

بهینه‌سازی عملکرد یک خشک‌کن ترکیبی (سیستم خلاء-مادون قرمز) در فرآیند تولید پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی

مصطفی جعفری زادگان^۱، رضا امیری چایجان^{۲*} و رویا کریمیان^۳

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

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

۳- استاد گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۹

پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸

کلمات کلیدی:

پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی،

خشک‌کردن،

خلائی- مادون قرمز،

محتوای فنل کل،

خواص فیزیکی

چکیده

در این پژوهش اثر متغیرهای خشک‌کردن به شیوه خلائی- مادون قرمز شامل دمای هوای داخل محفظه و فشار خلأ بر خواص حرارتی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی خشک‌کردن) و ورقه‌های قارچ دکمه‌ای و شیمیایی (محتوای فنل کل) و کیفی (شاخص‌های رنگ نهایی ΔL^* ، Δa^* و Δb^*) پودر قارچ دکمه‌ای مورد مطالعه قرار گرفتند. فرآیند خشک‌کردن نمونه‌ها در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۵ و ۷۰ °C و سه سطح فشار خلأ ۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa صورت گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای محفظه، نرخ تبخیر رطوبت بافت افزایش یافت که منجر به کاهش زمان خشک‌شدن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک‌کن خلائی- مادون قرمز شد. افزایش دمای هوای محفظه بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت و ورقه‌های قارچ دکمه‌ای اثر مثبت و بر انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن اثر منفی داشت. افزایش دما سبب افزایش اختلاف بیشتر بین شاخص‌های رنگ L^* ، a^* و b^* پودر قارچ دکمه‌ای نسبت به قارچ تازه شد. نقطه بهینه خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در دمای ۴۰ °C و فشار خلأ ۴۰/۸۲۳ kPa به دست آمد. مقدار بهینه متغیر-های مستقل شامل ضریب انتشار مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن، محتوای فنل کل و شاخص‌های رنگ نهایی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* به ترتیب برابر با $9-3/06 \times 10^{-9}$ m²/s، ۱۰۸۸ MJ/kg و ۱۰۸۸ mg/g، ۲/۷۶، ۱۵/۲۸، ۲/۵۵ و ۹/۲۶ به دست آمدند. نتایج نشان داد که خشک‌کردن تحت دمای پایین‌تر و فشار خلأ متوسط سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید. قابلیت جریان‌پذیری پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی خوب گزارش شد.

* عهده دار مکاتبات

Email: amirireza@basu.ac.ir

مقدمه

قارچ دکمه‌ای خوراکی (*Agaricus bisporus*) یکی از محصولات زراعی است که امروزه مصرف آن به عنوان یک منبع غذایی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس آمار سازمان خواربار جهانی در سال ۲۰۱۷، تولید سالانه قارچ جهان در مجموع هفت میلیون و ۷۰۰ هزار تن است که از این میزان، ایران با تولید ۹۰ هزار تن قارچ در سال، رتبه پنجم را در جهان دارد. قارچ دکمه‌ای خوراکی به عنوان یک ماده غذایی، با ارزش تغذیه‌ای بالا، بین ۲۵ گونه قارچ خوراکی ۴۰٪ از سهم بازار را به خود اختصاص داده است (۲۶).

قارچ‌های خوراکی منبع خوبی از ترکیبات نیتروژنتیک مانند پلی ساکاریدها (ب-گلوکان)، لیاف رژیم، تریپن‌ها، پپتیدها، گلیکوپروتئین‌ها، الکل‌ها، عناصر معدنی، اسیدهای چرب اشباع نشده و اسیدهای لینولئیک و اوئیکو و آنتی‌اکسیدان‌ها و ویتامین‌ها مانند ترکیبات فنلی، توکوفرول، اسید آسکوربیک و ویتامین B Complex و پیش ساز ویتامین D می‌باشند (۲۲). قارچ‌ها همچنین دارای اثرات ضدقارچی، ضدالتهابی، ضد سرطانی، ضد ویروسی، ضد باکتری، هپاتوپروتئینی، ضد دیابتی، هیپولیپوئیدی، آنتی‌ترومبوتیک و هیپوتانزیلی هستند (۳۷). قارچ‌های خوراکی منبع املاح مورد نیاز بدن مانند پتاسیم، کلسیم، آهن، منیزیم، منگنز، سولفور و فسفر و مس می‌باشد. که فعالیت مغزی را به دلیل داشتن فسفر تقویت می‌کند (۹).

قارچ‌ها پس از برداشت به دلیل رطوبت زیاد، سرعت تنفس بالا، عدم وجود کوتیکول و فعالیت آنزیمی شدید، دارای ماندگاری کمتری نسبت به سایر سبزی‌ها بوده و به سرعت فاسد شده و بلافاصله پس از برداشت تغییر رنگ آن‌ها آغاز می‌شود (۲۸). جهت افزایش ماندگاری، قارچ‌های خوراکی باید تحت فرآیندهای فرآوری قرار گیرند، از این رو محققین روش‌های مختلفی نظیر استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر تغییر یافته، منجمد کردن، خشک کردن، پودر کردن، تیمار با محلول‌های آبی،

ترکیبات مهارکننده فعالیت آنزیمی و بلانچ کردن را برای نگهداری و افزایش زمان ماندگاری قارچ مورد بررسی قرار داده‌اند (۲۵). اما خشک کردن یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که برای قارچ‌های خوراکی مورد استفاده قرار گرفته است (۳۰). این فرآیندها باعث افزایش زمان ماندگاری آن از چند روز به چند ماه تا یک سال و سهولت حمل و نقل و نگهداری می‌شود (۴). قارچ دکمه‌ای به عنوان یک محصول با ارزش تغذیه‌ای بالا، امکان تولید آن به مقدار زیاد در کشور ایران وجود دارد. لذا در صورتی که به روش مناسب خشک‌شده و به پودر تبدیل شود، می‌تواند جهت غنی‌سازی محصولات مختلف غذایی از جمله انواع سوپ‌ها، کیک، بیسکویت و ماکارونی مورد استفاده قرار گیرد (۲۸).

خشک‌کن خلأی- مادون قرمز، با کاهش رطوبت در فشار پایین و به منظور بهبود کیفیت محصول با ارزش غذایی بالا انجام می‌شود (۳۹؛ ۱۴). در این نوع خشک‌کن، انتقال جرم به دلیل افزایش اختلاف فشار بخار بین داخل و خارج از محصول بسیار زیاد است (۲). امروزه پرتودهی با مادون قرمز به عنوان منبع انرژی حرارتی برای خشک کردن بسیاری از محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است که بخشی از پرتوهای فروسرخ تابیده شده به سمت محصول از آن عبور کرده، بخشی از آن منعکس شده و قسمتی نیز توسط محصول جذب شده و تبدیل به انرژی گرمایی شده و دمای محصول را بالا می‌برد (۱۵).

در تمامی فرآیندهای صنعتی، مقدار مصرف و بازده انرژی دارای اهمیت بالایی است، اما از آنجایی که فرآیند خشک کردن بین ۱۲ تا ۲۰ درصد از کل مصرف انرژی صنعت فرآوری را به خود اختصاص می‌دهد، یافتن نقاط بهینه فرآیند با در نظر گرفتن انرژی مصرفی حائز اهمیت است (۲۰). برای به دست آوردن شرایط بهینه یک فرآیند از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. روشی که به طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می‌شود روش

قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک کن خلائی - مادون قرمز ۲- تعیین شرایط بهینه برای خشک کردن ورقه به کمک روش سطح پاسخ و ۳- بررسی جریان پذیری پودر قارچ دکمه‌ای در شرایط بهینه.

مواد و روش‌ها

تهیه مواد

قارچ خوراکی تازه، از بازار همدان تهیه و پس از قرار دادن در داخل کیسه‌های پلاستیکی در یخچال با دمای سه تا پنج درجه سلسیوس نگهداری شد. پیش از شروع آزمایش‌های خشک کردن، قارچ‌ها با آب سرد شستشوی سطحی داده و ساقه آن‌ها کوتاه شد و سپس آب سطحی آن‌ها توسط دستمال تمیز گرفته و سپس با یک کاتر تیز به ضخامت پنج میلی‌متر به صورت عمودی بریده شدند.

تعیین رطوبت اولیه

به منظور تعیین رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک، حدود ۱۵ گرم از نمونه‌ها را در دستگاه آون ممرت (مدل UNE 500 ساخت آلمان)، قرار داده شدند. نمونه‌ها به طور تصادفی انتخاب و پس از آماده سازی در داخل پتری دیش در دستگاه آون قرار گرفتند. نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۴-۵ ساعت تا دستیابی به وزن ثابت در داخل آون قرار داده شدند. برای اطمینان از صحت میزان رطوبت نمونه‌ها، این آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند و سپس از رابطه (۱) استفاده شد (۱۳).

$$MC_{d.b.} = \frac{M_i - M_f}{M_f} \quad (1)$$

در این رابطه $MC_{d.b.}$ رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک، M_i وزن اولیه و M_f وزن نهایی نمونه بر حسب گرم می‌باشند.

