

بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن پاششی جهت تولید پودرهای ریزدرون پوشانی شده عصاره فراسودمند استخراجی از چغندر لبویی

شیما یوسفی^۱

^۱ استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۱۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲

۳۱

چکیده

مقدمه: خشک کردن پاششی یکی از مهمترین راه‌های جلوگیری از اتلاف محصولات غذایی استراتژیک و افزایش طول عمر آنها می‌باشد. بهینه‌سازی شرایط عملیاتی این سامانه می‌تواند بستر مناسبی جهت تولید فرآورده‌هایی با کیفیت فیزیوشیمیایی ایده‌آل باشد. **مواد و روش‌ها:** تاثیر سه پارامتر فرآیندی دما (۱۶۰-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت جریان (۲-۴ مترمکعب بر ساعت) هوای ورودی و نرخ خوراک دهی (۱۰-۵ میلی لیتر بر دقیقه) جهت دستیابی به پودرهای فراسودمند ریزدرون پوشانی شده عصاره سرشار از رنگدانه فراسودمند بتالائین چغندر لبویی با روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. بازده پودرهای تولیدی، محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره بازسازی شده بهینه سازی گردید.

یافته‌ها: معادلات درجه دوم با ضرایب همبستگی بالا (۰/۹۶۰-۰/۹۹۴۰) به خوبی می‌توانند شرایط بهینه جهت حصول بالاترین بازده فیزیوشیمیایی را پیش بینی نمایند. افزایش دما و سرعت جریان هوای ورودی تاثیر معنی‌داری بر کاهش ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی پودرهای بدست آمده داشته، در حالی که این روند سبب افزایش بازده تولیدی گشت. محتوای آنتی‌اکسیدانی و فنولی پودرهای ریزدرون پوشانی شده با بازدهی کم در نرخ‌های بالاتر خوراک ورودی بهتر حفظ شدند. مشاهدات میکروسکوپی و اندازه ذرات نیز به طور بارزی یافته‌های بدست آمده را تایید نمودند. یافته‌ها نشان داد که بالاترین راندمان فیزیکی (۷۵٪)، محتوای فنولی (۱۲۳۸/۷۲ میکروگرم اسید گالیک بر میلی لیتر) و درصد بازدارندگی رادیکال آزاد (۷۸/۷۷٪) می‌تواند در شرایط بهینه دمای هوای ورودی ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان هوای ورودی ۳/۶ مترمکعب بر ساعت و نرخ خوراک ورودی ۸/۸ میلی لیتر بر دقیقه بدست آید.

نتیجه گیری: تولید با کیفیت پودرهای ریزدرون پوشانی کننده عصاره چغندر قرمز تحت شرایط بهینه می‌تواند سرآغازی جهت توسعه غنی سازی فرآورده های غذایی با پودرهای بدست آمده محسوب گردد.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، خشک کن پاششی، ریزدرون پوشانی، روش سطح پاسخ، عصاره چغندر قرمز، ویژگی‌های فیزیوشیمیایی

مقدمه

گروه‌های تحقیقاتی دیگر همچنین خواص ضد باکتریایی و ضد ویروسی را به اثبات رسانیده‌اند و یادآور شدند که این ترکیب استثنایی می‌تواند از تکثیر سلول‌های سرطانی جلوگیری کند (Strack et al., 2000; Reddy et al., 2005). با این وجود، پایداری بتالائین تحت تاثیر عوامل محیطی (نظیر دما، نور، یون‌های فلزی و فعالیت آبی) و ساختاری (مانند وجود آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز و پراکسیداز) می‌تواند به میزان قابل توجهی دستخوش تغییر گردد (Elbandy et al., 2008; Manchali et al., 2012). بنابراین به منظور حفظ پایداری بالای رنگدانه بتالائین موجود در این گیاه با بیشینه کیفیت فیزیکوشیمیایی و نیز دسترسی آسان آن در تمام فصول سال، ایده تولید پودر ریزدرون پوشانی شده از عصاره سلامتی بخش استخراجی از چغندر لبوبی تحت شرایط بهینه فرآیند طرح‌ریزی گردید.

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که جهت توسعه، پیشبرد و بهینه‌کردن فرآیندهایی به کار می‌رود که در آنها سطح مورد نظر تحت تاثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف بهینه نمودن پاسخ مزبور است. روش سطح پاسخ کاربرد قابل توجهی در طرح‌ریزی، توسعه و فرموله کردن محصولات جدید و همچنین ارتقای طراحی محصولات موجود دارد. این روش تاثیر متغیرهای مستقل بر فرآیند را به تنهایی یا با هم تعیین می‌کند (Yousefi et al., 2015). این روش‌شناسی تجربه‌ای، علاوه بر آنالیز تأثیرات متغیرهای مستقل، یک مدل ریاضی که توضیح دهنده فرآیندهای شیمیایی و بیوشیمیایی است را در اختیار محقق قرار می‌دهد. در واقع روش سطح پاسخ می‌تواند یک طرح مناسب آزمایشگاهی را مبتنی بر داده‌های مقداری جهت تعیین و حل همزمان مسئله‌های چند متغیره استفاده کند. معادلات به دست آمده تأثیر متغیرهای غیروابسته آزمایشی را بر میزان متغیر پاسخ توضیح داده و رابطه متقابل بین متغیرهای آزمون را مشخص می‌کند. همچنین این روش تأثیر دو به دوی کلیه متغیرهای غیروابسته را بر متغیر پاسخ نمایش می‌دهد. مجموعه این اطلاعات بدست آمده می‌تواند توانایی شناخت کافی فرآیند را برای پژوهشگر امکان‌پذیر نماید (Gharibzahedi et al., 2015a).

بنابراین در این تحقیق سعی گردید تا با استفاده از

خشک کردن پاششی روشی کارا و توجیه‌پذیر جهت خشک کردن محصولات اقتصادی و فصلی می‌باشد. این روش ریزدرون پوشانی جهت توسعه شیر، آب پنیر، تخم مرغ، قهوه و سایر نوشابه‌ها و حتی محصولات فانتزی به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصولات تولیدی نه تنها از ویژگی‌های تغذیه‌ای ممتازی برخوردار هستند، بلکه به دلیل حفظ شرایط بهداشتی و ایمنی بالا، جایگاه مطلوبی جهت جلب رضایت مشتری به خود اختصاص داده‌اند (Bhandari et al., 1993). طی این فرآیند، هوای گرم با دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در اتاقک خشک کن دمیده شده و با مایع ورودی که توسط دستگاه پودر کننده به صورت ذرات ریز در آمده، تماس می‌یابد. پودر خشک شده توسط هوا نهایتاً توسط سیکلون حمل شده و در آنجا ذرات ریز از جریان هوا جدا می‌گردند. به طور کلی سامانه خشک کن پاششی طوری طراحی می‌شود که از زمان ماند کوتاه و طولانی پودر در محفظه خشک کن اجتناب گردد (Yurdagelu & Ersus, 2007).

چغندر قرمز گیاهی از تیره اسفناج با نام علمی *Alef. Beta vulgaris var. conditiva* بوده که سرشار از فیبر و قند و نیز ویتامین‌های ث و گروه ب می‌باشد. علاوه، وجود ترکیبات فنلی محلول و رنگدانه زیست فعال بتالائین موجود در دیواره سلولی این گیاه سبب گردیده است تا این محصول استراتژیک نه تنها به عنوان یک ماده پیشگیری کننده از بیماری‌های فصلی تلقی گردد، بلکه بواسطه محتوای آنتی‌اکسیدانی و فلاوونوئیدی ویژه می‌تواند زمینه کاهش خطر ابتلا به بیماری‌های مزمن و حاد نظیر امراض قلبی و عروقی، اختلالات گوارشی و انواع سرطان را فراهم نماید (Delgado-Vargas et al., 2000). رنگدانه فراسودمند این محصول بومی حاوی ترکیبات رنگی نیتروژن دار محلول در آب موسوم به بتالائین‌ها بوده که از دیدگاه شیمیایی شامل دو گروه عمده بتاسیانین‌های قرمز رنگ و بتاگزانتین‌های زرد می‌باشند (Stintzing et al., 2003). خاصیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات موجود در ریشه چغندر قرمز چهار برابر قوی‌تر از فعالیت مهارکنندگی رادیکال‌های آزاد اسید آسکوربیک گزارش شده که می‌تواند به نحو موثری از بروز آسیب‌های اکسیداتیو چربی‌ها بکاهد (Georgiev et al., 2000). مطالعات انجام شده توسط

