

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات تولید پودر پالپ سیب: مدت زمان خشک‌کردن و شاخص قهوه‌ای‌شدن

مرجان عبدالله‌زاده دلزی^۱ و رضا امیری چایجان^{۲*}

چکیده

تولید پودر از پالپ میوه‌ها روش مناسبی برای جلوگیری از ضایع شدن خواص مفید موجود در گوشت باقیمانده از پوست، آب و هسته میوه‌ها است. خواص فیزیکی و شیمیایی پودر، نقش مهمی در زمان نگهداری، مشتری پسندی و طعم و مزه آن دارد. این فرآیند با استفاده از خشک‌کن خلأی و به روش کنترل آتمسفر انجام شد و از نظر مدت زمان خشک‌شدن و شاخص قهوه‌ای‌شدن بررسی گردید. خشک‌کن در مقیاس آزمایشگاهی برای پنج سطح دمایی ۴۵، ۵۵، ۶۵، ۷۵ و ۸۵ درجه سلسیوس و در پنج سطح فشار خلأ ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ کیلوپاسکال برای ضخامت ۶/۵ میلی‌متر تنظیم شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به دست آمده و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن خلأی با استفاده از روش سطح پاسخ انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دمای محفظه خشک‌کن از ۴۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس، زمان خشک‌شدن ۷۸/۳ درصد کاهش یافت. کمترین میزان شاخص قهوه‌ای‌شدن تحت شرایط دمای محفظه خشک‌کن ۴۵ درجه سلسیوس و فشار خلأ ۶۰ کیلوپاسکال برای خشک‌کن خلأی به روش کنترل جو برابر با ۱۰۰/۲۶ به دست آمد. نقطه بهینه پودر تولیدشده از ورقه‌های خشک‌شده پالپ سیب توسط سامانه خلأی به روش کنترل جو، در دمای محفظه خشک‌کن ۷۵/۱ درجه سلسیوس و فشار خلأ ۵۱/۲ کیلوپاسکال پیشنهاد شد. تحت این شرایط مقدار بهینه متغیرهای پاسخ شامل زمان خشک‌شدن و قهوه‌ای‌شدن به ترتیب برابر ۲۰۵ دقیقه و ۱۳۶/۰۲ به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن خلأی، روش سطح پاسخ، کنترل جو، محتوای رطوبت.

ارجاع: عبدالله‌زاده دلزی م. و امیری چایجان ر. ۱۴۰۲. مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات تولید پودر پالپ سیب: مدت زمان خشک‌کردن و شاخص قهوه‌ای‌شدن. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۸: ۵۵-۶۲. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14106.628>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان.

* نویسنده مسئول: amirireza@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰

مقدمه

شامل کاهش قند و ترکیبات کربونیل با اسیدهای آمینه، پتیدها و پروتئین‌ها است. این واکنش زنجیره‌ای پیچیده، رقابتی و متوالی است و به طور همزمان بسیاری از واسطه‌های واکنش‌پذیر و ترکیبات پیچیده مانند AA، HMF و مشابه آن را تولید می‌کند (Rashidi *et al.*, 2021). قهوه‌ای‌شدن و از دست‌دادن ارزش غذایی میوه‌های تازه حتی در دمای محیط و رطوبت نسبی معمول محتمل است (da Silva, *et al.*, 2020 & Rashidi *et al.*, 2021).

بر اساس آخرین آمار جهانی فائو در سال ۲۰۲۱، در سراسر دنیا حدود ۹۱ میلیون تن سیب تولید شده است. وجود ترکیبات زیست فعال زیاد و قدرت آنتی‌اکسیدانی بالا از مزایای سیب است (Lucay *et al.*, 2020). به دلیل این‌که سیب به‌عنوان یک غذای سالم تلقی می‌شود، تنوع و سطح تولید سیب، روند رو به افزایش داشته است (Mignard *et al.*, 2021). حدود ۷۵ درصد سیب‌ها را می‌توان به آب میوه تبدیل کرد و بقیه آن حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد پایه خشک، گوشت سیب است و عمدتاً برای خوراک دام یا کمپوست استفاده می‌شود (Tian *et al.*, 2015).