خشک کن خلائی - مادون قرمز

آزمایش‌های خشک کردن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای با استفاده از یک دستگاه خشک کن خلائی - مادون قرمز،

سطح پاسخ است که به بررسی اثرهای متغیرهای مستقل بر روی شاخص‌های کیفی و انرژی بهینه‌سازی فرآیندها می‌پردازد (۳۵).

جریان پذیری و چسبندگی دو ویژگی مهم ذرات خشک شده هستند؛ اولی به عنوان شاخص کار^۱ (CI) و بعدی به عنوان نسبت هاسنر^۲ (HR) بیان می‌شود. شاخص کار نیز برای نشان دادن قابلیت فشرده‌گی پودر استفاده می‌شود، در حالیکه مقادیر بالاتر شاخص کار نشان دهنده جریان پذیری ضعیف و قابلیت فشرده‌گی بالا هستند. نسبت هاسنر به عنوان نسبت چگالی حقیقی به چگالی توده تعریف می‌شود. نسبت هاسنر برای طبقه‌بندی چسبندگی پودر استفاده می‌شود که اندازه‌گیری خوبی از سازگاری و جریان پذیری پودر است. پایین‌ترین چسبندگی (HR کم)، بیشترین جریان پذیری یک پودر است. شاخص کار و نسبت هاسنر قابلیت جریان پذیری پودر را می‌سنجند و هر دو براساس چگالی توده و حقیقی پودر اندازه‌گیری شده و محاسبه می‌شوند (۷).

پژوهش‌های متعددی در مورد خشک کردن قارچ خوراکی انجام شده است (۴، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۵، ۲۸، ۳۰) ولی تحقیقی در مورد ارتباط خشک کردن قارچ با کیفیت پودر تولید شده از آن یافت نشد.

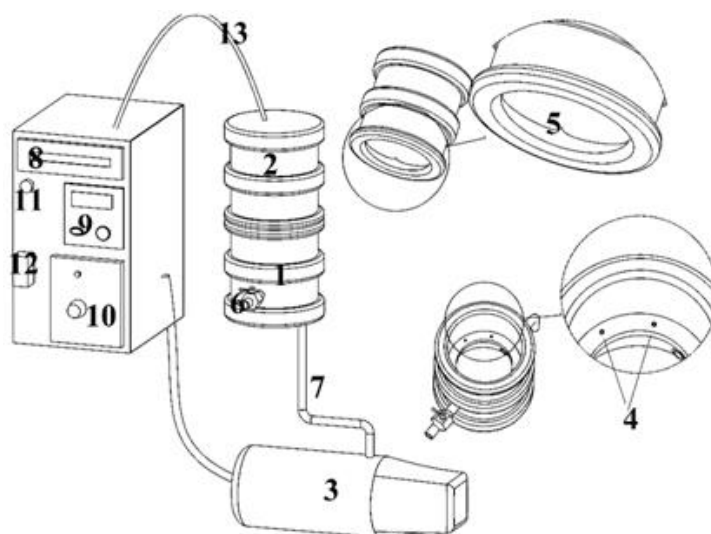
با توجه به این که قارچ دکمه‌ای به دلیل دارا بودن ارزش غذایی بالا و مصارف دارویی، کاربردهای فراوانی دارد، باید بهترین حالت خشک کردن انتخاب شود تا کمترین تأثیر منفی بر روی خواص کیفی و مواد مؤثره پودر آن داشته باشد. با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت فرآوری قارچ دکمه‌ای خوراکی، به طور کلی اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱- بررسی اثر متغیرهای مستقل (دمای هوای محفظه خشک کن و فشار خلاء) بر متغیرهای پاسخ (ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی حرارتی، فنل و شاخص‌های رنگی ΔL^* ، Δa^* و Δb^*) طی فرآیند خشک کردن ورقه‌های

1- Carr index

2- Hausner ratio

محتوای رطوبتی بر حسب زمان برای فرآیند خشک‌کردن رسم شد، سپس مقدار نسبت رطوبت محاسبه و نمودار لگاریتم طبیعی آن ($L_n(MR)$) بر حسب زمان رسم و رابطه یک خط راست به آن برازش شد. شیب خط برازش شده به نمودار لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت بر حسب زمان (m) تعیین شد. چنانچه اولین جمله از سری جواب رابطه قانون دوم فیک در نظر گرفته شود، رابطه (۲) به دست می‌آید. اگر از طرفین رابطه لگاریتم طبیعی گرفته شود، رابطه (۳) که رابطه یک خط است به دست می‌آید. با مساوی قرار دادن شیب این خط با شیب خط برازش شده به نمودار لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت بر حسب زمان (m)، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت به دست آمد (رابطه (۴)) (۳۱).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) \quad (2)$$



شکل (۱) شماتیک خشک‌کن خلاء- مادون قرمز (۱-۲) محفظه خلاء، ۳- پمپ خلاء، ۴- حسگرهای دما و خلاء، ۵- لامپ مادون قرمز، ۶- ترموستات، ۷- سوپاپ هوای ورودی، ۸- لوله‌های خلاء، ۹- سیستم کنترل فشار، ۱۰- ترموستات، ۱۱- دایمر، ۱۲- چراغ سیگنال، ۱۳- فیوز، ۱۴- کابل برق

Figure (1) Schematic view of the infrared vacuum dryer: 1- lower chamber, 2- upper chamber, 3- vacuum pump, 4- pressure and temperature sensor, 5- NIR lamp, 6- inlet air valve, 7- vacuum tubes, 8- pressure controller, 9- thermostat, 10- dimmer, 11- signal lamp, 12- fuse, 13- power cable

$$D_{eff} = \frac{4mL^2}{\pi^2} \quad (4)$$

$$Ln(MR) = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t + \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \quad (3)$$

نشان داده شده در شکل ۱ انجام شدند. آزمایش‌های خشک‌کردن در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۵ و ۷۰ °C و سه سطح فشار خلأ ۲۰، ۴۰ و ۶۰ kPa انجام شدند. طی فرآیند خشک‌کردن، دمای داخل محفظه توسط یک ترموستات (آتین، ساخت ایران) با درجه تفکیک ۱ °C که به یک ترموکوپل نوع K متصل بود کنترل می‌شد. در هر آزمایش حدود ۲۰۰ g ورقه‌ی قارچ دکمه‌ای خشک می‌شد. طی مرحله خشک شدن در فواصل زمانی مشخصی، نمونه‌ها از خشک‌کن خارج و محتوای رطوبتی آنها تعیین می‌شدند. آزمایش‌ها تا رسیدن به محتوای رطوبتی ۱۰ d.b.٪ ادامه یافت.

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

به منظور اندازه‌گیری ضریب انتشار مؤثر رطوبت، از نمودارهای سینتیک خشک‌کردن و حل کرانک بر رابطه قانون دوم فیک استفاده شد. برای این منظور، ابتدا نمودار

استاندارد اسیدگالیک، بر اساس میلی گرم اسید گالیک در یک گرم بافت نمونه پودر قارچ بیان گردید (۳۳).

اندازه گیری رنگ و محاسبه تغییرات آن

یکی از مهم ترین شاخص های کیفی ظاهری محصولات کشاورزی رنگ است. رنگ و تغییرات آن با بسیاری از خواص فیزیکی و شیمیایی محصولات ارتباط مستقیم دارند (۱۶). به منظور اندازه گیری شاخص های رنگی از روش پردازش تصویر استفاده شد. بدین منظور از اسکنر اچ پی مدل Scan Jet G4010 استفاده شد. ابتدا دستگاه اسکنر توسط کارت های سیاه و سفید استاندارد به نحوی که بر حسب مقیاس رنگی RGB برای رنگ سیاه عددهای (۰،۰،۰) و برای رنگ سفید (۲۵۵، ۲۵۵، ۲۵۵) را نشان دهد کالیبره شد، سپس قارچ دکمه ای تازه قبل از خشک کردن و پودر حاصل از آن بعد از خشک کردن با درجه تفکیک ۱۲۰۰ dpi اسکن شدند. عکس های به دست آمده توسط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۷a پردازش گردید و مقادیر رنگی L^* ، a^* و b^* به دست آمده محاسبه شدند. در پایان با استفاده از روابط (۶) تا (۸) تغییرات رنگ قارچ تازه و پودر حاصل از آن پس از خشک شدن محاسبه گردید (۱).

$$\Delta L^* = (L_0^* - L_1^*) \quad (6)$$

$$\Delta a^* = (a_0^* - a_1^*) \quad (7)$$

$$\Delta b^* = (b_0^* - b_1^*) \quad (8)$$

که مقدار L^* مقدار تیرگی (۰) تا روشنایی (۱۰۰)، مقدار a^* مقدار قرمزی (+۱۲۰) تا سبزی (-۱۲۰) و b^* مقدار زردی (+۱۲۰) تا آبی (-۱۲۰) هستند.

