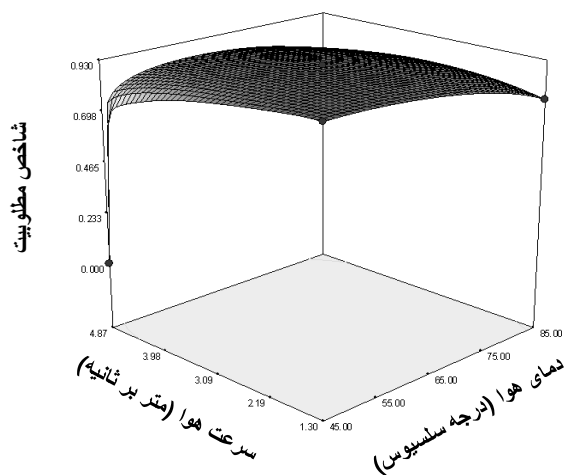
داد که این افزایش در توان مادون قرمز ۱۵۰۰ وات بسیار مشهود می‌باشد، به‌طوری که بیشترین مقدار ΔE در این شکل به محدوده‌ی سرعت ۱/۳۰ تا ۱/۵۴ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۹۵۸ تا ۱۵۰۰ وات تعلق گرفت. همچنین کمترین مقدار ΔE نمونه‌های فندق هم در محدوده‌ی سرعت ۱/۶۷ تا ۳/۹۳ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۵۰۰ وات به‌دست آمد، که بیانگر این است که در هر دوی سرعت پایین هوا (۱/۳۰ متر بر ثانیه) و سرعت بالای هوا (۴/۸۷ متر بر ثانیه)، با افزایش توان مادون قرمز تغییرات کل رنگ نمونه‌های فندق به طور مشخص افزایش یافت. با افزایش توان مادون قرمز، حرارت بیشتری در داخل مغز فندق ایجاد شده و منجر به افزایش دمای هوا شد. واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی، غیرآنزیمی، سوختگی و سیاه‌شدن سطحی نمونه‌ها افزایش یافت و همین امر منجر به افزایش تغییرات رنگ شد. در طی فرآیند خشک‌کردن، اکسیداسیون کاروتن نیز صورت می‌گیرد. در نتیجه این اکسیداسیون از شدت رنگ کاروتن کاسته می‌شود و در اثر حرارت ممکن است رنگدانه سبز کلروفیل تبدیل به فئوفتین شود که رنگ زیتونی مایل به قهوه‌ای دارد. به طور کلی، زمانی که دما افزایش می‌یابد ظرفیت نگهداری رنگدانه نیز کاهش می‌یابد (فاطمی، ۱۳۹۱). عمده‌تاً این تغییر در رنگ دانه‌ها می‌تواند به علت تأثیر حرارت بر روی ترکیبات حساس به حرارت از قبیل کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و ویتامین‌ها باشد که همین امر منجر به تغییر در رنگ در طول فرآیند خشک‌کردن می‌شود. بایسال و همکاران (۲۰۰۳) خشک‌کردن سیر را با سه خشک‌کن میکروویو، مادون قرمز و هوای داغ گزارش کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که هیچ اختلافی در مقدار روشنایی سیر خشک‌شده با هر سه خشک‌کن نسبت به نمونه‌های تازه وجود نداشت اما مقدار قرمزی و زردی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. آنها همچنین گزارش کردند که کیفیت رنگ سیر در خشک‌کن هوای داغ در دمای ۷۰ درجه سلسیوس نسبت به خشک‌کن میکروویو و مادون

بیشتری نسبت به سایر متغیرهای پاسخ برخوردار بودند، لذا توجه بیشتری روی جواب‌هایی که کمترین مقدار چروکیدگی و بیشترین مقدار ΔE را داشتند، شد.