پالپ سیب با وجود این‌که ماده‌ای زاید است اما با توجه به روند تولید، رقم سیب و سال برداشت مشخص شده است که دارای ترکیبات بالقوه با خاصیت آنتی‌اکسیدانی، ضد التهاب و ضد باکتری بسیار زیاد است (Antonic *et al.*, 2020). تخمین زده شده است که بعد از فرآیند استخراج در فرآوری سیب، ۸۲ درصد تا ۹۹ درصد پیللی‌فنول‌ها در پالپ سیب باقی می‌ماند. به غیر از فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، پلی‌فنول‌های موجود در پالپ سیب محرک فرآیندهای مهم فیزیولوژیکی از جمله اثرات ضدالتهابی هستند (Cam *et al.*, 2018). سالانه میلیون‌ها تن پالپ و تفالیه سیب تولید می‌شود و این روند رو به افزایش است. پالپ و تفالیه سیب عمدتاً یا مواد زاید را تشکیل می‌دهد و یا به عنوان خوراک دام مصرف می‌شود. دفع پالپ سیب به عنوان خوراک دام به دلیل داشتن پروتئین ضعیف، خوراک با کیفیت بالا برای حیوانات را ارائه نمی‌دهد، همچنین دفع تفالیه سیب به عنوان زباله، مشکل زیست‌محیطی ایجاد می‌کند (Antonic *et al.*, 2020). قهوه‌ای‌شدن پلی‌فنول‌های موجود در پالپ سیب توسط آنزیم‌های پلی‌اکسیداز و گاهی اوقات پراکسیداز

محصولات غذایی تازه برداشت‌شده (مانند میوه و سبزیجات) معمولاً دارای آب زیادی هستند و محدوده رطوبت آن‌ها حدود ۹۰ درصد (بر پایه مرطوب) است (da Silva, *et al.*, 2020 & Lee *et al.*, 2017). آب، شرایط را برای رشد و تولید میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند و منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیر به مواد غذایی می‌شود. بنابراین ضروری است که میزان رطوبت در محصولات غذایی با استفاده از شرایط مناسب کاهش یابد تا شرایط برای رشد میکروب‌ها مهار شود، همچنین باعث می‌شود وزن محصول کاهش یابد، فضای بسته‌بندی کم شده و هزینه حمل و نقل و بسته‌بندی نیز به حداقل برسد (Gaudel *et al.*, 2022).

بهینه‌سازی فرآیند به روش سطح پاسخ برای اولین بار در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد (Liu *et al.*, 2014). روش سطح پاسخ شامل طراحی آزمایش، تعیین سطح پاسخ براساس مدل‌های تجربی، بهینه‌سازی پاسخ با استفاده از مدل تجربی است (Long *et al.*, 2019). روش سطح پاسخ یسنی یکی از بهترین راه‌ها برای نمایش خروجی‌های آزمایش توسط مدل است؛ زیرا به تعداد آزمایش‌های کمتری احتیاج دارد و در نتیجه ارزان‌تر بوده و به زمان کمتری نیاز خواهد داشت (Liu *et al.*, 2014 & Elkelawy *et al.*, 2022).

خشک‌کن‌های خلائی به خاطر اینکه در فشار کمتر از جو عمل می‌کنند، سبب می‌شوند فرآیند خشک‌کردن در دماهای پایین‌تر انجام گیرد. به عنوان منبع حرارتی می‌توان از لامپ‌های مادون قرمز استفاده کرد (Gaudel *et al.*, 2022). خشک‌کن خلائی در شرایط جوکنترل‌شده، یک روش مناسب برای حفظ کیفیت محصول خشک‌شده است (Krishnan *et al.*, 2020). میوه‌های تازه و سبزیجات، حساس به اکسیژن هستند و در طی روند فرآوری، به‌واسطه اکسیدان‌های مختلف مانند اکسیژن و رادیکال‌های آزاد، برخی از یون‌های فلزی و آنزیم‌ها دچار واکنش اکسیداسیون می‌شوند. اما این نوع خشک‌کن‌ها از این واکنش‌ها جلوگیری کرده، رنگ و ترکیبات مغذی را حفظ می‌کنند (Alwazeer and Örs., 2019).

واکنش‌های میلارد^۱ یا قهوه‌ای‌شدن غیرآنزیمی در طی عملیات حرارتی محصولات غذایی انجام می‌شود، که

مواد و روش‌ها

تحقیق فعلی در مورد سیب نارس و واریته گلدن دلشز انجام شد. نمونه‌های تازه از بازار محلی استان همدان، ایران خریداری و در دمای ۶-۴ درجه سلسیوس به منظور رسیدن به دمای تعادل به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شدند. سیب‌های تازه بعد از شست‌وشو، پوست‌گیری و جداکردن هسته، آب‌شان توسط آب‌میوه‌گیری، گرفته شد. پالپ باقیمانده از آب سیب با بریکس $13/3^{\circ}$ (Lee *et al.*, 2017) در بسته‌بندی‌های مخصوص با ضخامت $6/5$ میلی‌متر، بسته‌بندی شده سپس فوراً در فریزر با دمای -21 درجه سلسیوس و تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند.

