



بهینه‌سازی هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حرارتی در فرآیند تولید قرص فشرده گوجه‌فرنگی به شیوه خلائی - مادون‌قرمز

منوچهر رشیدی^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}، علی قاسمی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم
(manochehr.5679@gmail.com)

۲. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم (amirireza@basu.ac.ir)

۳. دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم (alighasemi10@gmail.com)

چکیده

در این پژوهش اثر متغیرهای مؤثر بر فرآیند خشک کردن به شیوه خلائی - مادون‌قرمز شامل دمای هوا و فشار خلأ بر خواص فیزیکی (چروکیدگی و چگالی واحد)، مکانیکی (مقاومت به نفوذ) و حرارتی (ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی ویژه مصرفی خشک کردن) قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی مورد مطالعه قرار گرفتند. فرآیند خشک کردن نمونه‌ها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ °C و پنج سطح فشار خلأ ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ kPa صورت گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شدند. نتایج نشان داد که خشک کردن به شیوه خلائی - مادون‌قرمز سبب کاهش زمان خشک کردن و انرژی ویژه مصرفی آن شد. افزایش دمای هوای خشک کردن سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و چروکیدگی و هم‌چنین کاهش انرژی ویژه مصرفی خشک کردن، مقاومت به نفوذ و چگالی واحد شد. نقطه بهینه فرآیند خشک کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی در دمای ۵۰ °C و فشار خلأ ۵۰ kPa به دست آمد. خشک کردن تحت شرایط ملایم (دمای پایین‌تر و فشار خلأ بالاتر) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، خلائی، قرص فشرده گوجه‌فرنگی، چروکیدگی خشک‌کن.

* نویسنده مسئول: amirireza@basu.ac.ir



بهینه‌سازی فرآیند تولید قرص فشرده گوجه‌فرنگی به شیوه خلأی - مادون قرمز بر مبنای خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی

مقدمه

گوجه‌فرنگی یکی از بیشترین سبزی‌های مصرفی در سراسر جهان و یکی از باارزش‌ترین منابع تأمین مواد معدنی و ویتامین‌ها در رژیم غذایی انسان است. ایران با تولید حدود ۵/۹۷ میلیون تن گوجه‌فرنگی، رتبه هفتم در تولید این محصول را دارد [۱۲]. گوجه‌فرنگی غنی از مواد غذایی مرتبط با سلامت انسان از جمله لیکوپن، بتاکاروتن، فلاونوئیدها، ترکیبات فنلی، پتاسیم، پروتئین، فیبر غذایی و انواع ویتامین‌ها (C، E و B9) است. مصرف منظم گوجه‌فرنگی منجر به کاهش خطر ابتلا به انواع مختلف سرطان (به‌ویژه سرطان پروستات) و بیماری‌های قلبی و عروقی می‌شود [۱۷]. گوجه‌فرنگی به دلیل دارا بودن محتوای رطوبتی بالا محصولی فسادپذیر است، بنابراین باید یا سریعاً مصرف شود و یا برای مصارف بعدی فرآوری و نگهداری شود. خشک کردن یکی از روش‌های مطلوب نگهداری گوجه‌فرنگی است [۸]. در میان فرآورده‌های گوجه‌فرنگی خشک‌شده، پودر گوجه‌فرنگی بازار خاصی را در اختیار دارد. پودر گوجه‌فرنگی دارای مزایای بسیاری از جمله ارزش تجاری بالا، مدیریت آسان بسته‌بندی و حمل‌ونقل، مخلوط شدن سریع با سایر مواد غذایی به‌منظور استفاده در کارخانه‌های صنایع غذایی می‌باشد [۱۵]. به‌طور کلی، پودر میوه‌ها خیلی خشک، رطوبت‌پذیر و دارای حجم زیادی هستند؛ بنابراین طی عملیات ذخیره‌سازی، بسته‌بندی و حمل‌ونقل، پودر میوه نیازمند مراقبت‌های ویژه است. متراکم کردن پودر میوه به شکل قرص یک روش مناسب برای غلبه بر این مشکلات و کاهش هزینه‌ها است. با تولید قرص میوه، حجم و سطح تماس پودر میوه با هوای اطراف کاهش یافته و در نتیجه احتمال انجام واکنش‌های تجزیه شیمیایی و تخریب مواد مغذی آن کاهش می‌یابد. تولید قرص فشرده از پودر میوه ضمن استفاده راحت‌تر آن توسط مشتری، به دلیل عدم چسبندگی سبب بسته‌بندی آسان‌تر و کاهش هزینه‌های تولید می‌گردد. تبدیل پودر به قرص معمولاً در صنعت داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما استفاده آن، در صنایع غذایی کم است و در مراحل اولیه توسعه است [۹]. تاکنون تحقیقاتی در مورد تولید قرص از پودر میوه‌های پیتایا، انبه، گواوا و همچنین تولید قرص‌های غذایی حاوی پودر میوه‌های مختلف از جمله خرما، اسپیرولینا و نارنگی گزارش شده است [۷، ۲۴، ۲۵، ۱۸، ۷].

با توجه به اطلاعات کمی که در تولید قرص‌های غذایی وجود دارد، مطالعه پارامترهای اثرگذار بر فرآیندهای قرص‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است. خواص قرص به شدت وابسته به فرآیندهای تولید آن شامل فرآیند پیش آماده‌سازی شامل: پوست-کنی میوه، پودر کردن و رطوبت‌دهی یا بخاردهی به پودر، فرآیندهای فشرده‌سازی، تولید قرص، خشک کردن و خنک کردن است [۱۳]. در سال‌های اخیر، به منظور انجام تحقیقات روی فرآیند قرص‌سازی از دستگاه‌های قرص‌ساز متنوعی شامل: تک‌محوره، چند محوره و یا شبیه‌ساز پرس استفاده شده است. فشرده‌سازی توسط قالب تک‌محوره، پرس تک‌محوره نامیده می‌شود که به‌صورت گسترده در مطالعات قرص‌سازی به دلیل سادگی در اجرا و داده‌برداری استفاده می‌شود. اصول اساسی همه دستگاه‌های پرس قرص به‌طور معمول یکسان هستند، این فرآیندها معمولاً شامل پر کردن ماتریس قالب با پودر، سپس فشردن با یک سنبه، آزاد کردن فشار، و در نهایت خارج کردن قرص از ماتریس قالب می‌باشد [۹].