تغییرات کل رنگ (ΔE) استفاده شد و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. از آنجایی که در بهینه‌سازی خشک‌کردن فندق، چروکیدگی و تغییرات رنگ از اهمیت



شکل ۵- الف) تغییرات کل رنگ (ΔE) به عنوان تابعی از دمای هوا و ب) منحنی سطح پاسخ ΔE به عنوان تابعی از دمای هوا و سرعت هوای نمونه‌های فندق خشک‌شده در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز



شکل ۶- منحنی مطلوبیت در توان مادون قرمز ۵۰۰ وات در دما و سرعت‌های هوای مختلف

جوابهای پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، توان مادون قرمز در کمترین مقدار (۵۰۰ وات)، دمای هوا در محدوده‌ی ۴۵ تا ۵۱/۹۴ درجه سلسیوس و سرعت هوا در محدوده‌ی ۱/۴۴ تا ۱/۹۰ متر بر ثانیه قرار داشت. با توجه به شرایط بهینه‌ای که توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد، می‌توان از نتایج بدست آمده چنین برداشت نمود که بهتر

با توجه به شرایط بهینه مشاهده شد که کمترین مقدار چروکیدگی و ΔE مربوط به دمای هوا، سرعت هوا و توان مادون قرمز پایین بود. دماهای بالا تأثیر منفی بر تغییرات رنگ نمونه‌های فندق خشک شده گذاشت. دماهای بالا اگرچه باعث کاهش زمان خشک‌کردن شد اما از طرفی افزایش تغییرات رنگ را در پی داشت. در اکثر

است خشک‌کردن دانه‌های فندق برای افزایش کیفیت و افزایش بازارپسندی در دمای هوا، سرعت هوا و توان مادون قرمز پایین صورت گیرد.

تحقیقات زیادی برای تعیین شرایط بهینه محصولات کشاورزی صورت گرفته است از جمله: مادامبا (۱۹۹۷) از روش سطح پاسخ برای تعیین شرایط بهینه سیر خشک‌شده استفاده کرد. دمای هوا، ضخامت، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا به عنوان متغیرهای مستقل و L^* ، شاخص نوری (OI)، نسبت بازجذب مجدد آب (RR) و مقدار رطوبت نهایی (Mf) به عنوان متغیرهای وابسته انتخاب شدند. شرایط بهینه خشک‌کردن سیر به روش لایه نازک، دمای هوای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت دو میلیمتر تکه‌های سیر گزارش شد. لین و همکاران

(۲۰۰۷) شرایط بهینه تکه‌های سیب‌زمینی آب‌زدایی شده با خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-انجمادی را دمای هوای ۳۴ تا ۳۷ درجه سلسیوس، ضخامت تکه‌های سیب‌زمینی ۷ تا ۸ میلیمتر و فاصله ۵۰ میلی‌متر از اشعه مادون قرمز را گزارش کردند. کارگزاری و همکاران (۱۳۹۰) شرایط بهینه خشک‌کردن اسمزی هویج را دمای هوای ۳۰ درجه سلسیوس، زمان ۲۲۷/۱۱۹ دقیقه، غلظت شربت گلوکز ۴۳/۳۱۵ و غلظت نمک ۵ درصد برای دستیابی به محتوای رطوبتی ماده‌ی غذایی ۶۶/۹۷ (گرم بر ۱۰۰ گرم نمونه‌ی تازه)، کاهش وزن ۴/۴۷۵ (گرم بر ۱۰۰ گرم نمونه‌ی تازه)، جذب مواد جامد از محلول اسمزی ۶۲/۵۲ (گرم بر ۱۰۰ گرم نمونه‌ی تازه) و فعالیت آبی ۰/۷۸۹ گزارش کردند.

جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی فندق خشک‌شده با خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز با روش سطح پاسخ

شماره جواب بهینه	دمای هوا (°C)	سرعت هوا (m/s)	توان مادون قرمز (W)	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m ² /s)	انرژی مصرفی (kWh)	چروکیدگی (%)	ΔE	شاخص مطلوبیت
۱	۴۸/۹۶	۱/۵۳	۵۰۰/۰۰	$۳/۱۳ \times 10^{-۱۰}$	۱۸/۷۶	۱۱/۱۷	۳/۷۱	۰/۹۲
۲	۴۹/۰۵	۱/۵۴	۵۰۰/۰۰	$۳/۱۴ \times 10^{-۱۰}$	۱۸/۸۴	۱۱/۱۷	۳/۷۰	۰/۹۲
۳	۴۸/۸۵	۱/۵۴	۵۰۰/۰۱	$۳/۱۱ \times 10^{-۱۰}$	۱۸/۹۵	۱۱/۱۲	۳/۶۹	۰/۹۲
۴	۴۹/۰۷	۱/۵۶	۵۰۰/۰۵	$۳/۱۳ \times 10^{-۱۰}$	۱۸/۹۷	۱۱/۱۶	۳/۶۹	۰/۹۲
۵	۴۸/۶۴	۱/۴۹	۵۰۰/۰۲	$۳/۱۱ \times 10^{-۱۰}$	۱۸/۵۳	۱۱/۱۴	۳/۷۳	۰/۹۲
۶	۴۸/۹۳	۱/۵۹	۵۰۰/۰۰	$۳/۱۰ \times 10^{-۱۰}$	۱۹/۲۹	۱۱/۰۹	۳/۶۶	۰/۹۲
۷	۵۰/۱۰	۱/۶۴	۵۰۰/۰۰	$۳/۲۴ \times 10^{-۱۰}$	۱۹/۱۹	۱۱/۳۱	۳/۶۷	۰/۹۲
۸	۵۰/۴۵	۱/۷۱	۵۰۰/۰۱	$۳/۲۶ \times 10^{-۱۰}$	۱۹/۶۳	۱۱/۳۲	۳/۶۳	۰/۹۲
۹	۵۱/۹۴	۱/۹۰	۵۰۰/۰۰	$۳/۴۲ \times 10^{-۱۰}$	۲۰/۴۵	۱۱/۴۸	۳/۵۹	۰/۹۲
۱۰	۴۵/۰۰	۱/۴۴	۵۰۹/۳۶	$۲/۶۸ \times 10^{-۱۰}$	۲۰/۰۹	۱۰/۳۳	۳/۶۹	۰/۹۲

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر دمای هوا، سرعت هوا و توان مادون قرمز در خشک کردن نمونه‌های فندق با خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین شرایط بهینه فرآیندها با استفاده از روش سطح

پاسخ تعیین شد. در شرایط بهینه دمای هوای ۴۸/۹۶ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۵۳ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۵۰۰ وات، مقادیر بهینه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی، چروکیدگی و ΔE به ترتیب

۱۰-۱۳×۳ مترمربع بر ثانیه، ۱۸/۷۶ کیلووات ساعت، ۱۱/۱۷ درصد و ۳/۷۱ به‌دست آمدند.