تعیین رطوبت اولیه

به منظور تعیین رطوبت اولیه نمونه‌های پالپ سیب تازه، سه نمونه 45 گرمی در دستگاه خشک‌کن (ممرت^۱، مدل UNE 500، ساخت آلمان)، در دمای 70 درجه سلسیوس به مدت حدود 24 ساعت تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند (Liu *et al.*, 2019). نمونه‌ها پس از رسیدن به وزن ثابت با استفاده از ترازوی دیجیتال با قدرت تشخیص 0.01 گرم توزین شدند و سپس محتوای رطوبت اولیه آنها توسط معادله (۱) محاسبه گردید. محتوای رطوبت اولیه برابر با $3/823$ گرم آب بر گرم ماده خشک (محتوای رطوبتی بر پایه تر برابر با $0/793$ گرم آب بر گرم ماده تر) (AOAC., 2002) به دست آمد.

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

که در آن: $MC_{d.b}$ رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک، M_i وزن اولیه و M_f وزن نهایی نمونه بر حسب گرم هستند.

فرآیند خشک‌کردن

به منظور خشک‌کردن، ورقه‌های پالپ سیب از فریز خارج و به منظور ذوب‌شدن یخ، نیم ساعت در هوای آزاد رها شدند. سپس ورقه‌های پالپ سیب تازه روی تورهای از قبل آماده شده قرار گرفته و نمونه‌ها در خشک‌کن خلائی به روش کنترل جو در پنج سطح دمای محفظه 45 ، 55 ، 65 ، 75 ، 85 درجه سلسیوس و پنج سطح فشار خلاء 40 ، 50 ، 60 ، 70 و 80 کیلوپاسکال انجام شد. خشک‌کن

صورت می‌گیرد که می‌تواند محتوای مواد مغذی و کیفیت محصولات جانبی را تغییر داده و طعم و مزه آن را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین برای جلوگیری از سرعت این تخریب‌ها لازم است بلافاصله بعد از تولید پالپ سیب، عمل خشک‌کردن انجام گیرد.

طی فرآیند تولید پودر، عوامل متعددی بر خصوصیات فیزیکی و غذایی آن اثرگذار هستند. شرایط فرآوری (دمای خشک‌کردن، زمان خشک‌کردن و فرآیند پودرکردن) بر خصوصیات کیفی پودر شامل ظرفیت آنتی‌اکسیدان، ترکیبات فنلی و عامل‌های رنگ اثرگذارند. انتقال، نگهداری و استفاده از ذرات جامد تولیدی در صنایع مختلف شیمیایی، غذایی و به‌ویژه در صنعت داروسازی که نزدیک به 80% محصولات به فرم ذرات جامد و پودری شکل یه‌هستند، دارای اهمیت است (Polat *et al.*, 2019 & da Silva *et al.*, 2020).

گوشت سیب حاوی حجم زیاد آب است، مشکل ذخیره‌سازی دارد و دچار پوسیدگی می‌شود. برای جلوگیری از رشد فعالیت میکروارگانیسم‌ها و پوسیدگی گوشت سیب باید سریع اقدام و از آن، کالاهای با ارزش تولید شود تا حجم زباله‌ها کاهش یابد (Zlatanović *et al.* 2019; Tian *et al.*, 2015). رفتار حرارتی و سینتیک تخریب پودرهای گوشت سیب را بررسی کردند و متوجه شدند که نمونه‌های ارگانیک از پایداری حرارتی بالاتری برخوردار هستند. با توجه به مطالب ارائه‌شده در رابطه با مزایای سیب، مقدار زیاد پالپ آن، فسادپذیری بالا، ایجاد مشکل در حین نگهداری، حمل و نقل و آلودگی‌های محیط زیست به دلیل حجم زیاد زباله‌های حاصل، فرآوری پالپ سیب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که یکی از این روش‌های فرآوری، تولید پودر پالپ از طریق ورقه‌های پالپ خشک‌شده بوسیله دستگاه‌های نو است. بنابراین تولید پودر، در صورتی که عطر، طعم و مواد مؤثر در معرض کمترین تخریب قرار گیرند، ضرورت دارد.

هدف اصلی این مطالعه بررسی محاسبه نقطه بهینه عملکرد خشک‌کن خلائی به روش کنترل جو با در نظر گرفتن شاخص‌های کیفی و فیزیکی به ترتیب مانند شاخص قهوه‌ای شدن و مدت زمان خشک‌کردن است.