محتوای رطوبتی، چسبندگی، چگالی، جریان‌پذیری، اندازه و شکل ذرات پودر میوه پارامترهای مهمی هستند که به شدت بر رفتار فشرده‌سازی آن تأثیرگذار می‌گذارند. به‌منظور جلوگیری از فساد قرص‌های فشرده مرطوب و حفظ کیفیت آن‌ها، خشک کردن یکی از مراحل مهم پس از فرآیند تولید آن‌ها می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که عملیات خشک کردن قرص‌های فشرده

مرطوب نیز اثر قابل توجهی بر خواص آن‌ها دارد [۱۳]. به منظور ذخیره‌سازی قرص‌ها به مدت بیشتر از چهار ماه، محتوای رطوبتی آن‌ها باید به سطح ۱۱ تا ۱۳ d.b.٪ برسد [۲۱]. در خشک‌کن‌های صنعتی برای مقابله با اثرات نامطلوب خشک‌کردن و بالا بردن کیفیت و ارزش غذایی محصول خشک‌شده از یک شیوه خشک‌کردن تحت خلأ استفاده می‌شود. در خشک‌کن خلأیی به دلیل افزایش اختلاف فشار هوا بین بخش‌های داخلی و سطح محصول، نرخ انتقال جرم نیز افزایش می‌یابد. در فشارهای پایین محصول به از دست دادن رطوبت مستعدتر است اما برای کاهش رطوبت محصول نیاز به یک منبع حرارتی می‌باشد تا با ایجاد انرژی سبب تبخیر رطوبت محصول شود. اشعه مادون قرمز به عمق خاصی از محصولات بیولوژیکی نفوذ می‌کند و دمای آن را افزایش می‌دهد. در نتیجه میزان انتشار آب از طریق محصولات بیولوژیکی افزایش می‌یابد و آب در سطح مواد تبخیر می‌شود. رطوبت توسط هوای خشک جذب می‌شود و میزان خشک شدن سریع را فراهم می‌کند [۱۱، ۱۹]. با این روش به دلیل آنکه محصول در معرض درجه حرارت بالا قرار نمی‌گیرد کیفیت محصول خشک‌شده نیز افزایش می‌یابد [۵]. چروکیدگی از جمله تغییرات فیزیکی نامطلوب در ساختار محصول طی فرآیند خشک‌کردن است که هم روی بافت و هم روی کیفیت محصول تأثیرگذار است [۳]. ضریب انتشار مؤثر رطوبت یکی از پارامترهای مهم در مدل‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن به حساب می‌آید. نرخ انتقال رطوبت، به‌وسیله‌ی ضریب انتشار مؤثر رطوبت تفسیر می‌شود [۲].

بهینه‌سازی نقش مهمی در افزایش بازدهی فرآیندهای تولید دارد. روش سطح پاسخ از جمله متداول‌ترین روش‌های بهینه‌سازی است. این روش مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که می‌تواند با کمترین منابع و داده‌های کمی و طرح آماری مناسب، هم‌زمان شرایط بهینه را برای چندین متغیر تعیین کند [۳]. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، تاکنون در هیچ‌یک از تحقیقات انجام شده اثر فرآیند خشک‌کردن بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی قرص‌های تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی به‌عنوان غذای انسان بررسی نشده است. با توجه به اهمیت فرآوری گوجه‌فرنگی، به‌طور کلی اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱- بررسی اثر متغیرهای مستقل (دمای هوا و فشار خلأ) بر متغیرهای پاسخ (چگالی واحد، چروکیدگی، مقاومت به نفوذ، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن) طی فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی به شیوه خلأیی - مادون قرمز و ۲- تعیین شرایط بهینه برای فرآیند خشک‌کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی به کمک روش سطح پاسخ.

مواد و روش‌ها

تهیه پودر گوجه‌فرنگی

به منظور تهیه پودر، گوجه‌فرنگی تازه از میدان میوه و تره‌بار استان همدان تهیه شد. رطوبت اولیه محصول با استفاده از روش آون هوای داغ تعیین گردید که مقدار آن برابر با ۱۶۰۶/۵ d.b.٪ به دست آمد [۱۷]. پوست نازک گوجه‌فرنگی‌ها به شیوه غوطه‌وری در آب گرم (۵۰ °C به مدت ۳۰ s) جدا شدند و سپس نمونه‌ها در ضخامت‌های ۳ mm برش خوردند. ورقه‌های گوجه‌فرنگی به‌وسیله یک خشک‌کن نیمه‌صنعتی به شیوه هوای گرم در دمای ۵۰ °C در سرعت هوای ۱ m/s خشک شدند تا محتوای رطوبتی آن‌ها به زیر ۱۰ d.b.٪ (رطوبت مناسب جهت پودر کردن) برسد [۲۰]. سپس ورقه‌های خشک گوجه‌فرنگی با استفاده از یک دستگاه آسیاب خانگی (پاناسونیک، مدل MJ-M176P، ساخت مالزی) به مدت یک دقیقه آسیاب و پودر شدند. به‌منظور همگن کردن اندازه ذرات، پودر گوجه‌فرنگی حاصل توسط یک الک آزمایشگاهی با مش شماره ۵۰ (اندازه حفره‌ها ۰/۵ mm) الک شدند، بنابراین، اندازه ذرات پودر مورد استفاده برای فرآیند قرص‌سازی کمتر از ۰/۵ mm بودند.

تهیه خمیر گوجه‌فرنگی قبل از فرآیند قرص‌سازی

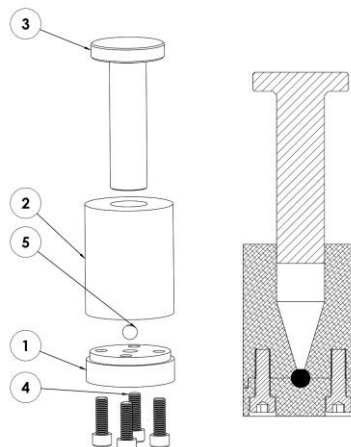
با توجه به پیش‌آزمایش‌های انجام‌شده، محتوای رطوبتی مناسب به‌منظور ایجاد چسبندگی کافی بین ذرات پودر گوجه‌فرنگی ۲۳ d.b.٪ انتخاب شد. در این تحقیق، از شربت فروکتوز با غلظت ۵۵ درصد به‌عنوان ماده چسبان استفاده شد. شربت فروکتوز به نسبت ۶ درصد وزنی (نسبت به وزن خام پودر گوجه‌فرنگی) در آب حل شد و محلول به دست آمده به پودر گوجه‌فرنگی اضافه شد. وزن آب مورد نیاز جهت رساندن محتوای رطوبتی پودر گوجه‌فرنگی به سطح ۲۳ d.b.٪ از رابطه (۱) تعیین شد. خمیر به دست آمده به مدت ۷۲ ساعت در یخچال در دمای ۴ °C نگهداری شد تا فرآیند جذب رطوبت انجام شود.

$$W_w = \frac{W_i (M_f - M_i)}{100 - M_f} \quad (1)$$

که W_w وزن آب اضافه‌شده به پودر (g)، W_i وزن اولیه پودر (g)، M_f رطوبت نهایی (d.b.) و M_i رطوبت اولیه (d.b.) هستند.