- فرآیند خشک کردن پاششی جهت ریزدرون پوشانی عصاره

محلول تولیدی حاوی عصاره چغندر لبویی (هسته) در میزان ۱۰٪ و مالتودکسترین و صمغ عربی (مواد دیواره) به نسبت ۴ به ۱ توسط یک لوله نازک از طریق یک پمپ با سرعت دوران قابل کنترل (۷۵٪) به دستگاه خشک‌کن پاششی آزمایشگاهی (مدل - ۱۹۱، بوچی، سوئیس) تزریق شد. از آنجایی که سرعت جریان هوا در مقادیر بالاتر از ۸۰٪ کل ظرفیت سامانه موجب هدر رفتن مقداری از پودر به همراه هوای خروجی گردید، مقدار این شاخص فرآیندی در این میزان ثابت تنظیم گردید. آزمایشات اولیه نشان داد که استفاده از سرعت‌های جریان خوراک بالاتر از ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه، سرعت دمای هوای ورودی بالاتر از ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوای بیشتر از ۴ مترمکعب بر ساعت منجر به چسبیدن بیش از اندازه ذرات به دیواره خشک‌کن و در نتیجه سوختگی مواد ورودی می‌شود. بنابراین دامنه آزمایشی سه متغیر مورد مطالعه بر طبق جدول ۱ تعیین گردید. پودر تولیدی در محفظه زیر سیکلون در انتهای مسیر جمع‌آوری شده و بلافاصله برای سرد شدن به دسیکاتور جهت انجام آزمایشات بعدی منتقل شد (Yousefi et al., 2014).

- ارزیابی بازده تولید

وزن پودر تولیدی و عصاره استخراجی مورد استفاده براساس ماده خشک جهت تعیین راندمان تولید بکار گرفته شدند (رابطه ۱):

$$Y = \frac{P.S_P}{L.S_F} \times 100 \quad (1)$$

که P مقدار پودر تولیدی، SP درصد ماده جامد کل پودر، L نرخ خوراک ورودی و SF درصد ماده جامد کل خوراک ورودی می‌باشد (Chegini & Ghobadian, 2007).

- تعیین محتوای ترکیبات فنولی کل

روش Lu و همکاران (۲۰۱۱) جهت ارزیابی محتوای ترکیبات فنول کل عصاره با استفاده معرف فولین سیو کالتو

معادلات ریاضی موجود در روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، تاثیر عوامل فرآیندی درگیر در خشک‌کن پاششی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی عصاره درون پوشانی شده استخراجی از چغندر لبویی مورد بررسی قرار گرفته تا شرایط عملیاتی بهینه برای تولید پودرهای آنتی‌اکسیدانی حاصل میسر گردد.

مواد و روش‌ها

- مواد مورد استفاده در تحقیق

۱۰ کیلوگرم چغندر قرمز لبویی با ماده خشک ۲۵/۶٪ از یک بازار محلی در شهر تهران (ایران) خریداری گردید. مواد شیمیایی مورد استفاده شامل اسید گالیک، رادیکال آزاد DPPH^۱، معرف فولین سیو کالتو^۲، مالتودکسترین با درجه اکسی‌والانت ۶، صمغ عربی و متانول از شرکت مرک (آلمان) تامین شد. سایر مواد و معرف‌های مورد کاربرد در این پژوهش همگی در درجه خلوص بالا و از شرکت سیگما آلدریخ (کانادا) تهیه شدند.

- آماده سازی و استخراج عصاره چغندر قرمز

آماده سازی مواد خام خریداری شده به منظور استخراج عصاره چغندر لبویی با استفاده از روش اصلاح شده Kooshesh و Golmakani (۲۰۱۵) صورت پذیرفت. در ابتدا جهت زدایش آلاینده‌ها و گل و لای، چغندر قرمز با آب شستشو داده شد و پس از پوست‌گیری، عمل آنزیم‌بری بلافاصله در دمای جوش ۷۵ درجه سانتی‌گراد برای ۱۰ دقیقه به منظور حفظ ترکیبات مغذی موجود انجام گرفت. سپس با استفاده از دستگاه خردکن (مدل 643 MX، مولینکس، اسپانیا) به قطعات کوچک با ابعاد ۵ میلی متر خرد گردید. به منظور استخراج عصاره حاوی ترکیبات بتالائینی از چغندر مورد مطالعه، تکه‌های همسان در آب مقطر با نسبت وزنی-وزنی ۱ به ۱۰ بر روی یک همزن مغناطیسی با درجه دمایی ۵۵ درجه سانتی‌گراد در بالاترین دور همزنی (۷۵۰ دور بر دقیقه) به مدت ۷/۵ دقیقه تحت عصاره‌گیری قرار گرفت. عصاره‌های مذکور سپس به منظور افزایش بریکس تا مقداری معین در یک روتاوری تحت خلا تغلیظ شدند.

¹ 1,1- diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH)

² Folin-Ciocalteu's reagent

جدول ۱- مقادیر بازده تولیدی، فنول کل و فعالیت آنتی اکسیدانی تابعی از عوامل غیر وابسته براساس طرح مرکب مرکزی

ردیف	متغیرهای غیر وابسته			متغیرهای وابسته ^۱		
	نرخ خوراک دهی (mL/min)	سرعت جریان هوای ورودی (m ³ /h)	دمای هوای ورودی (C°)	بازده تولید (%)	فنول کل (µg Gallic acid/mL)	فعالیت آنتی اکسیدانی (%)
۱	۱۳۶	۲/۴	۵/۲	۷۶/۳	۹۹۱/۳	۶۷/۷
۲	۱۵۴	۲/۴	۵/۲	۸۸/۳	۶۴۵/۸	۵۵/۱
۳	۱۳۶	۳/۶	۵/۲	۷۸/۴	۸۶۱/۳	۶۵/۸
۴	۱۵۴	۳/۶	۵/۲	۹۵/۸	۶۱۸/۳	۴۶/۹
۵	۱۳۶	۲/۴	۸/۸	۶۵/۷	۱۶۲۳/۹	۸۷/۹
۶	۱۵۴	۲/۴	۸/۸	۷۹/۱	۱۰۵۲/۱	۷۱/۸
۷	۱۳۶	۳/۶	۸/۸	۷۶/۹	۱۲۶۳/۲	۷۸/۸
۸	۱۵۴	۳/۶	۸/۸	۹۳/۸	۸۷۵/۸	۵۹/۷
۹	۱۲۹/۸۶	۳	۷	۶۳/۰	۱۲۲۰/۶	۷۶/۷
۱۰	۱۶۰/۱۴	۳	۷	۸۶/۷	۵۹۷/۴	۴۹/۵
۱۱	۱۴۵	۳	۷	۶۷/۱	۱۰۱۶/۳	۶۹/۹
۱۲	۱۴۵	۱/۹۹	۷	۸۰/۳	۷۱۲/۶	۵۶/۶
۱۳	۱۴۵	۴/۰۱	۳/۹۷	۹۰/۶	۶۷۷/۳	۵۶/۳
۱۴	۱۴۵	۳	۱۰/۰۳	۸۱/۴	۱۳۳۹/۵	۸۴/۳
۱۵	۱۴۵	۳	۷	۷۵/۲	۸۵۲/۲	۶۹/۳
۱۶	۱۴۵	۳	۷	۷۴/۲	۸۴۴/۶	۶۸/۰
۱۷	۱۴۵	۳	۷	۷۷/۸	۸۱۱/۰	۶۷/۰
۱۸	۱۴۵	۳	۷	۷۳/۳	۸۷۶/۱	۶۸/۳
۱۹	۱۴۵	۳	۷	۷۵/۱	۸۴۲/۶	۶۷/۶
۲۰	۱۴۵	۳	۷	۷۱/۷	۸۱۲/۳	۶۷/۳

^۱ اعداد میانگین نتایج حاصل سه تکرار می‌باشند.