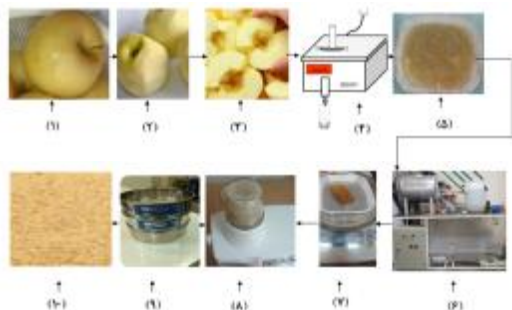
کالیبره شده بود از پالپ سیب تازه و پودر ورقه‌های خشک‌شده پالپ سیب تهیه شد و شاخص رنگ نمونه‌های تازه و پودر ورقه‌های پالپ سیب از روی تصاویر رنگی گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار Matlab 2017 تعیین شد. شاخص‌های رنگی به دست آمده از روش پردازش تصویر، برای محاسبه شاخص قهوه‌ای‌شدن به کار برده شد (Gaudel et al., 2022) و با قرار دادن مقادیر a^* و b^* و L^* در معادله (۳) شاخص قهوه‌ای‌شدن در معادله (۲) محاسبه شد (Cam et al., 2018).

$$BI = \frac{100(x - 0.31)}{0.172} \quad (2)$$

جایی که X برابر است با

$$x = \frac{(a^* + (0.75)L^*)}{(5.64L^* + a^* - 3.012L^*)} \quad (3)$$

مؤلفه L^* طیف سفید تا مشکی با محدوده ۰-۱۰۰، a^* طیف سبز تا قرمز با محدوده ۱۲۰- تا ۱۲۰+ را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مراحل پودر سازی از پالپ سیب

۱- شستوشو، ۲- پوست‌گیری، ۳- هسته‌گیری، ۴- آب‌گیری، ۵- پالپ سیب، ۶- خشک‌کردن ورقه‌های پالپ، ۷- اندازه‌گیری جرم ورقه‌های خشک‌شده، ۸- آسیاب‌کردن، ۹- الک‌کردن با مش (۵۰ میلی‌متر)، ۱۰- پودر

تحلیل آماری و بهینه‌سازی فرآیند

در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند تولید پودر از ورقه‌های خشک‌شده پالپ سیب، از روش سطح پاسخ استفاده شد. آزمایش‌ها در قالب طرح مرکب مرکزی در نرم‌افزار Design Expert 11 تعریف شدند. برای مدل‌سازی رفتار سامانه‌های عاملی درجه دوم و بررسی اثرهای متقابل از معادله و مدل (۴) استفاده شد (Nanvakenari et al. 2022).

خلائی به روش کنترل جو از یک حسگر دما و رطوبت اصلی، لامپ مادون قرمز، مخزن خشک‌کن، شیر برقی تزریق گاز نیتروژن، حسگر فشار، چگالنده و مخزن آب و یخ، شیر برقی تخلیه گاز مخزن، پمپ خلاء، حسگر اکسیژن، حسگر دما و رطوبت به همراه تله آبگیر، کپسول نیتروژن، تابلو برق و مدار فرمان تشکیل شد. برای روش کنترل جو، ابتدا فشار سامانه تا ۲۵ کیلوپاسکال پایین آورده شد و برای رسیدن فشار خلاء داخل محفظه خشک‌کن به فشار خلاء آزمایش، گاز نیتروژن (به طور تقریبی از ۱۵ تا ۵۵ کیلوپاسکال) تزریق شد. دمای محیط در طول آزمایش ۲۶ درجه سلسیوس و رطوبت محیط بین ۳۶ تا ۴۰ درصد بود. با توجه به این‌که رطوبت نهایی محصول در حین خشک‌کردن باید به کمتر از ۱۰ d.b. می‌رسید، به صورت متناوب مطابق با زمان‌های از قبل تعیین شده، درب مخزن باز شده و جرم محصول با ترازوی دیجیتال آزمایشگاه با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد (مدت زمان اندازه‌گیری جرم محصول کمتر از ۱۵ ثانیه بود) و بلافاصله محصول در مخزن گذاشته شد. سپس عدد گزارش شده با ترازو وارد جدول Excel, 2019 شده و نمودار سنتیک خشک‌کردن رسم شد. در صورتی‌که رطوبت محصول به سطح رطوبت تعیین شده می‌رسید، آزمایش متوقف می‌شد.