بهینه سازی

در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل داده ها و بهینه سازی فرآیند خشک کردن قارچ دکمه ای خوراکی با خشک کن خلأی - مادون قرمز از روش سطح پاسخ استفاده شد. آزمایش ها در قالب طرح مرکب مرکزی در نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰ تعریف شدند. متغیرهای مستقل (ورودی) به نرم افزار دیزاین اکسپرت در خشک کن خلأی - مادون قرمز شامل دمای هوای

انرژی ویژه مصرفی خشک کردن

انرژی مصرفی نمونه های خشک شده با خشک کن خلأی - مادون قرمز از رابطه (۵) دست آمد (۲۷).

$$SEC = \frac{k \times t \times 3.6 \times 10^6}{m_v} \quad (5)$$

که در این رابطه، SEC انرژی ویژه مصرفی خشک کردن به شیوه خلأی - مادون قرمز (J/kg)، k توان اسمی مادون قرمز (kW)، t مجموع زمان هایی که لامپ مادون قرمز روشن شد (s) و m_v جرم آب حذف شده از محصول طی فرآیند خشک کردن به شیوه خلأی - مادون قرمز (kg) هستند. لامپ مادون قرمز در طول زمان آزمایش ها برای ثابت نگه داشتن دمای خشک کردن، چندین بار روشن و خاموش شد.

فرآیند پودر کردن

ورقه های خشک قارچ دکمه ای با استفاده از یک دستگاه آسیاب خانگی (پاناسونیک، مدل MJ-M176P، ساخت مالزی) به مدت یک دقیقه آسیاب و پودر شدند. به منظور همگن کردن اندازه ذرات، پودر قارچ دکمه ای حاصل توسط یک الک آزمایشگاهی با مش شماره ۵۰ (اندازه حفره ها ۰/۵ mm) الک و ذرات باقی مانده روی آن مجدداً آسیاب شدند.

اندازه گیری محتوای فنل فنول کل

برای اندازه گیری محتوای فنل کل از روش فولین سیکالتو استفاده شد. به طور خلاصه، ابتدا ۰/۵ گرم از بافت میوه با سه میلی لیتر متانول ۸۵ درصد عصاره گیری شد. سپس ۳۰۰ μ m از عصاره به ۱۵۰۰ μ m معرف فولین سیکالتو ۱۰٪ افزوده شد و به مدت پنج دقیقه در دمای آزمایشگاه قرار گرفت. سپس ۱۲۰۰ μ m سدیم کربنات ۷ درصد همراه با ۶۰۰ μ m آب مقطر به آن اضافه شد و به مدت ۹۰ دقیقه روی شیکر ۱۱۰ rpm در دمای اتاق به صورت تاریکی تکان داده شد. در نهایت میزان جذب نمونه پودر قارچ دکمه ای با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر (مدل کری ۱۰۰، ساخت آمریکا) در طول موج ۷۶۵ nm اندازه گیری شد و پس از مقایسه با

متغیرها، β_{ij} ضرایب اثرهای متقابل متغیرها است. در برآورد کردن ضرایب متغیرها (β) برای یک مدل درجه دوم نمی‌توان به راحتی طرح چندعاملی دوسطحی با نقاط مرکزی و حقیقی استفاده کرد، زیرا تعداد β ها بیشتر از تعداد تیمارها می‌شود. از این رو با اضافه کردن نقاط محوری، محاسبه β ها و همچنین استفاده بهتر از مدل درجه دوم امکان پذیر است. متغیرهای مستقل و سطوح کدبندی شده آنها و تعداد آزمایش‌ها برای خشک‌کن خلائی- ماون قرمز به ترتیب درجدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است.

محفظه خشک‌کن و فشار خلاء بود. متغیرهای وابسته که مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی حرارتی، محتوای فنل کل و شاخص‌های رنگی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* . برای مدل‌سازی رفتار سیستم‌های عاملی دو خطی و بررسی اثرهای متقابل از مدل (۶) استفاده شد (۸).

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 \quad (6)$$

که در این رابطه، y متغیر پاسخ، x_j مقدار مستقل، x_i مقدار واقعی هر پارامتر، k تعداد متغیرها، β_j ضرایب

جدول (۱) سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل مورد مطالعه و سطوح آنها

Table (1) The coded levels of the independent variables studied and their levels

سطوح کدبندی شده متغیر			نماد	متغیر
Variable coded levels			Symbol	variable
1	0	-1		
70	55	40	T	دمای هوای داخل محفظه (°C) Air temperature inside the chamber (°C)
60	40	20	P	فشار خلاء (kPa) Vacuum pressure (kPa)

جدول (۲) آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر متغیرهای پاسخ بر فرآیندهای خشک کردن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای خوراکی به روش سطح پاسخ

Table (2) Experiments to investigate the effect of response variables on the drying processes of edible button mushroom sheets by response surface methodology

تکرار Repeat	مقادیر حقیقی (کد) هر متغیر مستقل (ورودی)		شماره آزمایش Test number
	The actual values (code) of each independent variable (input)		
	فشار خلاء (kPa)	دمای هوای داخل محفظه (°C)	
	Vacuum pressure (kPa)	Air temperature inside the chamber (°C)	
5	40 (0)	55 (0)	1
1	60 (1)	70 (1)	2
1	60 (1)	55 (0)	3
1	20 (-1)	55 (0)	4
1	20 (-1)	40 (-1)	5
1	40 (0)	70 (1)	6
1	40 (0)	40 (-1)	7
1	60 (1)	40 (-1)	8
1	20 (-1)	70 (1)	9

وزنی (۵)، برای محتوای فنل کل ضریب وزنی متوسط (۳) و برای ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی

دراین پژوهش به دلیل اهمیت کیفیت در تولید پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی و همچنین دارابودن ارزش تجاری بالا، برای پارامتر ارزیابی رنگ بیشترین ضریب

اندازه‌گیری می‌شوند. شاخص کار و نسبت هاسنر از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه گردید (۷).

$$CI = \frac{(\rho_t - \rho_b)}{\rho_b} \times 100 \quad (11)$$

$$HR = \frac{\rho_t}{\rho_b} = \frac{v_0}{v_n} \quad (12)$$

که در این روابط، CI شاخص کار (ρ_t) و HR نسبت هاسنر (بی‌بعد) وهم چنین v_0 و v_n به ترتیب حجم‌های توده و حقیقی هستند.

زاویه ایستایی^۳

برای محاسبه‌ی زاویه ایستایی پودر، مقدار ۱۰ g پودر قارچ دکمه‌ای وزن شد و از درون یک کیف از ارتفاع ثابت و با قطر مجرای خروجی ۱۲ mm عبور داده شد تا بر یک سطح افقی صاف ریخته شود و تشکیل یک توده دهد. زاویه ایستایی از طریق زاویه تشکیل شده به وسیله شیب توده محصول نسبت به سطح مبنا، از رابطه (۱۳) محاسبه گردید (۳۸).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H}{R} \quad (13)$$

در این رابطه، R قطر کپه (m)، H ارتفاع کپه (m) و θ زاویه ایستایی (درجه) هستند. شکل ۲ الف) نحوه اندازه‌گیری زاویه استاتیک ریوز را نشان می‌دهد.

زاویه اصطکاک سطحی^۴

برای محاسبه زاویه اصطکاک سطحی (برش) پودر قارچ دکمه‌ای، حدود ۵ g از آن را وزن کرده و به طور جداگانه روی یک صفحه شیشه‌ای مستطیلی به طول ۱۳۰ mm ریخته شد. سپس صفحه شیشه‌ای را به تدریج بلند کرده تا سطح پودر قارچ شروع به حرکت کند و برش-هایی در سطح آن ایجاد گردد. در پایان زاویه اسلاید از رابطه (۱۴) محاسبه شد (۳۸).

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{H}{L} \quad (14)$$

در این رابطه، H فاصله عمودی (mm) از بالای صفحه شیشه‌ای نسبت به سطح مبنا، L طول شیشه (mm)

ویژه مصرفی حرارتی کمترین ضریب وزنی (۱) لحاظ گردید.

تعیین خصوصیات فیزیکی پودر قارچ دکمه‌ای چگالی توده^۱

چگالی توده یک معیار برای بررسی خصوصیات فشرده شدن مواد جامد ذره‌ای است. برای تعیین چگالی توده پودر، دو گرم از پودر آزادانه در داخل یک استوانه‌ی شیشه‌ای درجه‌بندی شده تا ۱۰ میلی‌لیتر (درجه تفکیک ۰/۵ میلی‌لیتر) ریخته و سپس حجم اشغال‌شده ثبت گردید و چگالی توده از رابطه (۹) بدست آمد (۷).

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (9)$$

که در این رابطه، ρ_b چگالی توده (g ml^{-1})، m جرم پودر (g) و V_b حجم قبل از تکان (ضربه) (ml) است.

چگالی حقیقی^۲

به منظور تعیین چگالی حقیقی پودر، دو گرم از آن در استوانه ۱۰ میلی‌لیتری درجه‌بندی‌شده (قابل خواندن تا ۰/۵ میلی‌لیتر) ریخته شد و پس از تکان‌دادن و فشردن پودر داخل استوانه‌ی شیشه‌ای به صورت دستی، با ضربه‌زدن به استوانه مدرج در فاصله‌ی عمودی 15 ± 2 mm تا زمانی که تفاوت قابل چشم‌پوشی بین اندازه‌گیری‌های پیاپی مشاهده شود، حجم اشغال‌شده ثبت گردید و چگالی توده حقیقی از رابطه (۱۰) بدست آمد. اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام و میانگین آن‌ها ثبت شد (۷).