توسط Yousefi و همکاران (۲۰۱۴) ارزیابی گردید. بر این اساس، محلول استاک روزانه با حل نمودن ۲/۵ میلی گرم رادیکال آزاد در ۱۰۰ سی سی متانول (۰/۰۶۲۵~ میلی مول بر لیتر) تهیه و در دمای اتاق تحت شرایط تاریکی نگهداری شد. ۰/۱ میلی لیتر از نمونه حاوی عصاره رقیق شده با ۳/۹ میلی لیتر محلول استاک آماده شده مخلوط گردید. محلول کنترل رادیکال آزاد با استفاده از ترکیب محلول DPPH و متانول هم حجم آن تهیه گردید. جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر در زمان‌های متوالی متفاوت تا رسیدن به شرایط پایدار شیمیایی با استفاده از یک دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل 2-CEILE، انگلستان) خوانده شد. غلظت DPPH در محیط واکنشی با استفاده از منحنی کالیبراسیون تعیین گردید. مقدار DPPH باقی مانده ($DPPH_{rem}$) در شرایط پایا با استفاده از رابطه ۲ بدست آمد:

بکار گرفته شد. به طور خلاصه، مقدار ۰/۱ میلی لیتر از نمونه به ۰/۷۵ میلی لیتر واکنشگر فولین که به نسبت ۱ به ۱۰ با آب مقطر رقیق شده بود، افزوده گردید. در مرحله بعد، ۰/۷۵ میلی لیتر کربنات سدیم ۲ درصد پس از ۱۰ دقیقه نگهداری مخلوط در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد اضافه شد. جذب مخلوط نهایی بدست آمده پس از گذشت حدود ۴۵ دقیقه نگهداشت نمونه‌ها در تاریکی با استفاده از یک دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل 2-CEILE، انگلستان) در طول موج ۷۶۵ نانومتر خوانده شد. به منظور ارزیابی صحیح مقادیر قرائت شده، منحنی استاندارد برای اسید گالیک ترسیم شد.

سنجش فعالیت آنتی اکسیدانی

فعالیت آنتی‌اکسیدانی در قالب درصد بازدارندگی رادیکال آزاد DPPH و بر طبق روش توضیح داده شده

$$\alpha = (\text{تعداد تیمارهای فاکتوریلی موجود در طرح})^{1/25} \quad (3)$$

از آنجایی که در طرح حاضر تعداد تیمارهای فاکتوریلی ۸ می‌باشد، لذا بر پایه رابطه فوق، مقدار $1/68$ برای α در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمایشات مختلف و آنالیز پاسخ‌ها نسبت به تعیین نقطه بهینه با بهترین شرایط عملیاتی اقدام گردید. کیفیت مدل‌های برازش یافته با استفاده از شاخص‌هایی همچون ضریب همبستگی (R^2)، ضریب همبستگی تنظیم یافته (R^2_{adj})، ضریب دقت کافی (ADP^1) و ضریب تغییرات (CV^2) ارزیابی شدند (Gharibzahedi et al., 2015b). سپس به منظور تعیین شرایط بهینه، آزمایشات اعتبارسنجی با انجام سه آزمون انجام پذیرفت و با نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۱۶، آمریکا) در قالب طرح آماری تی-استیودنت^۳ نسبت به تعیین تفاوت معنی‌دار بین نقاط تجربی و بهینه (مدل ارزیابی گردید. همچنین، به منظور سنجش کارایی فرآیند ریزدرون پوشانی با خشک کن پاششی، محتوای فنول کل و درصد بازدارندگی رادیکال آزاد در این پژوهش برای یک نمونه شاهد بدون فرآیند ریزدرون پوشانی تحت شرایط مشابه مورد آنالیز قرار گرفت. سپس مقایسه نتایج مقادیر پاسخ‌های تجربی بدست آمده در نقطه بهینه با مقادیر پاسخ‌های حاصل از نمونه شاهد از نظر آماری انجام شد.

یافته‌ها

- برازش داده‌ها و مدل سازی سطح پاسخ

همان‌طوری که در جدول ۲ مشاهده می‌کنید، داده‌های آزمایشی حاصل از آنالیز بازده پودر تولیدی، مقادیر ترکیبات فنولی کل و درصد بازدارندگی رادیکال آزاد با استفاده از معادلات درجه دوم بطور رضایتبخشی برازش یافت. برازش داده‌ها با استفاده از این توابع ریاضی در سطح احتمال کمتر از $0/0001$ معنی‌دار بود، در حالی که شاخص نقض برازش^۵ به طور قابل توجهی غیر معنی‌دار ارزیابی شد. معادلات برازش یافته درجه دوم برای پاسخ‌های سه گانه بازده (Y_1)، فنول کل (Y_2) و فعالیت آنتی اکسیدانی (Y_3) به ترتیب در روابط ۴-۶ آمده است:

$$DPPH_{rem} = \left(\frac{(DPPH)_{SS}}{(DPPH)_c} \right) \times 100 \quad (2)$$

که $(DPPH)_c$ و $(DPPH)_{SS}$ به ترتیب مقادیر رادیکال آزاد اولیه و مقادیر آن در شرایط پایا می‌باشد.

- ارزیابی ساختار میکروسکوپی پودرهای تولیدی

به منظور آنالیز ساختاری، ابتدا نمونه‌های پودری به منظور خشک شدن کامل تحت خلاء قرار گرفتند و سپس با قراردادن مقداری از نمونه خشک طلا پوشی شده بر روی یک پایه فلزی، از میکروسکوپ الکترونی (مدل XL30، فیلیپس، هلند) با بزرگ‌نمایی ۲۵۰۰ در ولتاژ ۲۰ کیلوولت جهت مشاهدات میکروسکوپی شکل و اندازه ذرات پودری بهره گرفته شد (Yousefi et al., 2015).

- تعیین اندازه ذرات پودرهای تولیدی

توزیع اندازه ذرات برای نمونه‌های ریز درون پوشانی شده با استفاده از سامانه تفرق اشعه لیزر (مدل Horiba, LA-950V2، آمریکا) ارزیابی شد. متوسط اندازه ذرات به صورت قطر میانگین سطحی گزارش گردید (Gallo et al., 2011).

- بهینه سازی و آنالیز آماری

در این طرح ابتدا با کمک نرم‌افزار آماری دیزاین اکسپرت (نسخه ۸، آمریکا) در قالب طرح مرکب مرکزی^۱ نسبت به بهینه‌سازی فاکتورهای مستقل و وابسته با ۲۰ آزمایش اقدام گردید (جدول ۱). طرح حاضر دارای ۸ تیمار فاکتوریلی (آزمایش‌های ۱-۸)، ۶ تیمار محوری (آزمایش‌های ۹-۱۴) و ۶ تیمار مرکزی (آزمایش‌های ۱۵-۲۰) می‌باشد (جدول ۱). پارامترهای غیروابسته شامل دمای هوای ورودی (۱۶۰-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)، سرعت جریان هوای ورودی (۴-۲ مترمکعب بر ساعت) و نرخ خوراک ورودی (۱۰-۵ میلی لیتر بر دقیقه) می‌باشند، در حالی که پارامترهای وابسته شامل بازده پودر تولیدی، محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی اکسیدانی بودند. سطح آلفای (α) چرخشی بر اساس رابطه ۳ در این طرح $1/68 \pm$ لحاظ گردید:

¹ Adequate Precision

² Coefficient of Variation

³ T-Student

⁴ Central Composite Design (CCD)

⁵ Lack-of-Fit

فرآیندی دما هوای ورودی، سرعت جریان هوای ورودی و نرخ خوراک دهی می‌باشند.