فرآیند قرص‌سازی از خمیر گوجه‌فرنگی

فرآیند تولید قرص‌های کروی شکل گوجه‌فرنگی، توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک آزمایشگاهی و یک قالب ته‌بسته نشان داده شده در شکل ۱ انجام شد. این قالب از سه بخش اصلی شامل فک بالایی، فک پایینی و یک پیستون تشکیل شده است. طی فرآیند قرص‌سازی با این قالب، مواد خام از طریق مجرای ورودی قرار گرفته در فک بالایی وارد قالب می‌شدند و با اعمال فشار به پیستون، مواد خام با عبور از قسمت مخروطی شکل وارد دو نیم‌کره بین فک بالایی و پایینی (با قطر ۱۲ mm) می‌شدند و در یک حجم بسته، متراکم و قرص فشرده تشکیل می‌گردید. پس از رسیدن فشار روغن هیدرولیک به ۷۵ bar حرکت پیستون به مدت ۱۵ ثانیه به‌منظور آزادسازی تنش‌های موجود در بافت محصول متوقف می‌شد و سپس فشار از روی مواد برداشته می‌شد [۲۳]. در پایان دو فک بالایی و پایینی به آهستگی از هم جدا شده و قرص تشکیل شده از قالب خارج می‌شد.

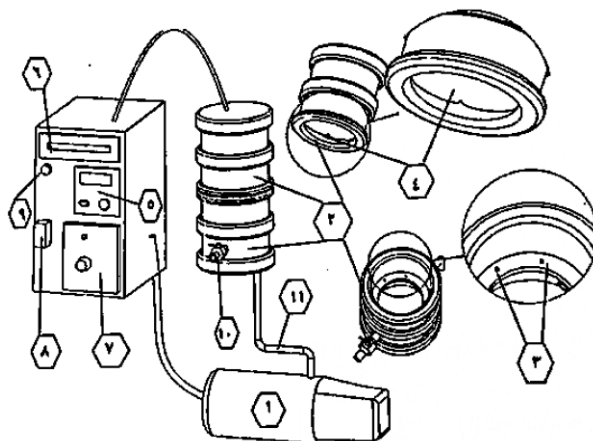


شکل ۱- نمای برش‌خورده از قالب تشکیل قرص‌های کروی شکل (۱- فک پایینی، ۲- فک بالایی، ۳- پیستون، ۴- پیچ‌های نگهدارنده و ۵- قرص کروی)

فرآیند خشک کردن قرص‌های فشرده

آزمایش‌های خشک کردن قرص‌های فشرده مرطوب بلافاصله پس از پایان فرآیند قرص‌سازی با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن خلأی - مادون‌قرمز، نشان داده شده در شکل ۲ انجام شدند. آزمایش‌های خشک کردن در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ °C و پنج سطح فشار خلأ ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ kPa انجام شدند. طی فرآیند خشک کردن، دمای داخل محفظه

توسط یک ترموستات (آتین، ساخت ایران) با درجه تفکیک 1°C که به یک ترموکوپل نوع K متصل بود کنترل می‌شد. در هر آزمایش حدود ۴۰۰ g قرص خشک می‌شد. طی مرحله خشک شدن در فواصل زمانی مشخصی، نمونه‌ها از خشک کن خارج و محتوای رطوبتی آن‌ها تعیین می‌شدند. آزمایش‌ها تا رسیدن به محتوای رطوبتی ۱۰٪ d.b. ادامه یافت.



شکل ۲- شماتیک خشک کن خلأی- مادون قرمز (۱)- پمپ خلأ، ۲- محفظه خلأ، ۳- حسگرهای دما و خلأ، ۴- لامپ مادون قرمز، ۵- ترموستات، ۶- کنترل گر و عملگر فشار خلأ، ۷- دیمر، ۸- فیوز، ۹- چراغ سیگنال، ۱۰- شیر، شکستن خلأ و ۱۱- شلنگ خلأ

چروکیدگی

چروکیدگی قرص‌های تولید شده با تعیین حجم نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند خشک کردن محاسبه شد. به این ترتیب که برای هر آزمایش قطر سه نمونه قرص کروی (در سه جهت عمود بر هم)، قبل و بعد از خشک کردن توسط یک کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و میانگین هندسی آن‌ها به‌عنوان قطر نمونه در نظر گرفته شد [۱]. حجم قرص کروی قبل و بعد از فرآیند خشک کردن تعیین شد و در نهایت درصد چروکیدگی از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$S = \left(1 - \frac{V_w}{V_d}\right) \times 100 \quad (2)$$

که S درصد چروکیدگی، V_d و V_w به ترتیب حجم قرص‌های کروی (mm^3) قبل و بعد از فرآیند خشک کردن هستند.

چگالی واحد

چگالی واحد هر یک از قرص‌های کروی خشک‌شده با اندازه‌گیری جرم و حجم آن‌ها تعیین شدند. برای این منظور پس از محاسبه حجم قرص کروی و اندازه‌گیری جرم آن توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت 0.001 g ، چگالی واحد با تقسیم جرم قرص به حجم آن محاسبه شد [۲۲]. چگالی واحد گزارش شده در این پژوهش میانگین اندازه‌گیری شده برای پنج قرص کروی است.

مقاومت به نفوذ

مقاومت به نفوذ قرص‌های فشرده، توسط آزمون استاندارد پانچری تعیین شدند. این آزمون با استفاده از دستگاه آزمون کشش و فشار مواد غذایی (Zwick/roell مدل bt1_fr0.5th.d14 ساخت کشور آلمان) انجام شد. برای این منظور یک قرص بین یک صفحه تخت و میله نفوذ با قطر $4/5\text{ mm}$ قرار می‌گرفت و با نرخ بارگذاری ثابت 30 mm/min تا هنگام ترک برداشتن و

شکستگی نمونه فشرده می‌شد و مقدار نیرو و جابجایی در هر لحظه ثبت می‌شدند. بیشترین نیروی ثبت شده در طی این آزمون به عنوان مقاومت به نفوذ نمونه در نظر گرفته شد. مقاومت به نفوذ نمونه‌ها در سه تکرار اندازه‌گیری شد [۶].

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

ضریب انتشار مؤثر رطوبت بر اساس قانون دوم فیک در مختصات کروی تعیین شد. برای این منظور، با رسم نمودار لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت بر حسب زمان و برازش یک خط به آن و محاسبه شیب این خط (m) و با فرض اینکه چروکیدگی قابل صرف نظر کردن باشد و توزیع رطوبت درون قرص یکنواخت است، مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$D_{eff} = \frac{mr^2}{\pi} \quad (3)$$

که در این رابطه D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s) و r شعاع قرص فشرده کروی است [۳].