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \quad (10)$$

که در این رابطه، ρ_t چگالی حقیقی (g ml^{-1})، m جرم پودر (g) و V_t حجم بعد از تکان (ضربه) (ml) است.

شاخص کار و نسبت هاسنر

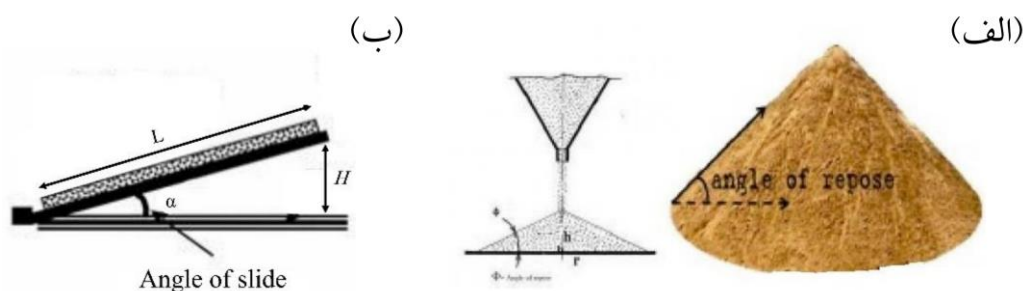
شاخص کار و نسبت هاسنر جریان‌پذیری پودر را می‌سنجند و هر دو پراساس چگالی توده و حقیقی پودر

3- Angle of repose
4- Angle of slide

1- Bulk density
2- True density

خشک‌کن خلأی - مادون قرمز به مقدار لازم پودر تولید شد و مقادیر چگالی توده‌ای توده و حقیقی، شاخص کار، نسبت هاسنر، زاویه‌های ایستایی و اسلاید با استفاده از معادلات مربوطه در سه تکرار اندازه‌گیری شده و مقدار هر پارامتر به صورت میانگین گزارش شد.

۱۳۰) و α زاویه اسلاید است. شکل ۲ (ب) نحوه اندازه‌گیری زاویه اسلاید را نشان می‌دهد. در جدول ۳ ارتباط بین جریان‌پذیری با نسبت هاسنر، شاخص کار، زاویه ایستایی و اسلاید آورده شده است (۲۹؛ ۲۱؛ ۷). بعد از مشخص شدن نقطه بهینه دستگاه خشک‌کن خلأی - مادون قرمز، برای نقطه بهینه دستگاه



شکل (۲) الف - شماتیک اندازه‌گیری زاویه ریوز، ب - شماتیک اندازه‌گیری زاویه اصطکاک سطحی
Figure (2) a- Schematic of the angle of repose b- schematic of slide angle measurement

جدول (۳) ارزیابی جریان‌پذیری پودر

Table (3) Evaluation of powder flowability

شاخص کار (%)	نسبت هاسنر	زاویه ایستایی (درجه)	جریان‌پذیری	قابلیت چسبندگی
Carr index (%)	Hausner ratio	Angle of repose (Degree)	Flowability	Adhesion capability
0-10	1.00-1.11	25-30	عالی Excellent	جریان آزادانه Flowing freely
11-15	1.12-1.18	31-35	خوب Good	جریان آزادانه Flowing freely
16-20	1.19-1.25	36-40	نسبتاً خوب Fair	نسبتاً چسبنده Relatively sticky
21-25	1.26-1.34	41-45	قابل قبول Passable	نسبتاً چسبنده Relatively sticky
26-31	1.35-1.45	46-55	ضعیف Poor	چسبنده Sticky
32-37	1.46-1.59	56-65	خیلی ضعیف Very poor	بسیار چسبنده Very sticky
>38	>1.60	>65	خیلی، خیلی ضعیف Very much poor	بسیار چسبنده Very sticky

نتایج و بحث

سیتبیک خشک کردن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک کن خلائی - مادون قرمز

شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب به بررسی تغییرات نسبت رطوبت لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی و تغییر $\ln(MR)$ را در مقابل زمان خشک شدن برای خشک کن خلائی - مادون قرمز نشان می‌دهد.

زمان خشک شدن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک کن خلائی - مادون قرمز از ۷۰ دقیقه (فشار ۲۰ kPa و دمای ۷۰°C) تا ۳۵۰ دقیقه (فشار ۶۰ kPa و دمای ۴۰°C) بود که هم‌زمان با کاهش فشار هوا، نقطه اشباع آب کاهش و با افزایش دمای محفظه، نرخ تبخیر رطوبت بافت افزایش یافت که این مورد منجر به کاهش زمان خشک شدن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک کن خلائی - مادون قرمز شد (شکل ۴). با افزایش دمای محفظه خلأ، اختلاف دمای محصول با هوای اطراف بیشتر شد که در نهایت شیب برازش شده روی نمودار $\ln(MR)$ خشک شدن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی در مقابل زمان افزایش یافت. این منحنی‌های غیرخطی نشان‌دهنده تغییر نفوذ رطوبت با مقدار رطوبت می‌باشند. نسبت رطوبت به دمای محفظه بستگی داشته و با افزایش دما، با شیب تندتری کاهش پیدا کرد (شکل ۵). پو و سان (۲۴) در خشک کردن برش‌های انبه و آرتناسا و همکاران^۱ (۶) در خشک کردن برش‌های قارچ به این نتیجه رسیدند که با کاهش خلأ، نرخ خشک شدن افزایش می‌یابد و همچنین پونخام و همکاران^۲ (۲۳) دریافتند که با افزایش توان مادون قرمز زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. آلی بس (۳) نیز به نتیجه‌ای مشابه روی خشک کردن گزنه با خشک کن خلأ رسید.

تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر پارامترهای کیفی، شیمیایی و حرارتی قارچ دکمه‌ای خوراکی طی خشک کردن با خشک کن خلائی - مادون قرمز

ضرایب معادله رگرسیونی حاصل از روش سطح پاسخ و اطلاعات آماری به دست آمده برای متغیرهای پاسخ در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر آماری ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود که مقدار ضریب تبیین (R^2) برای تمامی مدل‌های ارائه شده بالاتر از ۰/۹۱ بود، به جز شاخص‌های رنگ نهایی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* ضریب تغییرات برای تمامی مدل‌ها نیز کمتر از ۱۴/۵ بودند به جز محتوای فنل کل که مقدار ضریب تغییرات برای آن برابر با ۲۶/۱۸ به دست آمد، بنابراین مقادیر پایین ضریب تغییرات برای اغلب مدل‌های پیشنهادی در جدول ۳ نشان‌دهنده تکرارپذیری خوب این مدل‌ها می‌باشد (۱۰). همچنین با توجه به معنی دار نشدن فاکتور عدم برازش برای همه متغیرهای مورد بررسی به جز شاخص‌های رنگ نهایی L^* ، Δa^* و Δb^* می‌توان گفت که مدل‌های ارائه شده به روش سطح پاسخ به خوبی توانسته‌اند مقدار تغییرات متغیرهای وابسته را پیش‌بینی کنند. با این وجود، معنی دار شدن عدم برازش برای شاخص‌های رنگ نهایی نشان می‌دهد که مدل ریاضی ارائه شده به منظور پیش‌بینی دقیق این متغیر پاسخ مناسب نیست.

ضریب پخش مؤثر رطوبت

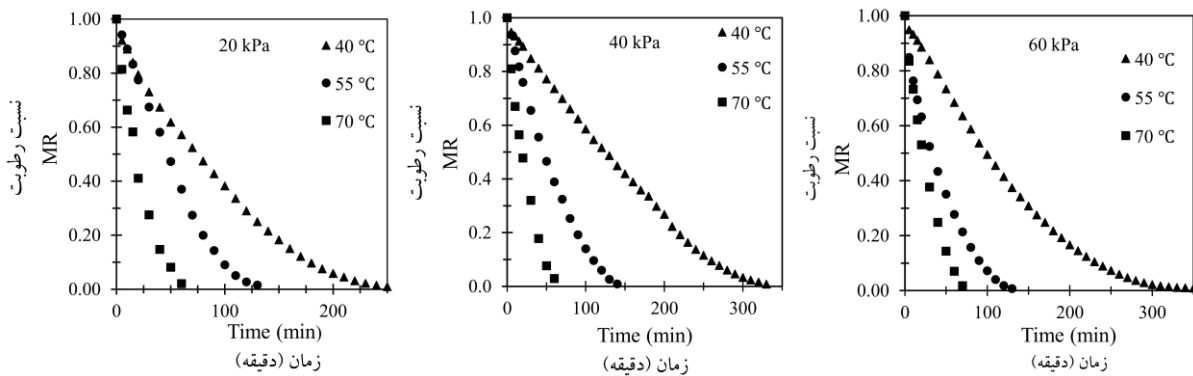
مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت خشک کردن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی در محدوده $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۴۰°C) تا $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (فشار ۲۰ kPa و دمای ۷۰°C) متغیر بود. با توجه به داده‌های آزمایش این نتیجه بدست آمد که در فشار ثابت با افزایش دما ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد. صفری و همکاران^۳ (۲۷) طی مدل‌سازی برخی خواص حرارتی و فیزیکی مغز بادام در خشک کن خلائی مادون قرمز با پیش- تیمار مایکروویو گزارش کردند که بیشترین مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (فشار ۲۰ kPa و

1- Artnaseaw et al.
2- Ponkham et al.