ضریب R^2 و R^2_{adj} برای مدل‌های درجه دوم شاخص‌های پاسخ یعنی بازده تولید، محتوای فنول کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به ترتیب ۰/۹۶۰ و ۰/۹۲۵ و ۰/۹۸۸ و ۰/۹۷۷ و ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹۰ تعیین شد (جدول ۲). مقادیر ضریب تغییرات مدل‌های تبیین یافته برای بازده، فنول کل و درصد بازدارندگی رادیکال DPPH به ترتیب ۳/۱۱، ۴/۳۲ و ۱/۵۹ بود (جدول ۲). در نهایت ضریب دقت بالای بدست آمده بین ۱۶/۹۳ تا ۵۴/۰ متغیر بود (جدول ۲) که این

$$Y_1 = 74.44 + 7.29(X_1) + 4.22(X_2) - 2.84(X_3) + 4.76(X_3)^2 + 2.04(X_2X_3) \quad (4)$$

$$Y_2 = 837.90 - 190.07(X_1) - 88.25(X_2) + 205.90(X_3) + 36.89(X_1)^2 + 72.03(X_3)^2 + 35.86(X_1X_2) - 46.34(X_1X_3) - 47.44(X_1X_2) \quad (5)$$

$$Y_3 = 67.87 - 8.23(X_1) - 3.39(X_2) + 8.04(X_3) - 1.34(X_1)^2 - 1.37(X_2)^2 - 1.12(X_3)^2 - 1.16(X_1X_2) - 1.39(X_2X_3) \quad (6)$$

در این روابط، X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب سه متغیر مستقل

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس همراه با ضرایب مدل ارائه شده برای ویژگی‌های مورد بررسی

فعالیت آنتی‌اکسیدانی (%)		فنول کل (µg gallic acid/mL)			بازده تولید (%)			منبع		
P-value	مجموع مربعات	ضرایب	P-value	مجموع مربعات	ضرایب	P-value	مجموع مربعات		درجه آزادی	
< ۰/۰۰۰۱	۲۱۲۶/۳۴	۶۷/۸۷	< ۰/۰۰۰۱	۱/۳۱E+۰۰۶	۸۳۹/۹۰	< ۰/۰۰۰۱	۱۴۵۱/۵۶	۷۴/۴۴	۹	مدل خطی
< ۰/۰۰۰۱	۹۲۵/۸۲	-۸/۳۳	< ۰/۰۰۰۱	۴/۹۳E+۰۰۵	-۱۹۰/۰۷	< ۰/۰۰۰۱	۷۲۵/۷۸	۷/۲۹	۱	ضریب (دمای هوای ورودی)
< ۰/۰۰۰۱	۲۱۰/۹۰	-۳/۹۳	< ۰/۰۰۰۱	۱/۰۶E+۰۰۵	-۸۸/۲۵	< ۰/۰۰۰۱	۲۴۳/۷۸	۴/۲۲	۱	ضریب (سرعت جریان هوای ورودی)
< ۰/۰۰۰۱	۸۸۲/۶۳	۸/۰۴	< ۰/۰۰۰۱	۵/۷۹E+۰۰۵	۲۰۵/۹۰	۰/۰۰۱۶	۱۱۰/۰۸	-۲/۸۴	۱	ضریب (نرخ خوراک دهی)
۰/۰۰۰۵	۲۹/۳۶	-۱/۴۳	۰/۰۰۵۸	۱۹۶۱۱/۲۷	۳۶/۸۹	ns	۹/۶۹	-	۱	ضریب (دمای هوای ورودی) درجه ۲
۰/۰۰۰۶	۲۷/۲۲	-۱/۳۷	ns	۶۴۳۹/۵۴	-	ns	۲/۴۶	-	۱	ضریب (سرعت جریان هوای ورودی)
۰/۰۰۲۵	۱۸/۰۲	۱/۱۲	< ۰/۰۰۰۱	۷۴۷۷۵/۷۹	۷۲/۰۳	< ۰/۰۰۰۱	۳۲۶/۸۳	۴/۷۶	۱	ضریب (نرخ خوراک دهی)
۰/۰۱۱۱	۱۰/۸۱	-۱/۱۶	۰/۰۲۹۸	۱۰۲۸۸/۹۵	۳۵/۸۶	ns	۹/۹۰	-	۱	برهمکنش ضریب (دمای هوای ورودی) × سرعت جریان هوای ورودی
ns	۱/۷۱	-	۰/۰۰۸۴	۱۷۱۷۷/۳۱	-۴۶/۳۴	ns	۰/۱۰	-	۱	ضریب (دمای هوای ورودی) × نرخ خوراک دهی
۰/۰۰۴۱	۱۵/۴۰	-۱/۳۹	۰/۰۰۷۴	۱۸۰۰۲/۵۳	-۴۷/۴۴	۰/۰۴	۳۳/۲۱	۲/۰۴	۱	ضریب (سرعت جریان هوای ورودی) × نرخ خوراک دهی
۰/۱۹۰۴ ^{ns}	۱۱/۲۰		۰/۰۷۰۸ ^{ns}	۱۶۰۴۵/۱۹		۰/۲۶۱۹ ^{ns}	۵۹/۶۷		۸	باقی مانده
	۷/۸۱			۱۲۹۵۴/۱۷			۲۸/۵۷		۵	نقص برازش
	۳/۳۹			۳۰۸۸/۰۲			۲۱/۰۹		۳	خطای خالص
	۲۱۳۷/۵۴			۱/۳۳E+۰۰۶			۱۵۱۱/۳۳		۱۹	مجموع
		۰/۹۹۴			۰/۹۸۸			۰/۹۶۰		ضریب همبستگی (R^2)
		۰/۹۹۰			۰/۹۷۷			۰/۹۲۵		ضریب همبستگی دقیق و تنظیم شده (R^2_{adj})
		۱/۵۹			۴/۳۲			۳/۱۱		دامنه تغییرات (CV)
		۵۴/۰۰			۳۴/۱۹			۱۶/۹۳		دقت لازم (Adequate precision)

^{ns} نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار می باشد.

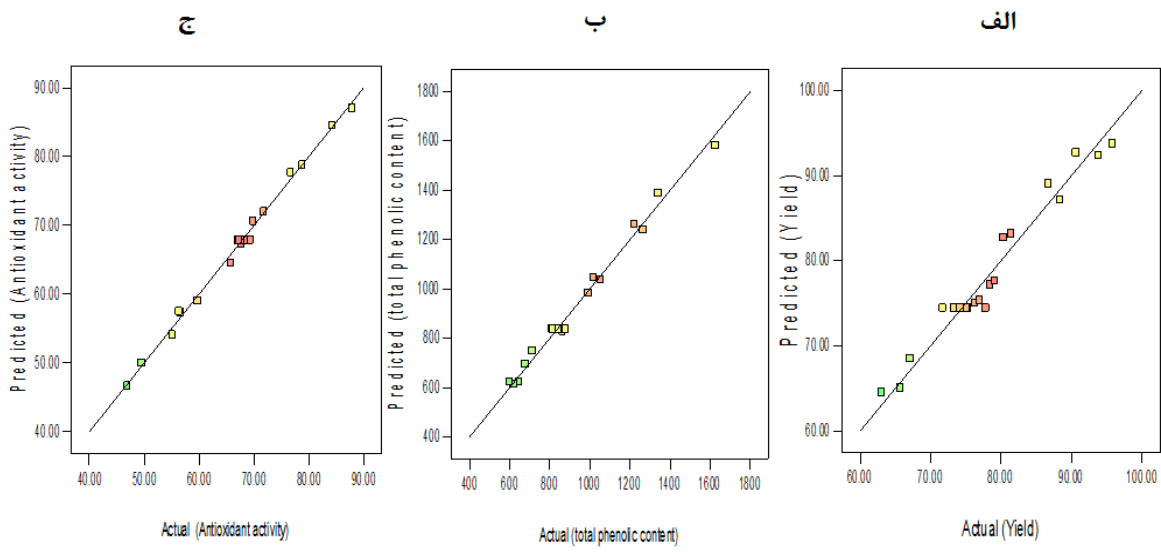
بودند (جدول ۲). همان طوری که مشاهده می‌کنید بازده تولید پودر به طور معنی‌داری با افزایش سرعت هوای ورودی افزایش و با افزایش نرخ خوراک دهی به طور قابل توجهی کاهش یافت (شکل ۲).