انرژی ویژه مصرفی خشک کردن

انرژی مصرفی قرص فشرده خشک شده با خشک کن خلائی - مادون قرمز از رابطه (۴) دست آمد [۲۳].

$$SEC = \frac{k \times t \times 3.6 \times 10^6}{m_v} \quad (4)$$

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

بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی

به منظور بررسی آماری اثر متغیرهای مستقل بر متغیرهای پاسخ مورد مطالعه و همچنین تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن از روش سطح پاسخ به شیوه‌ی طرح مرکب مرکزی استفاده شد [۴]. برای این منظور از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰ استفاده شد. شکل کلی معادله مرتبه دوم سطوح پاسخ در رابطه‌ی (۵) نشان داده شده است.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i < j} \sum b_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k b_{ij} X_j^2 \quad (5)$$

که Y پاسخ متغیرهای وابسته مورد مطالعه (ضریب انتشار مؤثر رطوبت، چروکیدگی، انرژی ویژه مصرفی، مقاومت به نفوذ و چگالی واحد)، b_0 عرض از مبدأ، b_i ، b_{ij} و b_{ii} به ترتیب ضرایب خطی، درجه دو و اثر متقابل رابطه، X_i و X_j متغیرهای مستقل مورد بررسی هستند. جداول ۱ و ۲ به ترتیب، متغیرهای مستقل به همراه سطوح کدبندی شده آن‌ها و تعداد آزمایش‌ها را نشان می‌دهند.

جدول ۱- سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل مورد مطالعه و سطوح آن‌ها

متغیرهای مستقل	نماد	سطوح کدبندی شده متغیرها				
		۲	۱	۰	-۱	-۲
دمای هوای داخل محفظه (°C)	X ₁	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰
فشار خلأ (kPa)	X ₂	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰

جدول ۲- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر متغیرهای پاسخ بر فرآیندهای قرص‌سازی از پودر گوجه‌فرنگی و خشک کردن آن‌ها به روش سطح پاسخ

شماره آزمایش	سطوح متغیرهای مستقل (مقدار کدبندی)		تعداد تکرار
	دمای هوای داخل محفظه (°C)	فشار خلأ (kPa)	
۱	۶۰ (۰)	۴۰ (۰)	۵
۲	۵۰ (-۱)	۳۰ (-۱)	۱
۳	۴۰ (-۲)	۴۰ (۰)	۱
۴	۵۰ (-۱)	۵۰ (۱)	۱
۵	۶۰ (۰)	۶۰ (۲)	۱
۶	۸۰ (۲)	۴۰ (۰)	۱
۷	۷۰ (۱)	۳۰ (-۱)	۱
۸	۶۰ (۰)	۲۰ (-۲)	۱
۹	۷۰ (-۱)	۵۰ (۱)	۱

برای تعیین شرایط بهینه با توجه به اهداف مورد مطالعه، ضریب اهمیت متغیرهای ضریب انتشار مؤثر رطوبت و مقاومت به نفوذ برابر ۵ (بیشترین اهمیت)، چروکیدگی و چگالی واحد برابر ۳ و انرژی ویژه مصرفی برابر ۱ (کمترین اهمیت) انتخاب شدند.

نتایج و بحث

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 ۰/۹۶ و ضریب تغییرات برای تمامی مدل‌ها کمتر از ۷/۶۲ بود به جز ضریب انتشار مؤثر رطوبت که مقدار ضریب تغییرات برای آن برابر با ۴۲/۶۷ به دست آمد، بنابراین مقادیر پایین ضریب تغییرات (≈ 8) برای اغلب مدل‌های پیشنهادی در جدول ۳ نشان‌دهنده تکرارپذیری خوب این مدل‌ها می‌باشد [۱۴]. همچنین با توجه به معنی‌دار نشدن فاکتور عدم برازش برای همه متغیرهای مورد مطالعه به جز ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌توان گفت که مدل‌های ارائه شده به خوبی توانسته‌اند مقدار تغییرات متغیرهای وابسته را پیش‌بینی کنند. با این وجود، معنی‌دار شدن عدم برازش برای ضریب انتشار رطوبت نشان می‌دهد که مدل ریاضی ارائه شده به‌منظور پیش‌بینی دقیق این متغیر مناسب نیست.

جدول ۳- ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای متغیرهای پاسخ (X_1 دمای هوای داخل محفظه، X_2 فشار خلا)

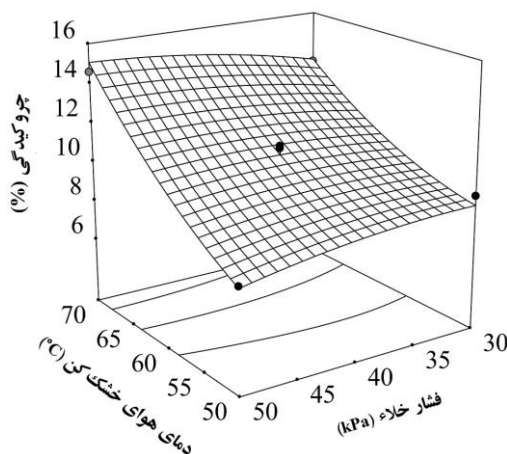
ضرایب مدل					منابع تغییرات
UD ($g.cm^{-3}$)	Pt (N)	SEC ($kJ.kg^{-1}$)	S (%)	D_{eff} ($m^2.s^{-1}$)	
عرض از مبدأ					(b ₀)
+۱/۶۹	+۴۲/۸۸	+۶/۵۲×۱۰ ^{-۸}	+۱۰/۹۴	+۹/۴۱×۱۰ ^{-۱۱}	
عبارت خطی					(b ₁) X_1
-۰/۳۳ ^a	-۵۱/۰۲ ^a	-۵/۶×۱۰ ^{-۸a}	+۲/۹۵ ^a	+۴/۱۳×۱۰ ^{-۸a}	
					(b ₂) X_2
+۰/۰۰۷۶ ^a	+۵۳/۸۴ ^c	+۳/۳۴×۱۰ ^{-۷ns}	+۰/۱۰ ^{ns}	+۲/۸۴×۱۰ ^{-۱۱c}	
اثر متقابل					(b ₁₂) X_1X_2
-۰/۰۷ ^a	-۵۲/۱۹ ^b	-۱/۶×۱۰ ^{-۸ns}	+۰/۷۰ ^a	+۹/۸۱×۱۰ ^{-۱۰b}	
عبارت درجه دوم					(b ₁₁) X_1^2
-۰/۰۶۳ ^{ns}	+۲۰/۱۶ ^a	+۱/۹۷×۱۰ ^{-۸c}	+۰/۷۰ ^a	+۱/۹۴×۱۰ ^{-۸a}	
					(b ₂₂) X_2^2
+۰/۰۰۸۵ ^{ns}	+۲۲/۹۱ ^{ns}	-۳/۱۹×۱۰ ^{-۷ns}	-۰/۳۱ ^a	+۱/۲۴×۱۰ ^{-۱۰ns}	
۰/۷۲ ^{ns}	۰/۷۶ ^{ns}	۰/۰۷۶ ^{ns}	۰/۲۹ ^{ns}	۰/۰۳ ^a	Lack of Fit (P-value)
۰/۰۰۰۱ ^a	۰/۰۰۰۱ ^a	۰/۰۰۰۶ ^b	۰/۰۰۰۱ ^a	۰/۰۰۰۱ ^b	Model (P-value)
۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۶	R ²
۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۹۴	Adj. R ²
۰/۹۵	۰/۹۱	-۰/۱۵	۰/۹۳	۰/۷۱	Predicted. R ²
۳/۲۸	۷/۶۲	۲/۶۷	۳/۷۱	۴۲/۶۷	C.V. (%)
۰/۰۵۳	۳/۴۸	+۳/۴۳×۱۰ ^{-۸}	۰/۴۲	+۶/۶۶×۱۰ ^{-۸}	Std. Dev.

a بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱، b اختلاف معنی دار در ۰/۱، c اختلاف معنی دار در ۰/۰۵ و ns عدم اختلاف معنی دار می‌باشند. D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت، S چروکیدگی، SEC انرژی ویژه مصرفی، Pt مقاومت به نفوذ و UD چگالی (واحد).

چروکیدگی

بیشترین مقدار چروکیدگی (۱۹/۹۲٪) در دمای خشک کردن ۸۰ °C و فشار ۴۰ kPa و کمترین مقدار چروکیدگی (۷/۵۵٪) در دمای خشک کردن ۴۰ °C و فشار ۴۰ kPa به دست آمد. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده شد که تمامی اثرات خطی (به جز اثر فشار خلا)، متقابل و درجه دوم متغیرهای مستقل دمای خشک کن و فشار خلا بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده و خشک شده گوجه‌فرنگی معنی دار بودند. **Error! Reference source not found.** اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک کن و فشار خلا بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل مشاهده می‌شود هر دو عامل دمای خشک کردن و فشار خلا بر چروکیدگی اثر مستقیم داشتند، به طوری که با افزایش هم‌زمان فشار خلا و دمای خشک کردن، مقدار چروکیدگی افزایش یافت. دلیل این امر، آن است که وقتی که در طول فرآیند خشک شدن، آب از مرکز قرص فشرده خارج می‌شود، عدم تعادل فشار بین مرکز قرص فشرده در محفظه خشک کن و محیط بیرون ایجاد می‌شود که می‌تواند

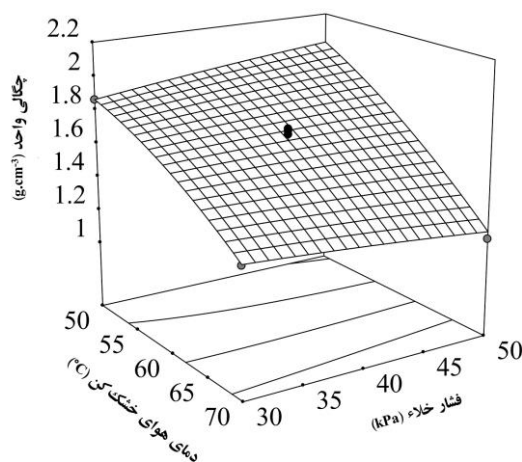
باعث اعمال تنش و در نتیجه سبب چروکیدگی قرص فشرده گردد. بنابراین در فشار خلأ کمتر و در نتیجه در اختلاف فشار کمتر بین داخل محفظه خشک کن و بیرون آن، مقدار چروکیدگی مرکز قرص فشرده کمتر بود. به طور کلی، حرارت دهی و حذف رطوبت از ماده غذایی با ایجاد گرادیان های دمایی و رطوبتی درون محصول سبب ایجاد تنش های حرارتی و رطوبتی در ساختار سلولی محصول می گردد و همین مسئله سبب ایجاد تغییر شکل و اندازه محصول می گردد [۱].



شکل ۳- اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک کن و فشار خلأ بر چروکیدگی قرص های فشرده شده گوجه فرنگی

چگالی واحد

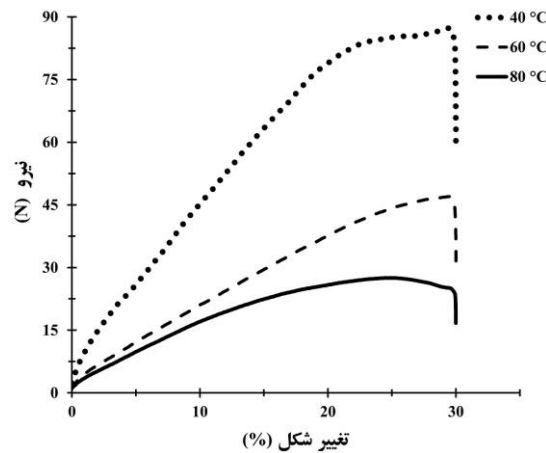
بیشترین مقدار چگالی واحد ($2/10 \text{ g.cm}^{-3}$) در دمای خشک کردن 40°C و فشار خلأ 40 kPa و کمترین مقدار چگالی واحد ($0/79 \text{ g.cm}^{-3}$) در دمای خشک کردن 40°C و فشار خلأ 40 kPa به دست آمد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر خطی دمای هوای ورودی به خشک کن، اثرات متقابل دمای هوای خشک کن و فشار خلأ و عبارت درجه دوم دمای هوای ورودی بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه فرنگی خشک شده معنی دار بودند. شکل ۴ اثر متقابل دمای هوای خشک کردن و فشار خلأ بر چگالی واحد قرص فشرده گوجه فرنگی را نشان می دهد. همان طور که از نتایج این شکل قابل مشاهده است، با افزایش دمای هوای خشک کن، چگالی واحد کاهش یافت. دلیل احتمالی برای کاهش چگالی واحد با افزایش دما را می توان افزایش سرعت انجام واکنش های تجزیه شیمیایی مواد مغذی موجود در قرص های فشرده با افزایش دما دانست که منجر به کاهش بیشتر وزن خشک آنها می گردد [۱۳].