منابع مورد استفاده

- امیری م، موسی‌خانی م، علاقه‌بندها م، و سعیدی س ر، ۱۳۸۸، تحلیل و طراحی آزمایش‌ها با رویکرد روش‌های رویه پاسخ. انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی قزوین.
- سجادی ج، ۱۳۸۵، بهینه‌سازی در طراحی آزمایشات. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- فاطمی ح، ۱۳۹۱، اصول تکنولوژی نگهداری مواد غذایی. شرکت سهامی انتشار.
- فتحی آچاقلوئی ب، آزادمرد دمیرچی ص و حصاری ج، ۱۳۸۹. بررسی اثرات فرآیندهای پالایش روی میزان ترکیبات جزیی روغن فندق، فصلنامه علوم و صنایع غذایی، ۷ (۲)، ۱۹-۲۸.
- کارگزاری م، امام جمعه ز و معینی س، ۱۳۹۰، بهینه‌سازی خشک‌کردن اسمزی هویج با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۲ (۲)، ۲۱۵-۲۲۴.
- مؤمن‌زاده ل، زمردیان ع و مولا د، ۱۳۸۹، بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی میزان چروکیدگی نخود سبز در یک خشک‌کن بستر سیال با کمک ماکروویو، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۶ (۴)، ۲۷۷-۲۸۵.
- Afzal TM, Abe T and Hikida Y, 1999. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering* 42: 177-182.
- Aghbashlo M, Kianmehr MH 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.
- Aghbashlo M, Kianmehr MH and Hassan-Beygi SR, 2010. Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*prunus cerasus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation* 34: 351-365.
- Alphan E, Pala M, Ačkurt F and Yılmaz T, 1996. Nutritional composition of hazelnuts and its effects on glucose and lipid metabolism. *Acta Horticulturae* 445: 305-310.
- Baysal T, Icier F, Ersus S and Yıldız H, 2003. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology* 218: 68-73.
- Caglar A, Toğrul İT and Toğrul H, 2009. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. *Food and Bioproducts Processing* 87: 292-300.
- Ceylan I and Aktaş M, 2008. Energy analysis of hazelnut drying system-assisted heat pump. *International Journal of Energy Research* 32: 971-979.
- Chen X, Du W and Liu D, 2008. Response surface optimization of biocatalytic biodiesel production with acid oil. *Biochemical Engineering Journal* 40: 423-429.
- Chua KJ, Mujumdar AS, Hawlader MNA, Chou SK and Ho JC, 2001. Effect of continuous and stepwise change in drying temperature on drying characteristics and product quality. *Food Research International* 34: 721-731.
- Contini M, Baccelloni S, Massantini R and Anelli G, 2008. Extraction of natural antioxidants from hazelnut (*Corylus avellana* L.) shell and skin wastes by long maceration at room temperature. *Food Chemistry* 110: 659-669.
- Das I, Das SK and Bal S, 2004. Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering* 62: 9-14.
- Dissa AO, Desmorieux H, Bathiebo J and Koulidiati J, 2008. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 88: 429-437.
- Dissa AO, Desmorieux H, Savadogo PW, Savadogo BG and Koulidiati J, 2010. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of spirulina. *Journal of Food Engineering* 97: 410-418.

- Doymaz İ, Tuğrul N and Pala M, 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*, 77: 559-565.
- Erenturk S, Gulaboglu MS and Gultekin S, 2010. Experimental determination of effective moisture diffusivities of whole- and cut-rosehips in convective drying. *Food and Bioprocess Processing* 88: 99-104.
- Khoshtaghaza MH, Sadeghi M and Amiri Chayjan R, 2007. Study of rough rice drying process in fixed and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Science and Natural Resource* 14: 127-137.
- Koca N, Burdurlu HS and Karadeniz F, 2007. Kinetics of color changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering* 78(2): 449-455.
- 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.
- Lin YP, Lee JH, Tsen TY and King VAE, 2007. Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying. *Journal of Food Engineering* 79: 1295-1301.
- Madamba PS, 1997. Optimization of the drying process: an application to the drying of garlic. *Drying Technology: An International Journal* 15: 117-136.
- Madamba PS, 2002. The response surface methodology: an application to optimize dehydration operations of selected agricultural crop. *LWT-Food Science and Technology* 35: 584-592.
- Meeso N, Nathakaranakule A, Madhiyanon T and Soponronarit S, 2004. Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering* 65: 293-301.
- Mirzaee E, Rafiee S, Keyhani A and Emam-Djomeh Z, 2009. Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *Research in Agricultural Engineering* 55: 114-120.
- Montgomery DC, 2001. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley and Sons, New York.
- Montgomery DC, 2005. *Design and analysis of experiments*. Arizona State University.
- Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T and Soponronnari S, 2007. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering* 81: 624-633.
- Pathare PB and Sharma GP, 2006. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering* 93: 285-291.
- Pott I, Neidhart S, Mühlbauer W and Carle R, 2005. Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 6: 412-419.
- Prachayawarakorn S, Tia W, Plyto N and Soponronnarit S, 2008. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering* 85: 509-517.
- Roberts JS, Kidd DR and Padilla-Zakour OZ, 2008. Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering* 89: 460-465.
- Romano R, Baranyai L, Gottschalk K and Zude M, 2008. An approach for monitoring the moisture content changes of drying banana slices with laser light backscattering imaging. *Food and Bioprocess Technology* 4: 410-414.
- Ruiz Celma A, Rojas S and Lopez-Rodríguez F, 2008. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing* 47: 1810-1818.
- Ruiz-López II, Ruiz-Espinosa H, Arellanes-Lozada P, Bárcenas-Ppzos ME and García-Alvarado MA, 2012. Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkage food products. *Journal of Food Engineering* 108: 427-435.
- Sacilik K and Unal G, 2005. Dehydration characteristics of kastamonu garlic slices. *Biosystems Engineering* 92: 207-215.
- Sahin AZ and Dincer I, 2005. Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. *Journal of Food Engineering* 71: 119-126.
- Sajilata MG, Singhal RS and Kamat MY, 2008. Supercritical CO₂ extraction of c-linolenic acid (GLA) from *Spirulina platensis* ARM 740 using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 84: 321-326.