نتایج نشان داد که اثرات خطی تمامی پارامترهای مستقل بر مقادیر ترکیبات فنولی کل و درصد بازدارندگی رادیکال آزاد مورد بررسی بسیار معنی‌دار بود ($P < 0.0001$). در میان اثرات درجه دوم و برهمکنش، تنها اثر درجه دوم سرعت جریان هوای ورودی بر میزان ترکیبات فنولی کل و اثر برهمکنش دمای هوای ورودی و نرخ خوراک دهی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی معنی‌دار نبود. افزایش دمای هوای ورودی می‌تواند سبب کاهش معنی‌دار فعالیت آنتی‌اکسیدانی شود (شکل ۳). همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود

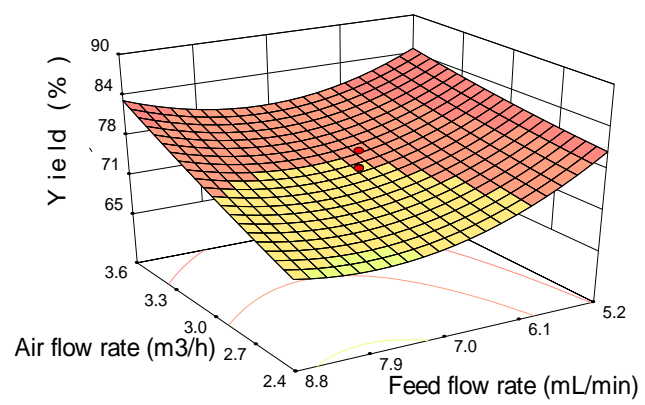
که این امر می‌تواند کفایت مدل‌های برازش یافته را اثبات نماید (Yousefi et al., 2014). شکل ۱ نیز با مقایسه داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده، کارایی مدل‌های درجه دوم برازش یافته را تایید می‌نماید.

نتایج آشکار ساخت که اثرات خطی تمامی متغیرهای غیر وابسته بر روی میزان بازده تولیدی معنی‌دار بود. در میان اثرات درجه دوم و متقاطع، تنها اثر نرخ خوراک ورودی ($P < 0.0001$) و سرعت هوای ورودی با نرخ خوراک ورودی ($P < 0.05$) به ترتیب معنی‌دار ارزیابی شد. بر پایه آنالیز واریانس و ضرایب رگرسیونی مدل درجه دوم برازش شده، اثر درجه خطی دمای هوای ورودی، اثر درجه دوم نرخ خوراک دهی و اثر خطی سرعت هوای ورودی به ترتیب تاثیرگذارترین پارامترهای موجود بر راندمان تولیدی

۳۷



شکل ۱- مقایسه داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده برای بهینه‌سازی مقایسه بازده تولیدی (الف)، محتوای ترکیبات فنولی (ب) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (ج) پودرهای ریزدرون پوشانی شده عصاره چغندر قرمز



شکل ۲- تصویر سه بعدی برهمکنش دوگانه معنی‌دار میان سرعت هوای ورودی و نرخ خوراک دهی بر میزان بازده پودر تولیدی

نتایج آشکار کرد که استفاده از ترکیب دمای هوای ورودی ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان هوای ورودی ۳/۶ مترمکعب بر ساعت و نرخ خوراک ورودی ۸/۸ میلی لیتر بر دقیقه می‌تواند به بیشترین بازده تولیدی (۰/۷۵٪)، محتوای فنولی (۱۲۳۸/۷۲ میکروگرم اسید گالیک بر میلی لیتر) و درصد بازدارندگی رادیکال آزاد (۰/۷۸/۷۷٪) دست یافت (جدول ۴). نتایج حاصل از آزمایشات اعتبارسنجی همچنین نشان داد تحت شرایط عملیاتی پیش بینی شده، مقادیر شاخص‌های پاسخ شامل بازده تولید، محتوای فنول کل و بازدارندگی رادیکال آزاد DPPH به ترتیب برابر با $1242/01 \pm 12/75$ ، $77/21 \pm 3/67$ میکروگرم اسید گالیک بر میلی لیتر و $77/22 \pm 2/71$ ٪ می‌باشد (جدول ۴). همچنین، نتایج ارزیابی محتوای فنول کل (٪)، بازدارندگی رادیکال آزاد ($841/26 \pm 7/48$ میکروگرم اسید گالیک بر میلی لیتر) و شاهد (بدون فرآیند ریزدرون پوشانی تحت شرایط مشابه) نشان داد که ریزدرون پوشانی عصاره چغندر لبویی می‌تواند تا حد زیادی از کاهش ترکیبات فراسودمند موجود در آن بگاهد ($P < 0/01$). آنالیز آماری دو گروه از داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که هیچ‌گونه تفاوت آماری معنی‌داری بین آنها وجود ندارد (جدول ۴).

یک افزایش در میزان سرعت هوای ورودی می‌تواند منجر به کاهش معنی‌داری در میزان ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدان مورد مطالعه از طریق تولید انرژی بالاتر بر روی سطح قطرات تولیدی، شکست آنها و به دنبال آن اکسیداسیون بیشتر در نتیجه افزایش سطح گردد. نتایج آنالیز اندازه ذرات نیز یافته‌های بدست آمده را اثبات کرد چرا که مشخص شد با افزایش سرعت هوای ورودی از ۲ و ۴ مترمکعب بر ساعت در نرخ ثابت خوراک دهی ۷ میلی‌لیتر بر دقیقه و دمای هوای ورودی ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد، قطر میانگین سطحی ذرات به ترتیب برابر با $3/54$ و $1/89$ میکرومتر می‌باشد.

نتایج بهینه‌سازی اختصاصی^۱ عددی به منظور دستیابی به منظور دستیابی به بالاترین راندمان کمی، ترکیبات فنولی کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی پودرهای ریزدرون پوشانی شده عصاره چغندر قرمز در جدول ۳ آورده شده است. با این حال، از آنجا که رسیدن به مقادیر بیشینه هر سه پاسخ مورد مطالعه هدف این پژوهش بوده است، بهینه‌سازی کلی^۲ پس از مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آماری بر مبنای دستیابی همزمان به بالاترین راندمان تولید پودر، بیشترین ترکیبات فنولی کل و فعالیت بیشینه آنتی‌اکسیدانی صورت پذیرفت.

۳۸

جدول ۳- نتایج پیش‌بینی شده در بهینه‌سازی اختصاصی برای هر یک از خصوصیات فیزیکیوشیمیایی مورد بررسی در این تحقیق

درجه مطلوبیت	متغیرهای مستقل مورد بررسی			مقدار هدف (بیشینه)	پاسخ‌های مورد بررسی
	نرخ خوراک دهی (mL/min)	سرعت جریان هوای ورودی (m ³ /h)	دمای هوای ورودی (°C)		
۰/۹۳۸	۵/۲	۳/۶	۱۵۴	۹۴	راندمان تولید (٪)
۰/۹۵۹	۸/۸	۲/۴	۱۳۶	۱۵۸۱/۸۳	فنول کل (μg gallic acid/mL)
۰/۹۸۰	۸/۸	۲/۴	۱۳۶	۸۷/۰۸	فعالیت آنتی‌اکسیدانی (٪)

جدول ۴- مقایسه نتایج بهینه کلی (پیش‌بینی شده) با نتایج تجربی برای خصوصیات فیزیکیوشیمیایی مورد بررسی در این تحقیق

مقادیر	متغیرهای غیر مستقل			متغیرهای پاسخ ^۲	
	دمای هوای ورودی (°C)	سرعت جریان هوای ورودی (m ³ /h)	نرخ خوراک دهی (mL/min)	فنول کل (μg gallic acid/mL)	فعالیت آنتی‌اکسیدانی (٪)
پیش‌بینی	۱۳۶	۳/۶	۸/۸	۱۲۳۸/۷۲ ^a	۷۸/۷۷ ^a
تجربی ^۱	-	-	-	$1242/01 \pm 12/75^a$	$77/22 \pm 2/71^a$