3- Safari et al.

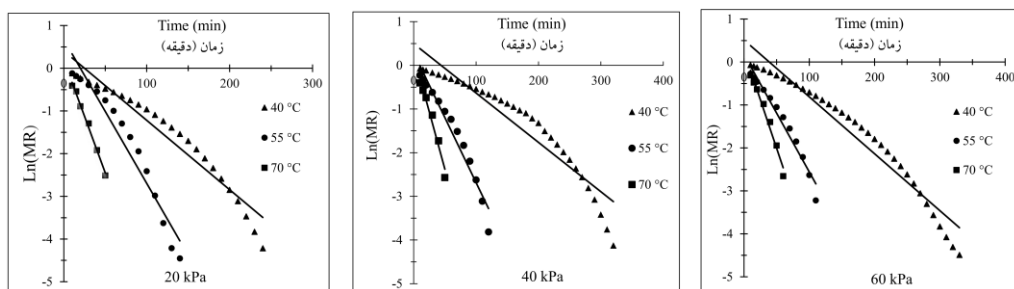
همان‌طور که از نتایج این شکل مشاهده می‌گردد، دمای هوای محفظه خشک‌کن بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت اثر مثبت داشت، به طوری که با افزایش دما، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت. این امر به این دلیل است که افزایش مصرف انرژی و حرارت باعث افزایش فعالیت مولکولهای آب و در نتیجه نفوذ بیشتر رطوبت به خارج محصول در دماهای بالاتر شد (۲۷).

دمای 75°C و توان مایکروویو 630 W و کمترین مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت $8/03 \times 10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ (فشار 8 kPa و 60°C دمای 45°C و توان مایکروویو 270 W) به دست آمد. نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن و همچنین عبارت درجه دوم دما و فشار خلاء بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت معنی‌دار بودند. شکل ۵، اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر ضریب پخش مؤثر رطوبت ورقه‌های قارچ دکمه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۳) سینتیک خشک کردن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک‌کن خلأی - مادون قرمز در فشار و دماهای مختلف

Figure (3) Kinetics of drying of edible button mushroom thin layers with vacuum-infrared dryer at different pressures and temperatures



شکل (۴) $\text{Ln}(\text{MR})$ خشک کردن لایه‌های نازک قارچ دکمه‌ای خوراکی با خشک‌کن خلأی - مادون قرمز در فشار و دماهای مختلف

Figure (4) $\text{Ln}(\text{MR})$ drying of edible button mushroom thin layers by vacuum-infrared dryer at different pressures and temperatures

جدول (۴) ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای متغیرهای پاسخ (X_1 دمای هوای محفظه خشک کن، X_2 فشار خلاء)

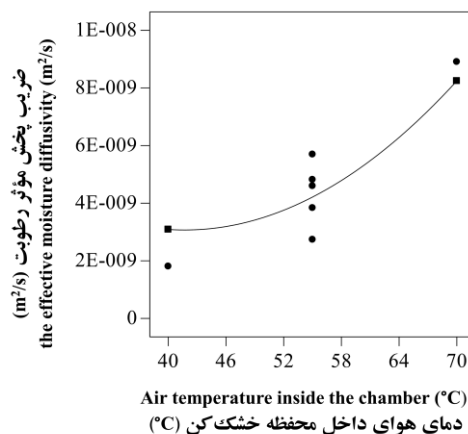
Table (4) Model coefficients fitted to the quadratic regression equation for response variables (X_1 dryer chamber air temperature, X_2 vacuum pressure)

ضرایب مدل						منابع تغییرات
b^*	a^*	L^*	محتوای فنل کل TFC (mg/g)	انرژی ویژه مصرفی SEC (MJ/kg)	ضریب انتشار مؤثر رطوبت D_{eff} (m^2/s)	(Source of variance)
						عرض از مبدأ (Width of origin)
+9.6	+2.98	23.20	+1.65	+364.56	$+2.32 \times 10^{-8}$	(b_0)
						عبارت خطی (Linear expression)
+1.09 ^{ns}	+0.67 ^c	5.00 ^b	-0.83 ^b	-347.37 ^a	-5.91×10^{-10a}	(b_{11}) X_1
+0.47 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	+0.33 ^{ns}	-0.4 ^c	+11.87 ^{ns}	-3.61×10^{-10ns}	(b_{22}) X_2
						اثر متقابل (reaction)
+1.53 ^c	+0.39 ^{ns}	-0.42 ^{ns}	+0.58 ^c	-57.35 ^{ns}	$+1.33 \times 10^{-12ns}$	(b_{12}) $X_1 X_2$
						عبارت درجه دوم (Quadratic phrase)
+0.79 ^{ns}	+0.25 ^{ns}	-2.95 ^c	+0.33 ^{ns}	+103.56 ^{ns}	$+6.45 \times 10^{-12c}$	(b_{11}) X_1^2
+2.34 ^c	+1.43 ^c	+0.53 ^{ns}	+0.02 ^{ns}	+58.97 ^{ns}	$+3.14 \times 10^{-12c}$	(b_{22}) X_2^2
0.03 ^c	3.14 ^c	0.04 ^c	0.179 ^{ns}	0.73 ^{ns}	0.83 ^{ns}	Lack of Fit (P-value)
0.066 ^c	0.08 ^c	0.02 ^c	0.0179 ^c	0.0013 ^b	0.0009 ^a	Model (P-value)
0.81	0.89	0.85	0.98	0.91	0.92	R^2
14.02	12.6	11.48	26.18	14.47	7.39	C.V. (%)

a بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱، b اختلاف معنی دار در ۰/۱، c اختلاف معنی دار در ۰/۵ و ns عدم اختلاف معنی دار در سطح ۰/۵ می باشد. D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت، SEC انرژی ویژه مصرفی، TFC محتوای فنل کل و ΔL^* ، Δa^* و Δb^* شاخص های رنگی).

انرژی ویژه مصرفی

بیشترین مقدار انرژی ویژه مصرفی حرارتی (۱۲۶۹/۷۳ MJ/kg) (فشار ۶۰ kPa و دمای ۴۰ °C) و کمترین مقدار آن (۴۰۸/۳۶ MJ/kg) (فشار ۴۰ kPa و دمای ۷۰ °C) به دست آمد. با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده شد که فقط اثر خطی دمای هوای محفظه خشک کن بر انرژی ویژه مصرفی خشک کردن معنی دار بود (شکل ۶). همان طور که انتظار می رفت با افزایش دمای هوا، مقدار انرژی ویژه مصرفی خشک کردن کاهش یافت. به طوری که در شرایط کمترین مقدار مصرف انرژی حدود ۳۱۱٪ نسبت به بیشترین مقدار مصرف انرژی، کاهش را نشان می دهد. نتایج حاصل از داده های بدست آمده از آزمایش ها نشان می دهد که در فشار ثابت با افزایش دما، به دلیل این که زمان



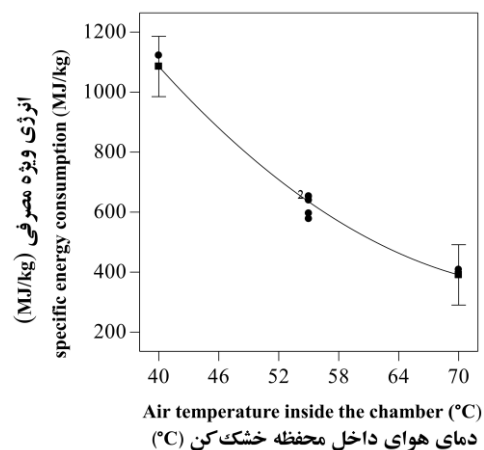
شکل (۵) اثر خطی دمای هوای محفظه خشک کن بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت ورقه های قارچ دکمه ای خوراکی

Figure (5) Linear effect of drying chamber air temperature on effective moisture diffusion coefficient of edible butter mushroom sheets

محتوای فنول کل

مقدارمحتوای فنول پودر قارچ دکمه‌ای در محدوده‌ی ۴/۲۷۰ mg/g (فشار ۲۰ kPa و دمای ۴۰°C) و ۱/۳۰۰ mg/g (فشار ۴۰ kPa و دمای ۷۰°C) بود. نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن و فشار خلأ و همچنین اثر متقابل دمای هوای محفظه خشک‌کن و فشار خلأ بر محتوای فنول پودر قارچ دکمه‌ای کل معنی‌دار بودند. ضرایب منفی دما و فشار خلأ در مدل برازش شده به داده‌های آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ دلالت بر اثر منفی این دو متغیر (به ویژه دما) بر محتوای فنل کل دارد. شکل ۷ اثر متقابل دمای هوای محفظه خشک‌کن و فشار خلأ بر محتوای فنل کل پودر قارچ دکمه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این شکل قابل مشاهده است با افزایش دمای هوا، محتوای فنل کل کاهش یافت. به طوری که با افزایش دما از ۴۰ به ۷۰°C، مقدار متوسط فنل کل حدود ۳۲۸٪ کاهش یافت. دلیل این کاهش این است که پردازش حرارتی ممکن است اسید فنولیک بیشتری را از تجزیه اجزای سلولی آزاد کند. اگرچه اختلال در دیواره سلولی باعث آزاد شدن آنزیم‌های اکسیدکننده و هیدرولیتی نیز می‌شود که می‌توانند آنتی‌اکسیدان‌ها را در میوه‌ها و سبزیجات نابود کنند اما فرآوری حرارتی در دماهای پایین، این آنزیم‌ها را غیرفعال می‌کند تا از تخریب و از دست دادن اسید فنولیک جلوگیری شود ولی با افزایش دما، آنزیم‌ها فعال شده و منجر به از دست دادن اسید فنولیک می‌شود. علاوه بر این، دما، اکسیژن و آنزیم‌ها نیز عوامل اصلی موثر در ثبات اسیدهای فنولی هستند (۳۶). میرسیا و همکاران^۳ (۱۹) به نتایج مشابه برای قارچ دکمه‌ای خوراکی دست یافتند.