شکل ۴- اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک‌کن و فشار خلأ بر چروکیدگی قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی

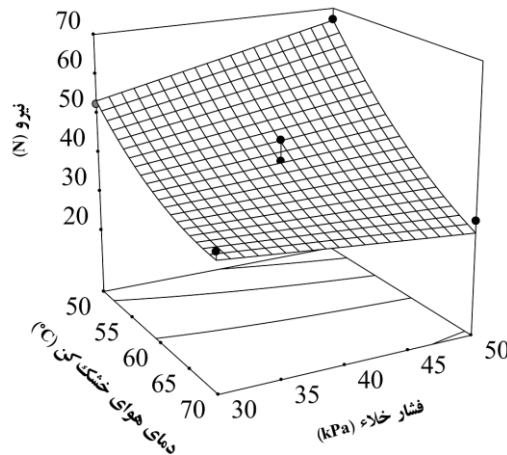
مقاومت به نفوذ

نتایج آزمون پانچری (بارگذاری شبه استاتیک) قرص فشرده گوجه‌فرنگی نشان داد که در منحنی نیرو- تغییر شکل این محصول می‌توان بخش خطی و نقطه شکست را از هم تشخیص داد. شکل ۵ نمودار تغییرات نیرو- تغییر شکل مربوط به قرص فشرده شده متشکل از پودر گوجه‌فرنگی با محتوای رطوبتی ۲۳٪ d.b. تحت بارگذاری شبه استاتیک خشک‌شده در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ °C در فشار ثابت ۴۰ kPa را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار نیرو- تغییر شکل قرص فشرده شده متشکل از پودر گوجه‌فرنگی تحت بارگذاری شبه استاتیک خشک‌شده در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ °C در فشار ثابت ۴۰ kPa

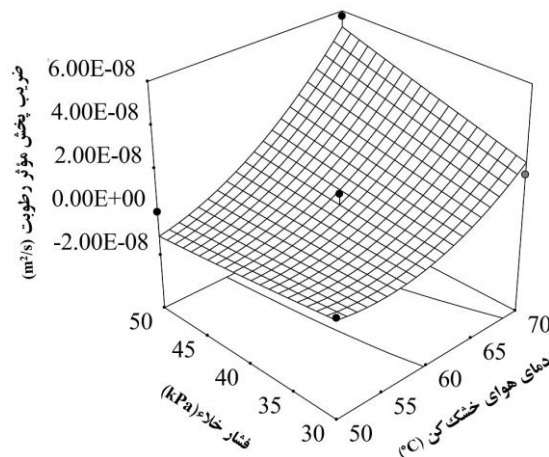
بیشترین مقدار نیروی مقاوم به نفوذ برابر با ۸۷/۲۸ N برای قرص‌های خشک‌شده در دمای ۴۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa به دست آمد و هم‌چنین کمترین مقدار نیروی نفوذ برابر با ۲۷/۹۴ N برای قرص‌های خشک‌شده در دمای ۸۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa به دست آمد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که تمامی اثرات خطی، متقابل و درجه دوم متغیرهای مستقل دمای خشک‌کن و فشار خلأ به جزء اثر درجه دوم فشار خلأ بر نیروی نفوذ قرص‌های فشرده گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند. شکل ۶ اثر متقابل دمای هوای ورودی و فشار خلأ به خشک‌کن بر نیروی نفوذ قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. از نتایج این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش دمای خشک‌کن کردن مقدار نیروی مقاوم به نفوذ کاهش یافت. دلیل این امر را می‌توان افزایش تنش‌های حرارتی و رطوبتی واردشده به نمونه به دلیل افزایش دما و محتوای رطوبتی دانست، زیرا این تنش‌ها سبب ایجاد ترک‌های ریز در بافت محصول شده و منجر به کاهش استحکام و انسجام بافت سلولی و انرژی مورد نیاز برای محصول می‌گردند [۱۴].



شکل ۶- اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک کن و فشار خلأ بر نیروی نفوذ قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی در محدوده‌ی $9/17 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (فشار ۹ kPa و دمای ۴۰ °C) تا $9/6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (فشار ۴۰ kPa و دمای ۸۰ °C) متغیر بود. با توجه به نتایج جدول ۳، تمامی اثرات خطی، متقابل و درجه دوم متغیرهای مستقل دمای خشک کن و فشار خلأ بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت قرص گوجه‌فرنگی معنی‌دار بودند. شکل ۷ اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک کن و فشار خلأ بر ضریب پخش مؤثر رطوبت قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این شکل مشاهده می‌گردد هر دو عامل دمای خشک کردن و فشار خلأ بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت اثر مستقیم داشتند، به طوری که با افزایش هم‌زمان فشار خلأ و دمای خشک کردن مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش یافت. افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت با افزایش دمای هوای خشک کردن را می‌توان به دلیل افزایش سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک کردن نمونه‌ها دانست که منجر به انتشار سریع‌تر رطوبت درون محصول می‌شود [۱۰].

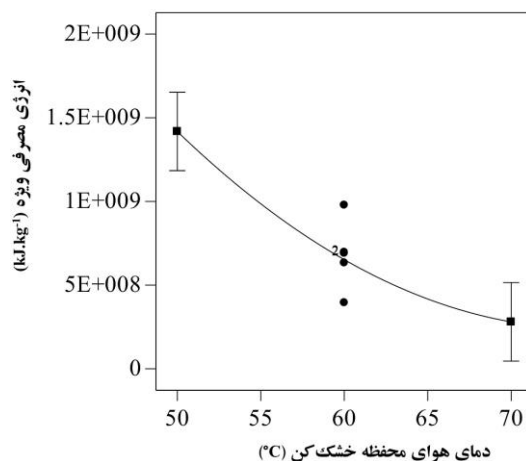


شکل ۷- اثر متقابل دمای هوای ورودی به خشک کن و فشار خلأ بر ضریب پخش مؤثر رطوبت قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی

انرژی ویژه مصرفی خشک کردن

بیشترین انرژی ویژه مصرفی ($2/89 \times 10^9 \text{ kJ.kg}^{-1}$) در دمای ۴۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa و کمترین مقدار انرژی مصرفی ($5/08 \times 10^7 \text{ kJ.kg}^{-1}$) در محدوده دمای ۸۰ °C و فشار خلأ ۴۰ kPa به دست آمد. با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده شد که تنها اثر

خطی متغیر دمای هوا و همچنین عبارت درجه دوم دما بر انرژی مصرفی ویژه خشک کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی معنی‌دار بود. شکل ۸ اثر خطی دمای هوای ورودی به خشک‌کن بر انرژی ویژه مصرفی خشک کردن قرص‌های فشرده شده گوجه‌فرنگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دمای هوا، مقدار انرژی ویژه مصرفی خشک کردن کاهش یافت. نتایج حاصل از داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در فشار ثابت با افزایش دما، به دلیل این که زمان خشک شدن به شدت کاهش یافت، مقدار انرژی ویژه مصرفی حرارتی نیز 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. متولی و همکاران [۵] در خشک کردن میوه و سبزی‌ها به روش ترکیبی خلأ- مادون‌قرمز به این نتیجه رسیدند که خشک‌کن خلأی- مادون‌قرمز مزایای هر دو روش خشک کردن مادون‌قرمز و خلأ را دارد و می‌تواند نسبت انرژی مصرفی را کاهش و کیفیت خشک شدن محصول را افزایش دهد.