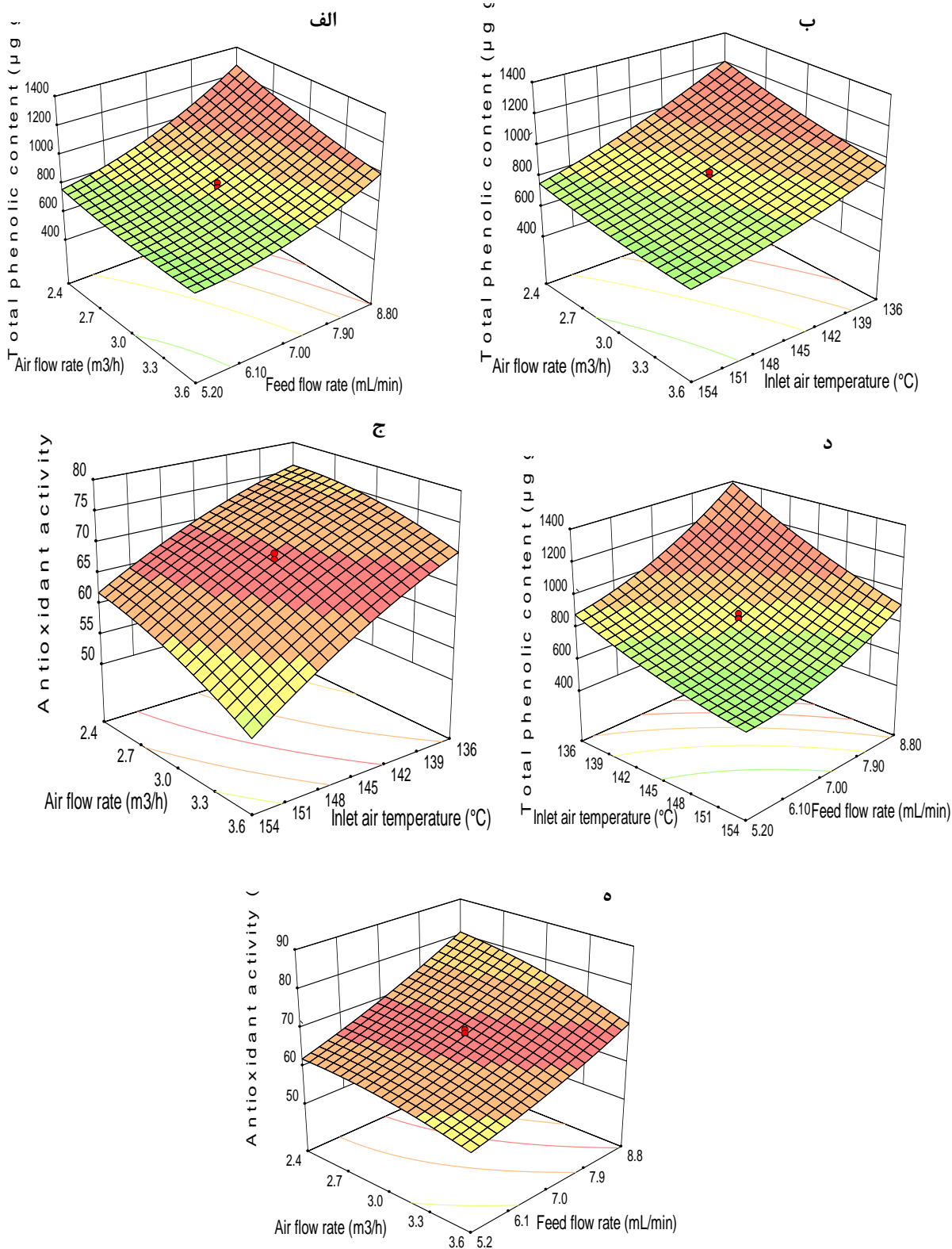
^۱ مقادیر تجربی بدست آمده از تکرار سه آزمایش و بصورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده است.

^۲ حروف آماری یکسان (a) در هر ستون نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار می‌باشد.

¹ Individual Optimization

² Overall Optimization

شیما یوسفی



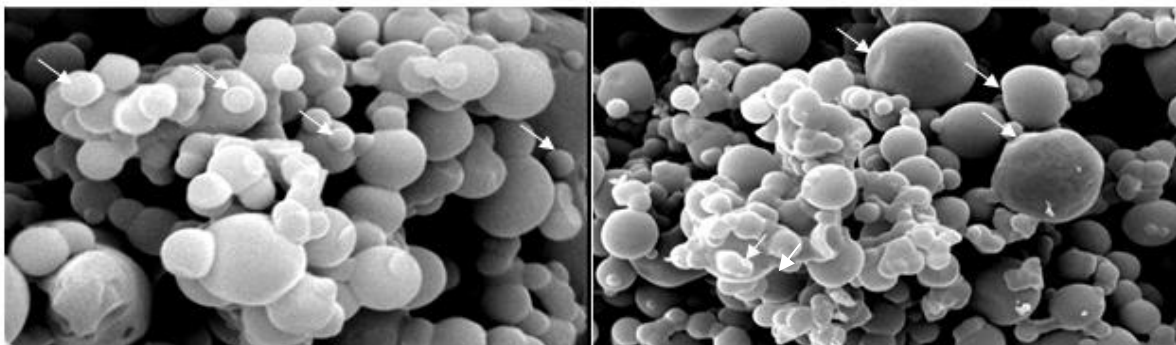
شکل ۳- تصویر سه بعدی برهمکنش دوگانه معنی دار میان متغیرهای مستقل بر میزان ترکیبات فنولی (الف، ب، ج) و فعالیت آنتی اکسیدانی (د، ه) پودر تولیدی از عصاره استخراجی چغندر قرمز. مقادیر پارامتر سوم در شکل های الف (نرخ خوراک دهی)، ب (دمای هوای ورودی)، ج (نرخ خوراک دهی)، د (سرعت جریان هوای ورودی) و ه (دمای هوای ورودی) به ترتیب ۱۴۵ mL/min، ۷°C، ۱۴۵ mL/min، ۳ m³/h و ۷°C می باشند.

فراهم می‌نماید (Buchailot *et al.*, 2009). با این حال، بازده تولیدی با افزایش نرخ خوراک ورودی به طور معنی‌داری کاهش یافت که این موضوع احتمالا به دلیل انتقال جرم و حرارت آهسته‌تر است. بعلاوه، با بکارگیری نرخ خوراک دهی بیشتر، بخش بزرگی از خوراک ورودی مسیر مستقیمی را درون محفظه خشک کن بدون اتمایز شدن سپری کرده و در نتیجه اتلاف انرژی در فرآیند خشک کن سبب کاهش بازده پودرهای تولید شده نهایی می‌گردد (Tee *et al.*, 2012). گروه دیگر تحقیقاتی با بررسی ریزدرون پوشانی اینولین دریافتند که با کاهش سرعت پمپ یا سرعت جریان خوراک به طور قابل ملاحظه‌ای می‌توان به بازدهی بیشتر دست یافت (Toneli *et al.*, 2006). افزایش بازده تولید پودرهای عصاره استخراجی از چغندر قرمز با افزایش دمای هوای ورودی خشک کن را می‌توان به کارایی بهتر فرآیندهای انتقال جرم و حرارت نسبت داد (Yousefi *et al.*, 2015). این نتیجه در توافق با یافته‌های بدست آمده از سایر محققین در ارتباط با ریزدرون پوشانی رنگدانه‌های تاج خروس (Cai, 2000) و آنتوسیانین های آمیوه نخل آسای (Tonon *et al.*, 2008) با خشک کن پاششی بود. بنابراین بهینه سازی و کنترل دقیق پارامترهای حیاتی در فرآیند ریزدرون پوشانی با استفاده از خشک کن پاششی می‌تواند زمینه را برای جلوگیری از مشکلات مرتبط با چسبندگی و رسوب پودرهای تولیدی در محفظه خشک کن فراهم نمایند و بدین ترتیب پودرهایی با کیفیت بهتر با قدرت بازیابی بالای ترکیبات ریزدرون پوشانی شده ارائه دهند.

در ارتباط با برازش داده های تجربی با مدل‌های درجه دوم، از آنجایی که کلیه ضرایب بدست آمده برای داده‌هایشان متناظر تجربی و پیش بینی شده نزدیک به ۱ می‌باشد، لذا می‌توان بیان کرد که مدل‌ها تبیین یافته از پتانسیل بالایی برای برازش داده‌های آزمایشی برخوردار می‌باشند. ضریب تغییرات بایستی عددی مابین ۰ و ۱۰ باشد تا میزان خطای مدل جهت تعیین نقطه بهینه قابل پذیرش باشد. از آنجایی که مقادیر این ضریب برای سه شاخص بازده، فنول کل و درصد بازدارندگی رادیکال DPPH به صفر نزدیک بودند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که درصد عدم برازش به طور قابل توجهی پایین می‌باشد. در نهایت ضریب دقت بالای بدست آمده نیز می‌تواند گویای کارایی مدل‌های برازش یافته برای سنجش شرایط بهینه نهایی جهت تولید پودرهای ریزدرون پوشانی شده عصاره چغندر قرمز باشد، چرا که ضرایب دقت بالاتر از ۴ نشان دهنده تبیین مدلی مناسب با اختلالات یا خطاهای ناخواسته کمتر می‌باشد (Yousefi *et al.*, 2014).