تهیه پودر

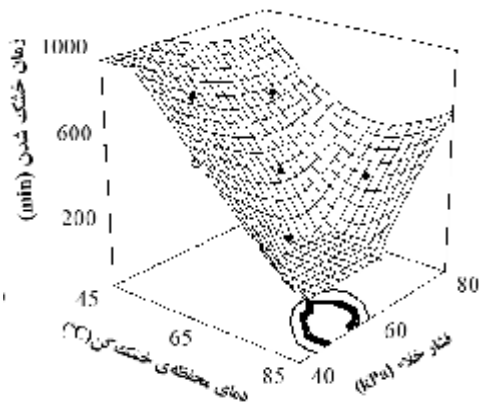
پس از اتمام فرآیند خشک‌کردن، ورقه‌های خشک‌شده در داخل دستگاه آسیاب (Panasonic مدل MJ-M176P، ساخت مالزی) ریخته و به مدت یک دقیقه آسیاب و خرد شدند. پس از پایان فرآیند آسیاب‌کردن، به‌منظور همگن‌سازی اندازه ذرات، پودر پالپ سیب حاصلی توسط الک (آزمون، ساخت ایران) با مش ۵۰ (اندازه ذرات کمتر از ۰/۵ میلی‌متر) الک و ذرات باقی‌مانده بر روی الک، مجدداً آسیاب شدند. در نهایت پودر پالپ سیب (شکل ۱) داخل محفظه‌های مخصوص جمع‌آوری و برای انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند. همچنین پس از هر بار استفاده از دستگاه آسیاب و الک، آن‌ها برای نمونه بعدی به خوبی تمیز می‌شدند.

اندازه‌گیری شاخص قهوه‌ای‌شدن

برای اندازه‌گیری تغییرات رنگ، تصاویر رنگی به وسیله یک دستگاه اسکنر (HP G4050 ساخت کشور چین) که

(2022). *et al.* در رابطه با بهینه‌سازی چند منظوره شرایط خشک کردن بستر هیبریدی میکروویو برنج با روش سطح پاسخ، به نتایج مشابهی رسیدند.

شکل ۲، اثرات متقابل دمای محفظه خشک‌کن و فشار خلاء را بر زمان خشک‌کردن ورقه‌های پالپ سیب با سامانه خلای به روش کنترل جو نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این شکل، با افزایش دمای محفظه خشک‌کن از ۴۵ به ۸۵ درجه سلسیوس و افزایش فشار خلاء (به‌ویژه در محدوده ۶۰ تا ۸۰ کیلوپاسکال) مدت زمان خشک‌کردن ۷۸/۳۱ درصد کاهش یافت. این نتایج می‌تواند به دلیل تغییر در ضخامت لایه مرزی انتشار، تفاوت در مقادیر فشار، تغییر در سرعت‌ها و همچنین به دلیل برخی عوامل داخلی محصول باشد (Krishnan *et al.*, 2020). با افزایش سطح خلاء (۸۰ کیلوپاسکال) یا کاهش فشار مطلق در اطراف ماده خشک‌کن، نقطه جوش آب درون ماده کاهش می‌یابد. این امر باعث افزایش سرعت تبخیر شد و در نتیجه زمان خشک‌شدن را کاهش داد. Tian *et al.* (2015) دریافتند که زمان خشک شدن سیب زمینی با افزایش سطح خلاء کاهش می‌یابد (Tian *et al.*, 2015). در نتیجه، خشک‌کردن برش‌های سیب با استفاده از حالت میکروویو پیوسته با فشار خلاء بالاتر باعث کم‌آبی مؤثر و حذف سریع رطوبت می‌شود. (Polat *et al.*, 2019). رابطه با خشک‌کردن میکروویو خلای برش‌های سیب نیز به نتایج مشابه رسیدند و دریافتند که با افزایش فشار خلاء، زمان خشک‌شدن کاهش می‌یابد (Polat *et al.*, 2019).



شکل ۲- اثر متقابل دمای محفظه خشک‌کن و فشار خلاء بر زمان خشک‌کردن ورقه‌های پالپ سیب با سامانه خلای به کنترل جو

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_j^2 \quad (4)$$

که در این معادله، y متغیر پاسخ، X_j مقدار مستقل، X_i مقدار واقعی هر عامل، k تعداد متغیرها، β_j ضرایب متغیرها و β_{ij} ضرایب اثرهای متقابل متغیرها است.