- Sharma GP, Verma RC and Pathare PB, 2005. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 67: 361-366.
- Thompson D, 1982. Response surface experimentation. *Journal of Food Processing and Preservation* 6: 155-188.
- Vadivambal R and Jayas DS, 2007. Changes in quality of microwave-treated agricultural products-a review. *Biosystems Engineering* 98: 1-16.
- Xiao HW, Pang CL, Wang LH, Bai JW, Yang WX and Gao ZJ, 2010. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering* 105: 233-24.
- Yang ZH, Huang J, Zeng GM, Ruan M, Zhou CS, Li L and Rong ZG, 2009. Optimization of flocculation conditions for kaolin suspension using the composite flocculant of MBFGA1 and PAC by response surface methodology. *Bioresource Technology* 100(3): 4233-4239.

Application of response surface methodology for optimization of hazelnut drying under infrared fluidized bed

M Ahmadi Ghavidelan¹ and R Amiri Chayjan^{2*}

Received: April 05, 2015

Accepted: April 05, 2016

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

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

*Corresponding author: E mail: amirireza@basu.ac.ir

Abstract

Most of agricultural products are harvested in high moisture level which is not suitable for storage. Therefore, to prevent deterioration, drying operations are performed on them. In this study, hazelnut kernels were dried in an infrared fluidized bed dryer. To determine the optimized conditions of the hazelnut samples, response surface methodology and Face-Centered Central Composite Design (Face-CCD) were used to investigate the effect of temperature levels (45, 65 and 85 °C), air velocity levels (1.30, 3.09 and 4.87 m/s) and infrared power levels (500, 1000 and 1500 W) under infrared fluidized bed dryer. The adequacy and accuracy of the fitted models (lack of fit and R^2) were checked with analysis of variance (ANOVA). Response surfaces and contour plots were created to show the interaction between the independent variables and the response variables (effective moisture diffusivity, consumption energy, shrinkage and the total color difference). Based on the experiments, the optimum conditions for the maximum values of effective moisture diffusivity and minimize values of consumption energy, shrinkage and ΔE (total color difference) were applied. According to the results in infrared fluidized bed dryer, the optimum conditions were determined at air temperature of 48.96°C, air velocity of 1.53 m/s and infrared power of 500W. The optimum values of the response variables affecting the effective moisture diffusivity, consumption energy, shrinkage and the total color difference (ΔE) were obtained $3.13 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 18.76 kWh, 11.17% and 3.71, respectively.

Key words: Drying, Hazelnut, Infrared, Optimization, Response surface methodology