بازده پودر تولیدی یکی از مهمترین شاخص‌های تعیین کننده کارایی عملکرد فرآیند خشک کن پاششی محسوب می‌شود. افزایش سرعت هوای خشک کن می‌تواند زمینه را برای کاهش سریع‌تر بخار آب از سطح قطرات و نیز فعالیت آبی پودرهای کروی و صاف تولیدی مهیا سازد (شکل ۴)، در حالی که کاهش این شاخص ضمن کاهش نرخ فرآیند خشک‌کردن، زمینه را برای شکل‌گیری پودر نهایی با ساختاری چروکیده (شکل ۴) در محتوای رطوبتی بالاتر

۴۰



شکل ۴- ریز ساختار پودر تولیدی از عصاره های استخراجی از چغندر قرمز تولید شده تحت شرایط ثابت نرخ خوراک دهی ۷ میلی لیتر بر دقیقه و دمای هوای ورودی ۱۴۵ درجه سانتی گراد در دو سرعت هوای ورودی ۲ (الف) و ۴ (ب) مترمکعب بر ساعت. (شرایط ارزیابی: بزرگنمایی ۲۵۰۰ و ولتاژ ۲۰ کیلو وات)

¹ Açai Palm

برخی گزارشات علمی را می توان به تفاوت در نوع و مقدار ترکیبات دیواره پوششی و نوع ترکیب ریزدرون پوشانی شده (ترکیب هسته) و نیز تفاوت در دامنه در نظر گرفته شده جهت بررسی پارامترهای فرآیندی درگیر در خشک کن پاششی نسبت داد (Tonon *et al.*, 2008).

محتوای ترکیب زیست فعال کاروتنوئیدی لایکوپن موجود در پالپ گوجه فرنگی ریزدرون پوشانی نیز با افزایش سرعت هوای فشرده شده طی فرآیند خشک کردن پاششی به طور محسوسی کاهش یافت (Goula *et al.*, 2006). افزایش این شاخص با تامین انرژی بیشتر بر روی مایع ورودی در قسمت اتومایزر سبب شکست بیشتر قطرات به اندازه های کوچک تر شده و در نتیجه با افزایش نسبت سطح به حجم موجبات توسعه بیشتر فرآیندهای اکسیداتیو را بر روی ترکیبات زیست فعال فراهم می سازد (Tonon *et al.*, 2008). به نظر می رسد برهمکنش دما و سرعت هوای ورودی بالا می تواند به واسطه انتقال جرم رادیکال های آزاد توسعه یافته در سطح میانی ترکیبات دیواره و هسته و افزایش سرعت واکنش های زنجیره ای اکسیداسیون تا حد زیادی از محتوای ترکیبات فنولی و آنتی اکسیدانی بکاهد (Padma Ishwarya & Anandharamkrishnan, 2017; Cortez *et al.*, 2015). به طور طبیعی، افزایش نرخ خوراک دهی می تواند زمینه را جهت افزایش درون پوشانی ترکیب هدف مهیا ساخته و از اینرو تولید پودرهایی با فعالیت آنتی اکسیدانی را میسر نماید (شکل ۳). از آنجایی که سطح تماس بیشتری مابین قطرات اتمایز شده و هوای خشک ورودی در نرخ های خوراک دهی کم وجود دارد، این موضوع می تواند زمینه شوک حرارتی و تبخیر سریع تر آب از سطح قطرات را با تخریب آنتی ترکیبات زیست فعال به همراه داشته باشد. در حالی که با افزایش نرخ خوراک ورودی، سطح تماس مذکور به میزان معنی داری کاهش یافته و با حذف متعادل رطوبت از سطح قطرات، تخریب فیزیکوشیمیایی ترکیبات فنولی و آنتی اکسیدانی محلول با شدت کمتری انجام می شود.

براساس نتایج بهینه سازی عددی می توان نتیجه گرفت که مدل های درجه دوم برازش یافته در این تحقیق می توانند جهت تعیین نقاط بهینه شرایط تولید پودرهایی ریزدرون پوشانی شده عصاره چغندر قرمز مورد استفاده قرار

همان طوری که پیشتر اشاره شد، فعالیت آنتی اکسیدانی با افزایش دمای هوای ورودی کاهش پیدا نمود. یافته های مشابهی برای برای خشک کردن پاششی پالپ گوجه فرنگی (Goula *et al.*, 2006)، هویج سیاه (Ersus, 2007) و میوه گاک^۱ (Kha *et al.*, 2010) و بسیاری از میوه های دیگر (Krishnaiah *et al.*, 2014) گزارش گردید. به طور معمول، پودرهای تولید شده با خشک کن پاششی در دمای هوای ورودی کمتر تمایل بالایی به آگلومریزاسیون بواسطه محتوای رطوبتی بالا دارند. بنابراین، سازوکار آگلومریزاسیون به منزله سدی فیزیکی از مواجهه محتویات زیست فعال ریزدرون پوشانی شده همچون بتالاین ها و ترکیبات فنولی با اکسیژن و دمای بالا به میزان قابل ملاحظه ای می کاهد و از اینرو ترکیبات فنولی ویژگی های آنتی اکسیدانی پودرهای نهایی به طور مطلوبی محافظت می گردند. این مسئله سبب می شود که پودرهای تولیدی با محتوای بالای قند، ماهیتی چسبنده یابند. محتوای آنتی اکسیدانی و آنتوسیانین پودرهای ریزدرون پوشانی شده آب میوه تمشک (Yousefi *et al.*, 2014) نیز با افزایش محتوای رطوبتی به میزان قابل توجهی بهبود یافت. با این حال، Tee و همکاران (۲۰۱۲) و Tonon و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که محتوای ترکیب فیتوشیمیایی هیدروکسی کایکول^۲ عصاره برگ های فوفل و آنتوسیانین های آبمیوه نخل آسای با افزایش دمای هوای ورودی و کاهش محتوای رطوبتی افزایش می یابد. این محققان دو فرضیه را به منظور تحلیل نتایج خود بیان کردند که عبارتند از: (الف) حضور ترکیبات ناشناخته در آبمیوه یا عصاره که به پتانسیل آنتی اکسیدانی کمک شایانی می کند و (ب) روی دادن واکنش قهوه ای شدن مایلارد در دمای بالا که می تواند سبب سنتز ترکیباتی با فعالیت آنتی اکسیدانی بالا شود. بررسی پارامترهای خشک کن پاششی جهت فرآوری مایعات تخمیری نشان داد که دمای بیشتر هوای ورودی می تواند ضمن افزایش نرخ خشک کردن اولیه سبب تولید ذراتی با اندازه درشت تر و دیواره ای نازک متشکل از مواد درون پوشانی شده شود که این امر خود به حفظ ترکیبات زیست فعال کمک بسیاری می نماید (Zhou *et al.*, 2004). به طور کلی تفاوت نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج متفاوت حاصل شده در

¹ Gac (*Momordica cochinchinensis*) Fruit Aril

² Hydroxychavicol

نشان داد که این مدل‌ها از قابلیت متناسبی به منظور برازش داده‌های تجربی بدست آمده برای متغیرهای پاسخ شامل بازده پودرهای تولیدی، محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره بازسازی شده برخوردار می‌باشند. بهینه‌سازی کلی نمایان کرد که با تنظیم دما و سرعت جریان هوای ورودی و نرخ خوراک ورودی به ترتیب در ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد، ۳/۶ مترمکعب بر ساعت و ۸/۸ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌توان به بیشترین بازده تولیدی (۰/۷۵٪) و محتوای فنولی (۱۲۳۸/۷۲ میکروگرم اسید گالیک بر میلی‌لیتر) و آنتی‌اکسیدانی (۰/۷۸/۷۷٪ بازدارندگی رادیکال آزاد DPPH) دست یافت. نتایج بدست آمده از این تحقیق می‌تواند افق روشنی برای تولید این محصول فراویژه در مقیاس صنعتی و به دنبال آن غنی‌سازی فرآورده‌های غذایی مختلف با پودرهای فراسودمند این عصاره سلامتی بخش را پیش روی صنعتگران عرصه غذا باز کند.