شکل ۸- اثر دمای هوای محفظه خشک‌کن بر انرژی ویژه مصرفی قرص‌های فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی با خشک‌کن خلأی- مادون‌قرمز

شرایط بهینه خشک کردن قرص فشرده تولید شده از پودر گوجه‌فرنگی

به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای پاسخ از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. کمترین و بیشترین مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها و ضریب اهمیت آن‌ها برای متغیرهای پاسخ مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده‌اند. با استفاده از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت، ۱۱ نقطه بهینه با شاخص مطلوبیت ۰/۸۳۵ برای انجام فرآیند خشک کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی تعیین شده که در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از جدول ۵ نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین حالت برای قرص‌های فشرده گوجه‌فرنگی در شرایط خشک کردن خلأی- مادون‌قرمز در دمای ۵۰ °C و فشار خلأ ۵۰ kPa خشک شده بودند به دست آمد. تحت این شرایط شاخص مطلوبیت ۰/۸۳۵ به دست آمد و مقدار بهینه متغیرهای مستقل شامل ضریب انتشار مؤثر رطوبت، چروکیدگی، انرژی ویژه مصرفی خشک کردن، نیروی نفوذ و چگالی واحد به ترتیب برابر با $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ، $1.7/78 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ، $1.0 \times 10^9 \text{ g.cm}^{-1}$ و $66/8 \text{ N}$ به دست آمدند. نتایج نشان داد که خشک کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر و فشار خلأ بالاتر) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.



جدول ۴- محدوده متغیرهای پاسخ و ضریب اهمیت آن‌ها جهت بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن قرص گوجه‌فرنگی به روش سطح پاسخ

ضریب اهمیت	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	هدف	متغیرهای پاسخ
۵	$9/6 \times 10^{-8}$	$9/17 \times 10^{-11}$	بیشینه	ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)
۳	۱۹/۹۲	۷/۵۵	کمینه	چروکیدگی (%)
۱	$2/89 \times 10^9$	$5/08 \times 10^7$	کمینه	انرژی ویژه مصرفی خشک کردن ($kJ.kg^{-1}$)
۵	۸۷/۲۸	۲۷/۹۴	بیشینه	نیروی نفوذ (N)
۳	۲/۱۰	۰/۷۹	بیشینه	چگالی واحد ($g.cm^{-1}$)

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های خشک کردن قرص فشرده گوجه‌فرنگی با خشک کن خلائی - مادون قرمز نتایج زیر از این پژوهش قابل استنتاج هستند: ۱- اثر دمای هوا بر همه متغیرهای پاسخ قرص فشرده گوجه‌فرنگی در خشک کن خلائی - مادون قرمز معنی‌دار بودند. ۲- افزایش دما سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و چروکیدگی محصول نهایی گردید. ۳- دمای هوای ورودی به خشک کن بر مقاومت به نفوذ، چگالی واحد و انرژی ویژه مصرفی فرآیند خشک کردن اثر منفی داشت. ۴- خشک کردن تحت شرایط ملایم‌تر (دمای پایین‌تر و فشار خلأ بالاتر) سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.

جدول ۵- مقادیر پیشنهادی شده متغیرهای وابسته و مستقل به روش سطح پاسخ در شرایط بهینه فرآیند خشک کردن قورص فشرده گو جهنوزگی به روش سطح پاسخ

شماره	دما (°C)	فشار خلا kPa	ضرب انتشار مؤثر رطوبت (m/s)	چرخیدگی (%)	انرژی ویژه مصرفی خشک کردن (kJ.kg ⁻¹)	نیروی نفوذ (N)	چگالی واحد (g.cm ⁻¹)	شاخص مطابقت
۱	۵۰	۵۰	۱/۹×۱۰ ^{-۸}	۷/۸۱۳	۱/۵۷×۱۰ ^{-۹}	۶۶/۸۰۸	۲/۰۲۲	۰/۸۳۵
۲	۵۰	۵۰	۱/۸×۱۰ ^{-۸}	۷/۸۱۳	۱/۵۶×۱۰ ^{-۹}	۶۶/۴۵۱	۲/۰۱۸	۰/۸۳۳
۳	۵۶/۹	۴۹/۶۲۷	۱/۰۷×۱۰ ^{-۸}	۷/۸۲۹	۱/۵۷×۱۰ ^{-۹}	۶۶/۵۵۶	۲/۰۱۹	۰/۸۳۳
۴	۵۰/۲۱	۵۰	۱/۰۷×۱۰ ^{-۸}	۷/۸۳۳	۱/۵۵×۱۰ ^{-۹}	۶۶/۲۲۲	۲/۰۱۶	۰/۸۳۲
۵	۵۰/۴۶	۵۰	۱/۰۴×۱۰ ^{-۸}	۷/۸۰۹	۱/۵۲×۱۰ ^{-۹}	۶۵/۵۵۳	۲/۰۰۹	۰/۸۲۹
۶	۵۰	۴۸/۵	۱/۰۳×۱۰ ^{-۸}	۷/۹۶	۱/۵۵×۱۰ ^{-۹}	۶۵/۸۹۶	۲/۰۱۲	۰/۸۲۷
۷	۵۰/۶۹	۵۰	۱/۰۲×۱۰ ^{-۸}	۷/۹۴۳	۱/۴۹×۱۰ ^{-۹}	۶۴/۹۵۲	۱/۰۰۲	۰/۸۲۶
۸	۵۰/۹۴	۵۰	۹/۹۱×۱۰ ^{-۹}	۸/۰۰۳	۱/۳۷×۱۰ ^{-۹}	۶۴/۷۸۶	۱/۹۹۵	۰/۸۲۲
۹	۵۰	۳۴/۱۹	۳/۲۳×۱۰ ^{-۸}	۸/۹۳۱	۱/۲۹×۱۰ ^{-۹}	۵۶/۲۲۱	۱/۹۰۴	۰/۷۳۶
۱۰	۵۰	۳۲/۱۲۶	۲/۰۷×۱۰ ^{-۹}	۸/۹۶۵	۱/۲۴×۱۰ ^{-۹}	۵۶/۸۵۲	۱/۸۸۶	۰/۷۵۴
۱۱	۵۰	۳۱/۴۰۸	۱/۶۶×۱۰ ^{-۹}	۸/۹۷۱	۱/۲۳×۱۰ ^{-۹}	۵۶/۳۷۶	۱/۸۸۹	۰/۷۵۱