نتایج و بحث

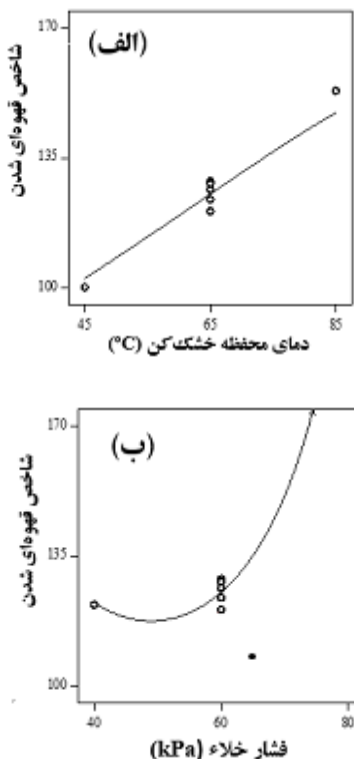
ضرایب معادله رگرسیون حاصل از طرح مرکب مرکزی روش سطح پاسخ و اطلاعات آماری به‌دست‌آمده برای متغیرهای پاسخ مورد بررسی شامل زمان خشک‌شدن و شاخص قهوه‌ای شدن برای دامنه‌های خشک‌کردن خلای به روش کنترل جو در جدول ۱ ارائه شده است. ضرایب مثبت این معادله نشان می‌دهند که در آن متغیر مستقل بر مقدار متغیر پاسخ (اگر می‌خواهیم بیشینه باشد) اثر مستقیم یا مثبت دارد و ضرایب منفی متغیر مستقل نشان‌دهنده اثر منفی یا معکوس آن متغیر بر متغیر پاسخ است.

زمان خشک‌کردن

مدت زمان خشک‌کردن ورقه‌های پالپ سیب تازه با سامانه خلای به روش کنترل جو به ترتیب در محدوده ۹۴۵ دقیقه (دمای محفظه خشک‌کن ۴۵ درجه سلسیوس، فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال) تا ۲۰۵ دقیقه (دمای محفظه خشک‌کن ۸۵ درجه سلسیوس، فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال) متغیر بود. با توجه به نتایج حاصل از مدل برازش‌شده بر داده‌های آزمایش (جدول ۱)، مشاهده شد که اثر خطی دمای هوای محفظه خشک‌کن و اثر متقابل دمای هوای محفظه خشک‌کن و فشار خلاء و همچنین عبارت درجه دوم دمای هوای محفظه خشک‌کن و فشار خلاء بر مدت زمان خشک‌کردن ورقه‌های پالپ سیب تازه با سامانه خلای به روش کنترل جو معنی‌دار بودند. مقادیر ضریب تعیین (R^2)، عامل عدم برازش و ضریب تغییرات برای زمان خشک‌شدن به ترتیب برابر با ۰/۹۵۵، ۰/۲۷ و ۲۰/۴۷ به دست آمدند که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ برای مدت زمان خشک‌کردن ورقه‌های پالپ سیب توسط سامانه خلای به روش کنترل جو هستند. Nanvakenari

شاخص قهوه ای شدن

بیشترین مقدار قهوه ای شدن پودر برای خشک کن خلائی به روش کنترل جو ۱۵۴/۹۶ (در شرایط خشک کردن دمای محفظه ۷۵ درجه سلسیوس و فشار خلاء ۷۰ پاسکال) به دست آمد. کمترین میزان شاخص قهوه ای شدن نیز تحت شرایط دمای محفظه خشک کن ۴۵ درجه سلسیوس و فشار خلاء ۶۰ کیلوپاسکال برای خشک کن خلائی به روش نرمال کنترل جو به ۱۰۰/۲۶ به دست آمد. شکل ۳-الف و ۳-ب، به ترتیب اثر خطی دمای محفظه و فشار خلاء بر شاخص قهوه ای شدن پودر در روش کنترل جو را نشان می دهد. همان طور که از نتایج قابل مشاهده است با افزایش دما و فشار خلاء، شاخص قهوه ای شدن پودر ورقه های خشک شدیه پالپ سیب افزایش می یابد؛ بنابراین افزایش شاخص رنگ قهوه ای شدن برای پودر ورقه های خشک شدیه پالپ سیب دلیلی بر تخریب اسید کلروژنیک است (Zlatanović et al., 2019).



شکل ۳- اثر خطی دمای محفظه خشک کن و فشار خلاء بر شاخص قهوه ای شدن به روش کنترل جو

بهینه سازی

به منظور بهینه سازی همزمان متغیرهای پاسخ از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. نتایج به دست آمده از جدول ۲ نشان می دهد که مطلوب ترین حالت برای پودر ورقه های خشک شدیه پالپ سیب به روش کنترل جو در شرایط دمای محفظه خشک کن ۷۵/۱ درجه سلسیوس و فشار خلاء ۵۱/۲ کیلوپاسکال به دست آمد. مقدار بهینه متغیرهای پاسخ شامل زمان خشک شدن و شاخص قهوه ای شدن به ترتیب برابر با ۲۰۵ دقیقه و ۱۳۶/۰۲ با شاخص مطلوبیت ۰/۸۴۸۲ به دست آمدند. نتایج نشان داد که خشک کردن تحت شرایط دمای زیاد و فشار خلاء متوسط سبب افزایش شاخص مطلوبیت گردید.