خشک‌شدن به شدت کاهش یافت، مقدار انرژی ویژه مصرفی حرارتی نیز کاهش یافت. به عنوان مثال در فشار ثابت ۶۰ kPa، با افزایش دما از ۴۰ به ۷۰°C مقدار انرژی مصرفی ۲۷٪ کاهش یافت. مقدار ضریب منفی برای دما نشان‌دهنده‌ی این است که پارامتر دما بیشترین تأثیر غیرمستقیم را بر مقدار انرژی مصرفی ویژه حرارتی داشت که با افزایش دما، انرژی مصرفی ویژه حرارتی کاهش یافت. مینایی و همکاران (۱۸) در خشک‌کردن میوه و سبزیجات به روش ترکیبی خلأ- مادون قرمز به این نتیجه رسیدند که خشک‌کن خلأی- مادون قرمز مزایای هر دو روش خشک‌کردن مادون قرمز و خلأ را دارد و می‌تواند نسبت انرژی مصرفی را کاهش و کیفیت خشک‌شدن محصول را افزایش دهد. کاترونک و همکاران^۱ (۱۲) در خشک‌کردن قارچ و لی‌یو و همکاران^۲ (۱۷) در خشک‌کردن ورقه‌های سیب زمینی به نتایج مشابهی دست یافتند.



شکل (۶) اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن بر انرژی ویژه مصرفی ورقه‌های قارچ دکمه‌ای خوراکی
 Figure (6) The linear effect of drying room air temperature on specific energy consumption of edible button mushrooms

3- Mircea *et al.*

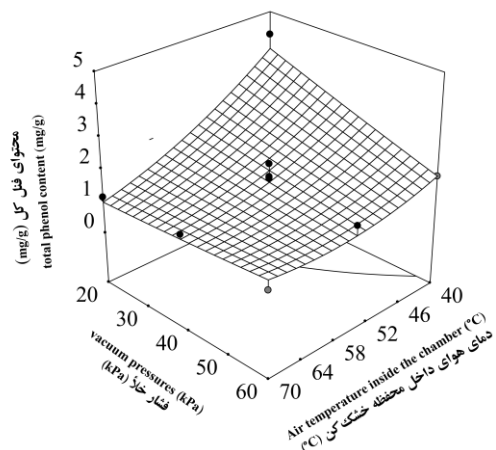
1- Kantrong *et al.*
 2- Liu *et al.*

محفظه خشک کن و فشار خلأ و عبارت درجه دوم فشار خلأ بر شاخص های رنگی Δb^* پودر قارچ دکمه ای معنی دار بودند.

شکل ۸ الف تا ج به ترتیب اثر خطی دمای هوای ورودی به خشک کن بر شاخص های رنگی پودر قارچ دکمه ای برای شاخص های رنگ ΔL^* و Δa^* و همچنین اثر متقابل دمای هوای محفظه خشک کن و فشار خلأ بر شاخص رنگی Δb^* (پس از انجام فرآیند خشک کردن) را به ترتیب برای تفاوت شاخص های رنگ L^* ، a^* و b^* نسبت به شاخص های رنگ قارچ تازه نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، افزایش دما سبب افزایش اختلاف بیشتر بین شاخص های رنگ L^* و a^* پودر قارچ دکمه ای نسبت به قارچ تازه شد. به نحوی که افزایش دما سبب تیرگی بیشتر (کاهش شاخص L^*) و کاهش مقدار قرمزی (کاهش شاخص a^*) پودر قارچ شد. یعنی نمونه ها نسبت به حالت اول تیره تر (قهوه ای تر) شدند که به دلیل تشکیل رنگ دانه های قهوه ای از طریق واکنش مایلارد بود. تغییر رنگ سبز به صورت گسترده ای به مقدار کاهش کلروفیل گیاه بستگی دارد به طوری که با باقی ماندن بیشتر کلروفیل در بافت گیاه، رنگ سبز، کمتر به سمت قرمزی میل خواهد کرد (۳۴). با توجه به نتایج شکل ۸ ج مشاهده می شود که افزایش دما سبب افزایش اختلاف شاخص رنگ b^* بین پودر قارچ دکمه ای با قارچ تازه شد. یعنی زردی نمونه ها نسبت به حالت اول آن ها کم شده و به سمت آبی (تیرگی) پیش رفته است. این تغییر رنگ در نمونه های خشک شده می تواند به علت واکنش های قهوه ای شدن مایلارد در طول فرآیند خشک شدن و تشکیل رنگ دانه های قهوه ای باشد (۵). به طور کلی شاخص های رنگ در دماهای پایین به مقادیر نمونه های قارچ های تازه نزدیک تر بودند. علت احتمالی این امر می توان اثر رطوبت بر سرعت انجام برخی از واکنش های شیمیایی اثر گذار بر رنگ دانه ها دانست. هم چنین با افزایش دمای خشک کردن، واکنش های ایزومریزاسیون و تخریب محتوای فنل قارچ افزایش می یابد و سبب کاهش شاخص های رنگ L^* و a^* می گردد.

دیمیری و تالک^۱ (۲۰۱۵) در خشک کردن تکه های هویج

به نتایج مشابهی دست یافتند (۳۵).



شکل (۷) اثر متقابل دمای هوای داخل محفظه خشک کن و فشار خلأ بر محتوای فنل کل پودر قارچ دکمه ای خوراکی

Figure (7) Interaction of air temperature inside drying chamber and vacuum pressure on total phenolic content of edible button mushroom powder

شاخص های رنگ نهایی ΔL^* ، Δa^* و Δb^*

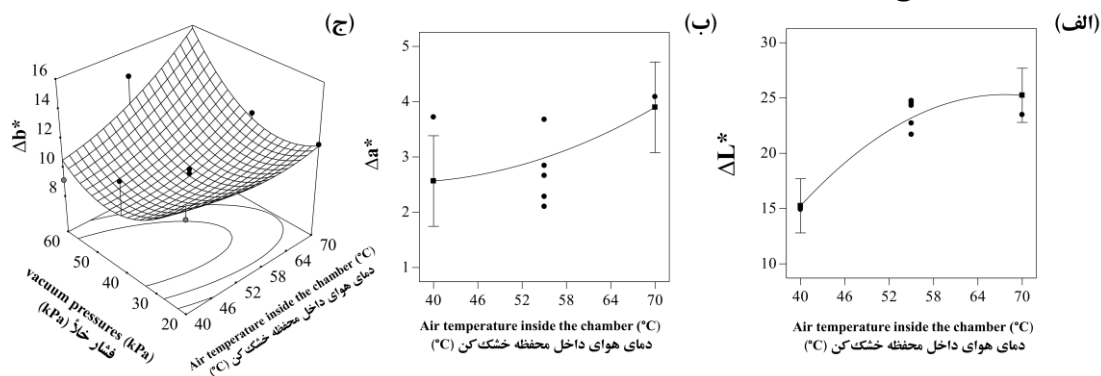
مقدار تغییرات ΔL^* پودر قارچ دکمه ای در محدوده ی ۲۸/۳۲ (فشار ۲۰ kPa و دمای ۷۰ °C) و ۱۴/۹۲ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۴۰ °C) بود. نتایج آزمایش ها نشان داد که بعد از خشک کردن قارچ دکمه ای خوراکی، شاخص رنگی L^* پودر قارچ کاهش یافت. مقدار تغییرات Δa^* پودر قارچ در محدوده ی ۵/۶۵ (فشار ۶۰ kPa و دمای ۷۰ °C) و ۱/۵۷ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۵۵ °C) بود. نتایج آزمایش ها نشان داد که بعد از خشک کردن قارچ دکمه ای خوراکی، شاخص رنگی a^* پودر قارچ دکمه ای افزایش یافت. مقدار تغییرات Δb^* پودر قارچ دکمه ای در محدوده ی ۱۵/۳۷ (فشار ۶۰ kPa و دمای ۷۰ °C) و ۸/۳۷ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۵۵ °C) بود. نتایج آزمایش ها نشان داد که بعد از خشک کردن قارچ دکمه ای، شاخص رنگی b^* پودر قارچ دکمه ای افزایش یافت. مقدار ضرایب نشان دهنده ی این بود که پارامتر دما بیشترین تأثیر را بر تغییرات شاخص رنگی L^* ، a^* و b^* داشت. علامت مثبت بیانگر این بود که با افزایش دما، تغییرات شاخص های رنگی L^* ، a^* و b^* پودر قارچ دکمه ای افزایش یافت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر خطی و عبارت درجه دوم دمای هوا بر شاخص های رنگی ΔL^* و Δa^* پودر قارچ دکمه ای معنی دار بودند، همچنین اثر متقابل دمای هوای

1- Demiray and Tulek

بهینه‌سازی

که در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۶ نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین حالت برای تولید پودر قارچ دکمه‌ای در شرایط خشک‌کردن خلأی-مادون قرمز در دمای 40°C و فشار خلأ $40/823\text{ kPa}$ به دست آمد. تحت این شرایط، شاخص مطلوبیت $0/83$ بود و مقدار بهینه متغیرهای مستقل شامل ضریب انتشار مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن، محتوای فنل کل و شاخص‌های رنگ نهایی ΔL^* ، Δa^* و Δb^* به ترتیب برابر با $3/06 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ ، 1088 MJ/kg ، $10/88\text{ mg/g}$ ، $2/76$ ، $15/28$ ، $2/55$ و $9/26$ به دست آمدند.