منابع

۱. احمدی قویدلان، م. امیری چایجان، ر. (۱۳۹۶). استفاده از روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی خشک‌کردن فندق در بسترسیال مادون‌قرمز. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۶(۴): ۶۳۹-۶۵۷.
۲. خیاطی، س. امیری چایجان، ر. (۱۳۹۵). پیش‌بینی برخی خصوصیات حرارتی، فیزیکی و مکانیکی میوه بنه پس از خشک‌کردن با خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۳(۵۲): ۱۶۱-۱۷۲.
۳. زرین‌نژاد، م. امیری چایجان، ر. (۱۳۹۵). تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک‌کردن پسته در خشک‌کن مایکروویو بستر سیال. مجله علوم و صنایع غذایی، ۱۳(۵۷): ۱۳-۲۴.
۴. صفری، م. امیری چایجان، ر. علائی، ب. (۱۳۹۶). مدل‌سازی برخی خواص حرارتی و فیزیکی مغز بادام در خشک‌کن خلائنی مادون‌قرمز با پیش‌تیمار میکروویو. مهندسی زراعی، ۳۹(۱): ۲۱-۳۷.
۵. متولی، علی. مینایی، سعید. همتیان، رسول. عباس، سلیمان. قادری، عبدالرحمن و نجفی، غلامحسین. (۱۳۹۲). " بررسی تغییرات آهنگ تبخیر، ضریب انتشار رطوبت مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی خشک‌کردن برش‌های نازک قارچ در خشک‌کن مایکروویو - خلا". فصلنامه مجله علوم و صنایع غذایی، شماره ۴۱، دوره ۱۰، صفحه‌های ۱۶۸-۱۶۱.
۶. ندیم، ز. احمدی، ا. (۱۳۹۵). بررسی برخی خواص رئولوژیکی توت‌فرنگی پوشش دهی شده با متیل سلولز. ماشین‌های کشاورزی، ۱۶(۱): ۱۵۳-۱۶۲.
7. Adiba, B. D., Salem, B., Nabil, S., & Abdelhakim, M. (2011). Preliminary characterization of food tablets from date (*Phoenix dactylifera* L.) and spirulina (*Spirulina* sp.) powders. *Powder Technology*, 208(3), 725-730 .
8. And, G. L., & Barrett, D. M. (2006). Influence of Pre-drying Treatments on Quality and Safety of Sun-dried Tomatoes. Part I: Use of Steam Blanching, Boiling Brine Blanching, and Dips in Salt or Sodium Metabisulfite. *Journal of Food Science*, 71(1), S24-S31 .
9. Aziz, M., Yusof, Y., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., & Scheiling, G. (2018). Material Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*, 1-15 .
10. Chayjan, R. A., Ghasemi, A., & Sadeghi, M. (2018). Stress fissuring and process duration during rough rice convective drying affected by continuous and stepwise changes in air temperature. *Drying Technology*, 1-10 .
11. Chen, Q., Bi, J., Wu, X., Yi, J., Zhou, L., & Zhou, Y. (2015). Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus 15ujube* Miller) slices dried by hot-air and short-and medium-wave infrared radiation. *LWT-Food Science and Technology*, 64(2), 759-766
12. FAO, 2017. FAOSTAT: Data-crops. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
13. Ghasemi, A., & 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*, 1-19 .
14. Ghasemi, A., Chayjan, R. A., & Najafabadi, H. J. (2018). Optimization of granular waste production based on mechanical properties. *Waste Management*.
15. Liu, F., Cao, X., Wang, H., & Liao, X. (2010). Changes of tomato powder qualities during storage. *Powder Technology*, 204(1), 159-166 .
16. Marfil, P., Santos, E., & Telis, V. (2008). Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 41(9), 1642-1647 .



17. Martí, R., Leiva-Brondo, M., Lahoz, I., Campillo, C., Cebolla-Cornejo, J., & Roselló, S. (2018). Polyphenol and l-ascorbic acid content in tomato as influenced by high lycopene genotypes and organic farming at different environments. *Food chemistry*, 239, 148-156 .
18. Ong, M ., Yusof, Y., Aziz, M., Chin, N., & Amin, N. M. (2014). Characterisation of fast dispersible fruit tablets made from green and ripe mango fruit powders. *Journal of Food Engineering*, 125, 17-23 .
19. Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), 599-618 .
20. Purkayastha, M. D., Nath, A., Deka, B. C., & Mahanta, C. L. (2013). Thin layer drying of tomato slices. *Journal of food science and technology*, 50(4), 642-653.
21. Shamsudin, I., Anuar, M., & Tahir, S. (2012). Compaction of sweet potato (*Ipomoea Batatas L.*) and stevia *rebaudiana* food powders. *Particulate Science and Technology*, 30(2), 136-144 .
22. Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683-707 .
23. Wongsiriamnuay, T., & Tippayawong, N. (2015). Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering*, 139, 111-120.
24. Yusof, Y., Mohd Salleh, F., Chin, N., & Talib, R. (2012). The drying and tableting of pitaya powder. *Journal of Food Process Engineering*, 35(5), 763-771.
25. Zea, L. P., Yusof, Y. A., Aziz, M. G., Ling, C. N., & Amin, N. A. M. (2013). Compressibility and dissolution characteristics of mixed fruit tablets made from guava and pitaya fruit powders. *Powder technology*, 247, 112-119.



Simultaneous Optimization of Physical, Mechanical and Thermal Properties in the Vacuum-Infrared Tomato Tablet Production Process

M Rashidi¹, R Amiri Chayjan^{2*}, A ghasemi³

¹MSc Graduated, Department of Biosystems Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

²Associate Prof., Department of Biosystems Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

³PhD Graduated, Department of Biosystems Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

Abstract

In this study, the effect of variables affecting vacuum-infrared drying process including air temperature and vacuum pressure on physical Properties (shrinkage and unit density), mechanical (penetration resistance) and thermal (effective moisture diffusion coefficient and specific energy consumption of drying) Compressed tablets made from tomato powder were studied. Drying process of samples in five levels of temperature of the 40, 50, 60, 70 and 80 °C and five vacuum pressures 20, 30, 40, 50 and 60 kPa done. Statistical analysis of data and optimization of drying process were performed using response surface methodology. The results showed that vacuum-infrared drying reduced drying time and specific energy consumption. Increasing the air drying temperature increased the effective diffusion coefficient of moisture and shrinkage as well as decreasing the specific energy consumption of drying, penetration resistance and unit density. The optimum point of drying process of compact tablet tomato was obtained at 50 ° C and vacuum pressure of 50 kPa. Drying under mild conditions (lower temperature and higher vacuum pressure) increased the desirability index.

Key Words: Optimization, Vacuum dryer, tablet compress Tomato, shrinkage.

*Corresponding author

Email: amirireza@basu.ac.ir