بگیرند. از طرف دیگر، از آنجایی که بهترین شرایط جهت افزایش محتوای ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی (دمای هوای ورودی ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان هوای ورودی ۲/۴ مترمکعب بر ساعت و نرخ خوراک ورودی ۸/۸ میلی‌لیتر بر دقیقه) با بدترین شرایط (دمای هوای ورودی ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان هوای ورودی ۲/۴ مترمکعب بر ساعت و نرخ خوراک ورودی ۷/۹۴ میلی‌لیتر بر دقیقه) به منظور افزایش بازده تولیدی پودر ریزدرون پوشانی شده چغندر قرمز تقریباً یکسان بوده است، لذا کاهش درجه مطلوبیت نهایی (۰/۵۶۸) قابل توجیه است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر شرایط بهینه متغیرهای حاکم بر فرآیند خشک کردن پاششی را به منظور تولید پودرهای ریزدرون پوشانی شده عصاره چغندر لبوبی با محتوای بالای بتالاین را با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی نمود. آنالیز رگرسیون خطی چندگانه در قالب توابع درجه دوم ریاضی

علائم و اختصارات

Y_1	فعالیت آنتی‌اکسیدانی پودر تولیدی (%)	P	نرخ تولید پودر (میلی‌لیتر بر دقیقه)
X_1	نرخ خوراک دهی (میلی‌لیتر بر دقیقه)	L	نرخ خوراک ورودی (میلی‌لیتر بر دقیقه)
X_2	سرعت جریان هوای ورودی (متر مکعب بر ساعت)	SP	ماده جامد کل پودر (%)
X_3	دمای هوای ورودی (درجه سانتی‌گراد)	SF	ماده جامد کل خوراک ورودی (%)
R^2	ضریب همبستگی	$DPPH_c$	رادیکال آزاد DPPH اولیه (جذب در ۷۱۵ نانومتر)
R^2_{adj}	ضریب همبستگی تنظیم یافته	$DPPH_{ss}$	رادیکال آزاد DPPH در شرایط پایا (جذب در ۷۱۵ نانومتر)
ADP	ضریب دقت کافی	$DPPH_{rem}$	رادیکال آزاد DPPH باقی مانده در شرایط پایا (جذب در ۷۱۵ نانومتر)
CV	ضریب تغییرات	Y_1	بازده تولید پودر (%)
		Y_2	محتوای فنول کل (میکرو گرم گالیک اسید بر میلی‌لیتر)

۴۲

betacyanin pigments. *Journal of Food Science*, 65, 1248-1252.

Chegini, G. R. & Ghobadian, B. (2007). Spray dryer parameters for fruit juice drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3, 230-236.

Cortez, R., Luna-Vital, D. A., Margulis, D. & de Mejia, E. G. (2017). Natural pigments: stabilization methods of anthocyanins for food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16, 180-198.

Delgado-Vargas, F., Jiménez, A. R. & Paredes-López, O. (2000). Natural pigments: Carotenoids, anthocyanins, and betalains - characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40, 173-289.

منابع

Anandharamkrishnan, C. & Padma Ishwarya S. (2015). *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation* (1st ed.), John Wiley & Sons, Ltd., USA.

Bhandari, B. R., Snoussi, A., Dumoline, E. D. & Lebert, A. (1993). Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technology*, 11, 1081-1092.

Buchailot, A., Caffin, N. & Bhandari, B. (2009). Drying of lemon myrtle (*Backhousia citriodora*) leaves: Retention of volatiles and color. *Drying Technology*, 27, 445-450.

Cai, Y. Z. & Corke, H. (2000). Production and properties of spray-dried *amaranthus*

Elbandy, M. A & Abdelfadeil, M. G. (2008). Stability of betalain from red beet (*Beta vulgaris*). *Egyptian Journal of Food Science*, 36, 49-60.

Ersus, S. & Yurdagel, U. (2007). Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (*Daucus carota* L.) by spray drier. *Journal of Food Engineering*, 80, 805-812.

Ersus, S. & Yurdagelu, U. (2007). Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (*Daucus carota* L.) by spray drier. *Journal of Food Engineering*, 80, 805-812.

Gallo, L., Llabot, J. M., Allemandi, D., Bucalá, V. & Piña, J. (2011). Influence of spray-drying operating conditions on *Rhamnus purshiana* (*Cáscara sagrada*) extract powder physical properties. *Powder Technology*, 208, 205-214.

Georgiev, V. G., Weber, J., Kneschke, E. M., Nedyalkov Denev, P., Bley, T. & Pavlov, A. I. (2010). Antioxidant activity and phenolic content of betalain extracts from intact plants and hairy root cultures of the red beetroot *Beta vulgaris* cv. Detroit dark red. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65, 105-111.

Gharibzahedi, S. M. T., Razavi, S. H. & Mousavi, S. M. (2015a). Optimization and kinetic studies on the production of intracellular canthaxanthin in fed-batch cultures of *Dietzia natronolimnaea* HS-1. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7, 757-767.

Gharibzahedi, S. M. T., Rostami, H. & Yousefi, S. (2015b). Formulation design and physicochemical stability characterization of nanoemulsions of nettle (*Urtica dioica*) essential oil using a model-based methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39, 2947-2958.

Goula, A. M., Adamopoulos, K. G., Chatzidakis, P. C. & Nikas, V. A. (2006). Prediction of lycopene degradation during a drying process of tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, 74, 37-46.

Kha, T. C., Nguyen, M. H. & Roach, P. D. (2010). Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering*, 98, 385-392.

Kooshesh, S. & Golmakani, M. T. (2015). Optimization of microwave-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*) and evaluating the antioxidant activity of obtained

extract. *Electronic Journal of Food Processing and Preservation*, 7, 39-60.

Krishnaiah, D., Nithyanandam, R. & Sarbatly, R. (2014). A critical review on the spray drying of fruit extract: Effect of additives on physicochemical properties. *Drying Technology*, 54, 449-473.

Lu, X., Wang, J., Al-Qadiri, H. M., Ross, C. F., Powers, J. R., Tang, J., & Rasco, B. A. (2011). Determination of total phenolic content and antioxidant capacity of onion (*Allium cepa*) and shallot (*Allium oschaninii*) using infrared Spectroscopy. *Food Chemistry*, 129, 637-644.

Manchali, S., Murthy, K. N. C., Nagaraju, S. & Neelwarne, B. (2012). Stability of betalain pigments of red beet. In: Neelwarne (Ed.), *Red Beet Biotechnology: Food and Pharmaceutical Applications*. New York, pp . 55-74.

Reddy, K. M., Ruby, L., Lindo, A. & Nair, G. M. (2005). Relative inhibition of lipid peroxidation, cyclooxygenase enzymes and human tumor cells proliferation by natural food color. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 9268-9273.

Stintzing, F. C., Schieber, A. & Carle, R. (2003). Evaluation of colour properties and chemical quality parameters of cactus juices. *European Food Research and Technology*, 216, 303-311.

Strack, D., Vogt, T. & Schliemann, W. (2003). Recent advances in betalain research. *Phytochemistry*, 62, 247-269.

Tee, L. H., Luqman Chuah, A., Pin, K. Y., Abdull Rashih, A. & Yusof, Y. A. (2012). Optimization of spray drying process parameters of *Piper betle* L. (Sirih) leaves extract coated with maltodextrin. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 4, 1833-1841.

Telang, A. M. & Thorat, B. N. (2010). Optimization of process parameters for spray drying of fermented soy milk. *Drying Technology*, 28, 1445-1456.

Toneli, J., Park, K. J., Murr, F. & Negreiros, A. (2006). Spray drying optimization to obtain inulin powder. In: *Proceedings of the 15th International Drying Symposium*, Budapest, Hungary.

Tonon, R. V., Brabet, C. & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by

spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88, 411-418.

Tonon, R. V., Brabet, C. & Hubinger, M. D. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried acai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food Research International*, 43, 907-914.

Yousefi, Sh., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, M., Kobarfard, F. & Zbicinski, I. (2014). Retention rate enhancement of antioxidant and cyaniding 3-o-glucoside components of the reconstituted product from spray-dried black

raspberry juice by optimizing process parameters. *Drying Technology*, 32, 1683-1691.

Yousefi, Sh., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, M., Kobarfard, F. & Zbicinski, I. (2015). Developing spray-dried powders containing anthocyanins of black raspberry juice encapsulated based on fenugreek gum. *Advanced Powder Technology*, 26, 462-469.

Zhou, X., Chen, S. & Yu, Z. (2004). Effects of spray drying parameters on the processing of a fermentation liquor. *Biosystems Engineering*, 88, 193-199.