نتیجه گیری

اثر متغیرهای مستقل برای روش کنترل جو دستگاه خشک کن خلائی بر خواص پودر تولیدی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شدند و شرایط بهینه برای فرآیند خشک کردن تعیین شد. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش های خشک کردن اولیه و

جدول ۱- ضرایب مدل برازش شده به معادله رگرسیونی درجه دوم برای متغیرهای پاسخ پودر ورقه های خشک شده پالپ سیب با سامانه خلائی به روش کنترل آتمسفر (X₁: دمای محفظه خشک کن فشار)

منابع تغییرات	ضرایب مدل	زمان خشک شدن (دقیقه)	شاخص قهوه ای شدن
عرض از مبدأ (b ₀)		۱/۱۷×۱۰ ^۶	۰/۱۲
عبارت خطی (b ₁) X ₁		۱/۸۳×۱۰ ^۶	^a -۰/۰۰۱
(b ₂) X ₂		^{ns} -۲/۳۱×۱۰ ^۵	^b -۰/۰۰۱
اثر متقابل (b ₁₂) X ₁ X ₂		^c ۵/۶۳×۱۰ ^۵	^{ns} ۲/۲×۱۰ ^{-۳}
عبارت درجه دوم (b ₁₁) X ₁ ²		^a ۷/۱۶×۱۰ ^۵	^{ns} ۲/۲×۱۰ ^{-۳}
(b ₂₂) X ₂ ²		^b ۴/۷۸×۱۰ ^۵	^a -۰/۰۰۰۶
Lack of Fit (P-value)		^{ns} ۰/۲۷۱۶	^{ns} ۰/۱۷
Model (P-value)		^a <۰/۰۰۰۱	^a <۰/۰۰۰۱
R ²		۰/۹۷۴۰	۰/۹۷۰۰
Adj. R ²		۰/۹۵۵۰	۰/۹۶۰۰
Predicted. R ²		۰/۸۷۷	۰/۸۱۰۰
Adeq. Precision		۲۳/۶۸۹	۲۷/۱۲
C.V. (%)		۲۰/۴۷۴	۳/۴۵
Std. Dev.		۴۶/۵۹×۱۰ ^{-۲}	۰/۰۰۰۴

^a بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪، ^b اختلاف معنی دار در ۱٪، ^c اختلاف معنی دار در ۵٪ و ^{ns} عدم اختلاف معنی دار هستند.

۳- با افزایش دما و فشار خلاء، شاخص قهوه‌ای شدن پودر ورقه‌های خشک‌شده پالپ سیب افزایش می‌یابد.

۴- در محیط خلاء با وجود نیتروژن در فضای محفظه به جای اکسیژن در روش کنترل آتمسفر از گرم‌شدن بیش از حد نمونه‌ها جلوگیری و بنابراین تغییرات رنگ کمتری مشاهده شد. همچنین خشک‌کردن برش سیب در دمای محفظه ۷۵ درجه سلسیوس پیشنهاد گردید.

پودرسازی، جهت مصرف انسانی موارد زیر قابل استنتاج است:

- ۱- نتایج نشان داد که با افزایش دمای محفظه خشک‌کن از ۴۵ به ۸۵ °C، مدت زمان خشک‌کردن ورقه‌های پالپ سیب ۷۴۰ دقیقه، کاهش یافت.
- ۲- با افزایش فشار خلاء (به‌ویژه در محدوده ۶۰ تا ۸۰ kPa) مدت زمان خشک‌کردن، ۷۸/۳۱ درصد کاهش یافت.

جدول ۲- معرفی حالت بهینه در نرم‌افزار Design Expert به روش سطح پاسخ

شماره	دمای محفظه خشک‌کن (درجه سلسیوس)	فشار خلاء (کیلوپاسکال)	زمان خشک‌شدن (دقیقه)	شاخص قهوه‌ای شدن	مطلوبیت
۱	۷۵/۱	۵۱/۲	۲۰۵	۱۳۶/۰۲	۰/۸۴۸۲

effects of diesel/biofuel blends with nanofluid additives on compression ignition engine by response surface methodology. *Energy Conversion and Management: X*, 100177.