بهینه‌سازی فرآیندهای خشک‌کردن و پودرسازی یک مرحله مهم به‌منظور دستیابی به محصولی باکیفیت مطلوب از لحاظ ارزش غذایی و بازاریابی می‌باشد. به‌منظور بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای پاسخ از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. کمترین و بیشترین مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و ضریب اهمیت آنها برای متغیرهای پاسخ مورد بررسی در جدول ۵ آورده شده‌اند. با استفاده از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، ۷ نقطه بهینه با شاخص مطلوبیت بیشتر از $0/83$ برای انجام فرآیند خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای خوراکی تعیین شده



شکل (۸) اثر خطی و متقابل دمای هوای ورودی به خشک‌کن و فشار خلأ بر شاخص‌های رنگی پودر قارچ دکمه‌ای (الف) - ΔL^* ب- Δa^* و ج- Δb^*

Figure (8) Effect of linear and interaction of inlet air temperature to dryer and pressure on color indicators of butter mushroom powder (a- ΔL^* b- Δa^* and c- Δb^*)

جدول (۵) محدوده متغیرهای پاسخ و ضریب اهمیت آنها جهت بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای به روش سطح پاسخ
Table (5) Range of response variables and their importance factor to optimize button mushroom drying process by response surface methodology

ضریب اهمیت	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	هدف	متغیرهای پاسخ
1	9.5×10^{-9}	1.8×10^{-9}	بیشینه Maximum	ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s) the effective moisture diffusivity (m^2/s)
1	1269	408	کمینه Minimum	انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن (MJ/kg) Specific energy consumption (MJ/kg)
3	4.27	1.02	بیشینه Maximum	محتوای فنل کل (mg/g) total phenol content (mg/g)
5	28.32	14.92	کمینه Minimum	شاخص رنگی ΔL^* Color index ΔL^*
5	5.6	2.1	کمینه Minimum	شاخص رنگی Δa^* Color index Δa^*
5	15.3	8.3	کمینه Minimum	شاخص رنگی Δb^* Color index Δb^*

نوشیدنی میوه ای با توجه به شرایط آزمایش، مقدار چگالی توده‌ای را بین ۰/۶۷ تا ۰/۷۲ g/ml بدست آوردند.

شاخص کار و نسبت هاسنر

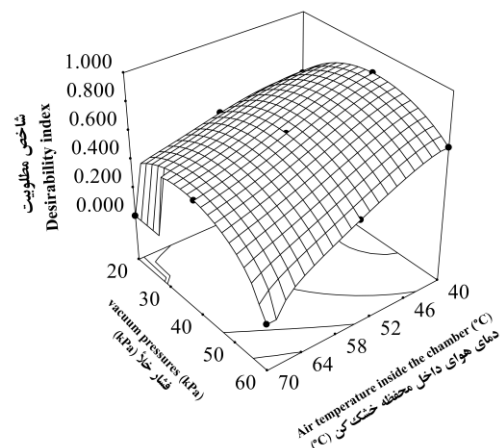
بعد از مشخص شدن نقطه بهینه خشک کن خلأی- مادون قرمز، از نقطه بهینه به مقدار لازم پودر تولید شد و مقادیر شاخص کار و نسبت هاسنر، در سه تکرار اندازه گیری شدند و در نهایت مقادیر آن‌ها به ترتیب ۱۴/۵۱٪ و ۱/۱۶ بدست آمدند. از آنجایی که مقادیر شاخص کار بین مقادیر ۱۱ تا ۱۵ درصد و نسبت هاسنر بین ۱/۱۲ تا ۱/۱۸ بدست آمدند، قابلیت روندگی پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی خوب گزارش شد. سرابندی و همکاران^۳ (۲۹) برای پودر مالت به نتایج مشابهی دست یافته و نسبت هاسنر را برای پودر مالت با توجه به شرایط خشک شدن بین ۱/۰۶ تا ۱/۱۲۴ بدست آوردند. مظفر و همکاران^۴ (۲۱) برای تهیه پودر تمر هندی و شیشیر و همکاران^۵ (۳۲) برای پودر گواوا به نتایج مشابهی رسیدند.

زاویه ایستایی و اسلاید

بعد از مشخص شدن نقطه بهینه خشک کن خلأی- مادون قرمز، از نقطه بهینه به مقدار لازم پودر تولید شد و مقادیر زاویه ایستایی و اسلاید، در سه تکرار اندازه گیری شدند و در نهایت مقادیر آن‌ها به ترتیب ۳۱ و ۲۵/۰۲ درجه بدست آمدند. و از آنجایی که مقادیر زاویه ایستایی بین مقادیر ۳۰ تا ۳۵ درجه بدست آمد، قابلیت جریان پذیری پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی خوب گزارش شد. شیشیر و همکاران (۳۲) قابلیت جریان پذیری پودر گواوا را نیز خوب گزارش کردند.

شکل ۱۰ اثر هم‌زمان متغیرهای مستقل مورد مطالعه را بر شاخص مطلوبیت نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که خشک کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر و فشار خلأ متوسط) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید. به طوری که جواب بهینه در جدول ۶ با بیشترین شاخص مطلوبیت (۰/۸۳) مربوط به دمای ۴۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa به دست آمد.

ایزلی و ایسک^۱ (۳۶) در خشک کردن قطعه‌های گوجه‌فرنگی با هوای داغ به این نتیجه رسیدند که، نمونه‌های خشک شده در دمای ۵۰ °C کمترین تغییرات شاخص‌های کیفی را داشته‌اند.



شکل (۹) اثر متقابل دمای محفظه خشک کن و فشار خلأ بر شاخص مطلوبیت

Figure (9) Interaction of dryer chamber temperature and vacuum pressure on desirability index

ارزیابی چگالی توده‌ای توده و حقیقی

چگالی توده‌ای یکی از ویژگی‌های مهم برای طراحی بسته بندی و حمل و نقل می‌باشد. بعد از مشخص شدن نقطه بهینه خشک کن خلأی- مادون قرمز، از نقطه بهینه به مقدار لازم پودر تولید شد و مقادیر چگالی توده‌ای توده و حقیقی، در سه تکرار اندازه گیری شده و در نهایت مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰/۵۳۰ و ۰/۶۲ g/ml بدست آمدند. کامل رحیمی و همکاران^۲ (۱۱) برای پودر

3- Sarabandi et al.

4- Muzaffar et al.

5- Shishir et al.

1- Izli and Isik

2- Kamel Rahimi et al.

جدول (۶) مقادیر پیش‌بینی شده متغیرهای وابسته و مستقل به روش سطح پاسخ در شرایط بهینه فرآیند خشک‌کردن قارچ کم‌های خوراکی
 Tabel (6) Predicted values of dependent and independent variables by response surface methodology under optimum conditions of dry Edible mushroom edible drying process

شاخص مطلوبیت Desirability index	Ab*	Aa*	AL*	محتوای فنل کل (mg/g)	انرژی ویژه مصرفی Specific energy consumption (MJ/kg)	ضریب انتشار مؤثر رطوبت Effective moisture diffusivity (m ² /s)	فشار خلا (kPa) Vacuum pressure (kPa)	دما (°C) temperature	شماره number
0.83	9.26	2.55	15.2	2.76	1087.9	3.06×10 ⁻⁹	40.8	40	1
0.83	9.27	2.56	15.2	2.78	1087.3	3.06×10 ⁻⁹	40.5	40	2
0.83	9.24	2.55	15.3	2.74	1088.9	3.05×10 ⁻⁹	41.2	40	3
0.83	9.3	2.56	15.2	2.8	1090.9	3.07×10 ⁻⁹	39.9	40	4
0.83	9.22	2.55	15.3	2.71	1083.7	3.13×10 ⁻⁹	41.8	40	5
0.83	9.31	2.56	15.2	2.8	1097.9	3.01×10 ⁻⁹	39.7	40	6
0.83	9.36	2.58	15.2	2.65	1076.4	3.22×10 ⁻⁹	38.9	40	7
0.83	9.19	2.56	15.3	2.66	1096.4	3.22×10 ⁻⁹	43	40	8
0.83	9.19	2.55	15.3	2.64	1082.4	3.22×10 ⁻⁹	43.2	40	9
0.83	9.51	2.63	15.1	2.95	1084.4	3.22×10 ⁻⁹	37	40	10

بیشتر بین شاخص‌های رنگ L^* ، a^* و b^* پودر قارچ دکمه‌ای نسبت به قارچ تازه شد. ۴- نتایج نشان داد که خشک کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر و فشار خلاً متوسط) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید. ۵- قابلیت جریان‌پذیری پودر قارچ دکمه‌ای خوراکی خوب گزارش شد.