- Gaudel, N., Gaiani, C., Harshe, Y. M., Kammerhofer, J., Pouzot, M., Desobry, S., & Burgain, J. (2022). Reconstitution of fruit powders: A processstructure function approach. *Journal of Food Engineering*, 315.
- Krishnan, K. R., Rayaguru, K., & Nayak, P. K. (2020). Ultra-sonicated vacuum drying's effect on antioxidant activity, TPC, TFC and color of elephant apple slices. *Food Bioscience*, 36.
- Lee, J., Chan, B. L., & Mitchell, A. E. (2017). Identification/quantification of free and bound phenolic acids in peel and pulp of apples (*Malus domestica*) using high resolution mass spectrometry (HRMS). *Food Chem*, 215: 301-310.
- Liu, S., Zhu, W., Bai, X., You, T., & Yan, J. (2019). Effect of ultrasonic energy density on moisture transfer during ultrasound enhanced vacuum drying of honey. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(1): 559-570.
- Liu, Y., Wu, J., Miao, S., Chong, C., & Sun, Y. (2014). Effect of a modified atmosphere on drying and quality characteristics of carrots. *Food and Bioprocess Technology*, 7(9): 2549-2559.
- Long, X., Cai, L., & Li, W. (2019). RSM-based assessment of pavement concrete mechanical properties under joint action of corrosion, fatigue, and fiber content. *Construction and Building Materials*, 197: 406-420.
- Lucay, F. A., Sales-Cruz, M., Gálvez, E. D., &

سیاس‌گذاری

از دانشگاه بوعلی سینا برای تأمین منابع مالی پروژه سیاس‌گذاری می‌شود.

منابع

- Alwazeer, D., & Örs, B. (2019). Reducing atmosphere drying as a novel drying technique for preserving the sensorial and nutritional notes of foods. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8): 3790-3800.
- Antonic, B., Jancikova, S., Dordevic, D., & Tremlova, B. (2020). Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Food Science*, 85(10): 2977-2985.
- AOAC. (2002). Official Methods of Analysis. Method Number 934.06. In: *Association of Official Analytical Chemists Arlington Rockville, MD*.
- Cam, I. B., Basunal Gulmez, H., Eroglu, E., & Topuz, A. (2018). Strawberry drying: Development of a closed-cycle modified atmosphere drying system for food products and the performance evaluation of a case study. *Drying Technology*, 36(12): 1460-1473.
- da Silva, L. C., Souza, M. C., Sumere, B. R., Silva, L. G. S., da Cunha, D. T., Barbero, G. F., Bezerra, R. M. N., & Rostagno, M. A. (2020). Simultaneous extraction and separation of bioactive compounds from apple pomace using pressurized liquids coupled on-line with solid-phase extraction. *Food Chem*, 318: 126450.
- Elkelawy, M., El Shenawy, E. A., Bastawissi, H. A. E., Shams, M. M., & Panchal, H. (2022). A comprehensive review on the

- Cisternas, L. A. (2020). An improved response surface methodology. *mineral processing and extractive metallurgy review modeling of the complex behavior through*, 15: 1-27.
- Mignard, P., Beguería, S., Reig, G., i Forcada, C. F., & Moreno, M. A. (2021). Genetic origin and climate determine fruit quality and antioxidant traits on apple (*Malus x domestica* Borkh). *Scientia Horticulturae*, 285: 110142.
- Nanvakenari, S., Movagharnejad, K., Latifi, A. (2022). Modelling and experimental analysis of rice drying in new fluidized bed assisted hybrid infrared-microwave dryer. *Food Res Int*, 159, 111617.
- Polat, A., Taskin, O., Izli, N., & Asik, B. B. (2019). Continuous and intermittent microwave-vacuum drying of apple: Drying kinetics, protein, mineral content, and color. *Journal of Food Process Engineering*, 42(3): e13012.
- Rashidi, M., Amiri Chayjan, R., Ghasemi, A., & Ershadi, A. (2021). Tomato tablet drying enhancement by intervention of infrared - A response surface strategy for experimental design and optimization. *Biosystems Engineering*, 208: 199-212.
- Tian, Y., Wu, S., Zhao, Y., Zhang, Q., Huang, J., & Zheng, B. (2015). Drying Characteristics and Processing Parameters for Microwave-Vacuum Drying of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6): 2620-2629.
- Verma, V., & Yadav, N. (2022). Acrylamide content in starch based commercial foods by using high performance liquid chromatography and its association with browning index. *Curr Res Food Sci*, 5: 464-470.
- Zlatanović, S., Ostojić, S., Micić, D., Rankov, S., Dodevska, M., Vukosavljević, P., & Gorjanović, S. (2019). Thermal behaviour and degradation kinetics of apple pomace flours. *Thermochimica Acta*, 673: 17-25. 22.