سپاس‌گذاری

بدین وسیله از دانشگاه بوعلی سینا که در تأمین مالی هزینه‌های این پژوهش ما را یاری نمودند، قدردانی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های خشک کردن قارچ دکمه‌ای خوراکی به شیوه خلأی - مادون قرمز، نتایج زیر از این پژوهش قابل استنتاج هستند: ۱- نتایج نشان داد که اثر دمای هوا بر همه متغیرهای پاسخ قارچ دکمه‌ای در خشک‌کن خلأی - مادون قرمز معنی‌دار بود. ۲- دمای هوای ورودی به خشک‌کن بر انرژی ویژه مصرفی فرآیند خشک کردن و محتوای فنل کل پودر قارچ دکمه‌ای اثر منفی داشت. ۳- افزایش دما سبب افزایش اختلاف

منابع

- Ahmadi, G. M., and Amiri Chayjan, R. (2017). Optimization of hazelnut kernel drying in an infrared dryer with microwave pretreatment using response surface methodology. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 14(64): 165-178. (in Persian with English abstract)
- Alaei, B., and Amiri Chayjan, R. (2015). Drying characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5): 469-479.
- Alibas, I. (2007). Energy consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. *Biosystems Engineering*, 96(4): 495-502.
- AmirNejat, H., Khoshtaghaza, M., and Pahlavanzadeh, H. (2011). A determination of thin layer drying kinetics of button mushroom when dried through an infrared applied drying method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 42(1): 53-61. (in Persian with English abstract)
- Arslan, D., and Özcan, M. (2011). Drying of tomato slices: changes in drying kinetics, mineral contents, antioxidant activity and color parameters secado de rodajas de tomate: cambios en cinéticos del secado, contenido en minerales, actividad antioxidante y parámetros de color. *Journal of Food*, 9(3): 229-236.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., and Benjapiyaporn, C. (2010). Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2): 105-114.
- Aziz, M., Yusof, Y., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., and Scheiling, G. (2018). Material properties and tableting of fruit powders. *Food Engineering Reviews*, 10(2): 66-80.

8. Da Porto, C., and Natolino, A. (2018). Optimization of the extraction of phenolic compounds from red grape marc (*Vitis vinifera* L.) using response surface methodology. *Journal of Wine Research*, 29(1): 26-36.
9. Gaur, T., Rao, P. B., and Kushwaha, K. P. S. (2016). Nutritional and anti-nutritional components of some selected edible mushroom species. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 7(2): 155-161
10. Ghasemi, A., and Chayjan, R. A. (2018). Optimization of pelleting and infrared-convection drying processes of food and agricultural waste using response surface methodology (RSM). *Waste and Biomass Valorization*, 10(6): 1711-1729.
11. Kamel Rahimi, S., Elhami Rad, A., and Hemmati Kakhaki, A. (1394). Formulation and evaluation of fruit drink powder. *Innovation in Food Science and Technology*, 7 (4): 1-8.(in Persian)
12. Kantrong, H., Tansakul, A., and Mittal, G. S. (2014). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12): 3594-3608.
13. Karimi, F., Rafiee, S., Taheri-Garavand, A., and Karimi, M. (2011). Optimization of an air drying process for *Artemisia absinthium* leaves using response surface and artificial neural network models. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(1), 29-39.
14. Khawas, P., Dash, K. K., Das, A. J., and Deka, S. C. (2016). Modeling and optimization of the process parameters in vacuum drying of culinary banana (*Musa ABB*) slices by application of artificial neural network and genetic algorithm. *Drying Technology*, 34(4), 491-503.
15. Khosh Taghaza, M. H., Motevali, A., Minaei, S., and Abas Zadeh, A. (2015). Mathematical modeling of drying pomegranate arils in infrared dryer. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 13 (56) :101-112. (in Persian with English abstract)
16. Koca, N., Burdurlu, H.S., and Karadeniz, F. (2007). Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 449-455.
17. Liu, Y., Zhu, W., Luo, L., Li, X., and Yu, H. (2014). A mathematical model for vacuum far-infrared drying of potato slices. *Drying Technology*, 32(2): 180-189.
18. Minaei, S., Motevali, A., Hematian, R., Abbasi, S., Ghaderi, A., and Najafi, G. (2013). Investigation of the variation of drying rate, effective diffusion coefficient, activation energy, and energy consumption for mushroom slices using microwave–vacuum drier. *Journal of Food Science and Technology*, 10 (41):1-12. (in Persian with English abstract)

19. Mircea, C., Cioanca, O., Iancu, C., Tataringa, G., and Hancianu, M. (2015). In vitro antioxidant activity of some extracts obtained from *Agaricus bisporus* brown, *Pleurotus ostreatus* and *fomes fomentarius*. *Farmacia*, 63(6): 927-933.
20. Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., and Tiwari, B. K. (2014). Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3): 43-55.
21. Muzaffar, K., Dar, B. N., and Kumar, P. (2017). Assessment of nutritional, physicochemical, antioxidant, structural and rheological properties of spray dried tamarind pulp powder. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(2): 746-757.
22. Pardeshi, B. M., and Pardeshi, P. M. (2009). The edible medicinal mushrooms as supportive natural nutrients: Study of nonvolatile mineral contents of some edible medicinal mushrooms from India; eastern remedies for modern western maladies. In *Proceedings of the 5~(th) International Medicinal Mushroom Conference*.
23. Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., and Siriamornpun, S. (2012). Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2): 155-164.
24. Pu, Y. Y., and Sun, D. W. (2015). Vis–NIR hyperspectral imaging in visualizing moisture distribution of mango slices during microwave-vacuum drying. *Food Chemistry*, 188: 271-278.
25. Qi, L. L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Meng, X. Y., and Chen, H. Z. (2014). Comparison of drying characteristics and quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) using different drying methods. *Drying Technology*, 32(15), 1751-1761.
26. Rathore, H., Prasad, S., and Sharma, S. (2018). Mushroom nutraceuticals for improved nutrition and better human health: a review. *PharmaNutrition*, 5(2): 35-46.
27. Safari, M., Amiri Chayjan, R., Alaei, B. (2016). Modeling of some thermal and physical properties of almond kernels under vacuum-infrared dryer with microwave pretreatment. *Journal of Agricultural Engineering*, 39(1), 21-37. (in Persian with English abstract)
28. Salehi, F., Kashani Nejad, M., Sadeghi Mahoonak, A. R., and Ziyai Far, A M. (2016). Drying of button mushroom by infrared-hot air system. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 13(59): 151-159 (in Persian with English abstract)
29. Sarabandi, K., and Peighambaroust, S. H. (2015). Effect of some production parameters and storage time on the flowability characteristics of spray-dried malt extract powder. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 10(1): 51-60. (in Persian with English abstract)
30. Shamaee, S., and Djome, Z. E. (2010). The effect of pre-treatments in combination with hot air, vacuum and hot-a microwave drying methods the progress of the drying

- process, and textural, and colour and rehydration rate on button mushroom (*Agaricus bisporus*). Iranian Food Science & Technology Research Journal, 6(3): 193-201. (in Persian)
31. Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H., and Deng, S. (2011). Thin-layer drying kinetics and quality changes of sweet sorghum stalk for ethanol production as affected by drying temperature. *Industrial Crops and Products*, 34(3): 1588-1594.
 32. Shishir, M. R. I., Taip, F. S., Aziz, N. A., and Talib, R. A. (2014). Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2: 74-81.
 33. Singleton, V. L., and Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3): 144-158.
 34. Sledz, M., and Witrowa-Rajchert, D. (2012). Influence of microwave-convective drying of chlorophyll content and colour of herbs. *Acta Agrophysica*, 19(4): 865-876.
 35. Demiray, E., and Tulek, Y. (2015). Color degradation kinetics of carrot (*Daucus carota* L.) slices during hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 800-805.
 36. Izli, N., & Isik, E. (2015). Color and microstructure properties of tomatoes dried by microwave, convective, and microwave-convective methods. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 241-249.
 37. Šumić, Z., Vakula, A., Tepić, A., Čakarević, J., Vitas, J., and Pavlić, B. (2016). Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). *Food chemistry*, 203: 465-475.
 38. Toor, R. K., and Savage, G. P. (2006). Effect of semi-drying on the antioxidant components of tomatoes. *Food Chemistry*, 94(1): 90-97.
 39. Wasser, S. P. (2014). Medicinal Mushroom Science: Current Perspectives, Advances, Evidences, and Challenges, *Biomedical Journal*, 37: 345-356.
 40. Zhang, Z., Song, H., Peng, Z., Luo, Q., Ming, J., and Zhao, G. (2012). Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods. *Journal of Food Engineering*, 109(3): 406-413.
 41. Xie, Y., Gao, Z., Liu, Y., and Xiao, H. (2017). Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices. *LWT-Food Science and Technology*, 80: 237-249.