

DOI:10.22034/FR.2021.28585.1587

بهینه‌سازی فرآیند تولید قرص فشرده سویا با استفاده از روش سطح پاسخ

علی قربانی^۱، رضا امیری چایجان^{۲*} و علی قاسمی^۳

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۴ تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۷

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

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

^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

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

چکیده

زمینه مطالعاتی: قرص‌سازی سبب افزایش چگالی توده در مواد غذایی می‌شود. همچنین تسهیل در حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های انتقال و ذخیره‌سازی را در پی دارد. **هدف:** هدف از انجام این پژوهش تعیین شرایط بهینه به‌منظور دستیابی به بیشترین چگالی و استحکام فشاری و کمترین مقدار چروکیدگی قرص سویا می‌باشد. روش کار: در این پژوهش به منظور انجام آزمایش‌های قرص‌سازی از پودر سویا استفاده شد. اثر شرایط مختلف فرآیند قرص‌سازی روی چگالی ذره‌ای، استحکام فشاری و چروکیدگی قرص مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور قرص‌سازی، از پودر سویا در محتوای رطوبتی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ (w.b.)، دمای مواد خام ورودی به قالب ۲۵، ۴۵ و ۶۵ °C، قطر قالب ۶، ۸ و ۱۰ mm و زمان آسایش تنش ۵، ۱۰ و ۱۵ s استفاده شد و فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ در قالب طرح مرکب مرکزی با شش تکرار در نقطه مرکزی بهینه‌سازی شد. **نتایج:** بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای ($3714/22 \text{ kg/m}^3$) طی فرآیند قرص‌سازی از پودر سویا تحت شرایط دمای مواد خام ورودی به قالب ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰ w.b. و قطر قالب ۱۰ mm به دست آمد. بیشترین مقدار استحکام فشاری (۵۱۸/۵۸ N) در قرص‌سازی از پودر سویا در دمای مواد خام ورودی ۶۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰ w.b. و قطر قالب ۱۰ mm حاصل شد. بیشترین مقدار چروکیدگی قرص فشرده سویا (۵۷٪) طی فرآیند قرص‌سازی در دمای مواد خام ورودی اولیه ۶۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۱۰ mm به دست آمد. شرایط بهینه فرآیند تولید قرص از پودر سویا، دمای مواد خام ورودی ۴۲/۰۳ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰ w.b. و قطر قالب ۱۰ mm بود. **نتیجه‌گیری:** تحت این شرایط بهینه، مقادیر متغیرهای پاسخ چگالی ذره‌ای $4895/49 \text{ kg/m}^3$ ، استحکام فشاری N $432/31$ و چروکیدگی ۹/۰۳٪ با شاخص مطلوبیت ۰/۸۵۳ حاصل شد.

واژگان کلیدی: استحکام فشاری، چروکیدگی، زمان آسایش تنش، قرص‌سازی

مقدمه

سویا حاوی میزان قابل توجهی اسیدهای آمینه است که در بین منابع پروتئین گیاهی دارای بهترین کیفیت

پروتئینی می‌باشد و مقدار اسید آمینه لایزین آن بالا است (داسیلوا و همکاران ۲۰۱۲).

به دلیل چگالی حجمی پایین محصولات کشاورزی، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آنها هزینه بالایی را به همراه دارد (تریل و همکاران ۲۰۰۷).

متراکم‌کردن مواد طی فرآیند قرص‌سازی^۱ یک راه‌حل مناسب به منظور افزایش چگالی حجمی مواد کشاورزی و در نتیجه کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آنها است. از دیگر مزایای استفاده از قرص فشرده، کاهش آلودگی‌های محیطی به دلیل نداشتن ذرات ریز و گردوغبار، افزایش ارزش غذایی در واحد حجم به دلیل فشرده‌سازی و همچنین سهولت کنترل مواد فشرده‌شده از نظر تغذیه‌ای برای تأمین نیاز غذایی است (کالیان و موری ۲۰۱۰).

به منظور افزایش کیفیت قرص، اطلاع از شرایط و نقاط کاری بهینه دستگاه ضروری به نظر می‌رسد، همچنین پیدا کردن روابط بین عوامل موثر و محصول نهایی برای محققین بسیار ارزشمند است، بنابراین بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری مواد غذایی یکی از مهم‌ترین مراحل افزایش بازدهی در صنعت مواد غذایی به شمار می‌رود. برای این منظور روش‌های مختلف تحلیلی و عددی وجود دارد. امروزه برای بهینه‌سازی از روش‌های آماری استفاده می‌گردد که از جمله آنها می‌توان به روش سطح پاسخ (RSM)^۲ اشاره کرد. روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهایی بکار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ترسیم گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه‌ی روش سطح پاسخ شده است. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها قابل برآورد هستند. به‌طور کلی مدل‌هایی که در روش سطح پاسخ ایجاد می-

شوند عموماً درجه دوم هستند (لی و همکاران ۲۰۰۷). افزایش سرعت عمل و افزایش دقت در دستیابی به هدف مورد نظر از جمله معیارهایی هستند که برای ارزیابی کیفیت یک روش بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند (آصفی و همکاران ۲۰۱۵؛ وانی و همکاران ۲۰۱۷). یافتن بهترین شرایط قرص‌سازی از مواد کشاورزی، به منظور دستیابی به بالاترین کیفیت قرص از جمله کمترین چروکیدگی و بالاترین استحکام فشاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، یافتن شرایط بهینه برای متغیرهای فرآیند قرص‌سازی از جمله محتوای رطوبتی، دمای مواد خام ورودی به قالب و اندازه قالب ضروری می‌باشد. سویا در تهیه انواع سس‌ها، شیرسویا، غذاهای جایگزین گوشت و غذاهای آماده کاربرد دارد (داسیلوا و همکاران ۲۰۱۲).

با توجه به مطالب بیان شده، تاکنون هیچ تحقیقی در زمینه بهینه‌سازی تولید قرص از پودر سویا انجام نشده است. با توجه به کاربردهای فرآیند قرص‌سازی از پودر سویا در تغذیه انسان، هدف از این پژوهش بررسی اثر متغیرهای مستقل محتوای رطوبتی، قطر قالب، دمای مواد ورودی و زمان آسایش تنش بر خواص مکانیکی و فیزیکی قرص‌های ساخته‌شده از پودر سویا و تعیین شرایط بهینه به منظور دستیابی به بیشترین چگالی و استحکام فشاری و کمترین مقدار چروکیدگی قرص می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی مواد خام اولیه

به منظور انجام آزمایش‌های این پژوهش، کنجاله سویای برزیلی از شرکت دست‌چین اصفهان تهیه شد. به منظور پودرکردن ذرات کنجاله سویا از یک آسیاب چکشی استفاده شد. بعد از خردکردن، به منظور همگن کردن اندازه ذرات، مواد خردشده با استفاده از یک الک آزمایشگاهی (ساخت شرکت آزمون، تهران) با اندازه مش یک میلی‌متر الک شدند. در نهایت پودر حاصله

^۱ Tablet production

^۲ Response Surface Method

فولادی، محفظه پیش تراکم، قالب تشکیل پلت و مسدود کننده انتهای قالب بود. قسمت پیش‌تراکم مخروطی شکل به طول ۱۵۰ mm با قطر ورودی ۳۰ mm و قطر خروجی ۱۲ mm داشت که در انتهای قسمت پیش‌تراکم، قالب تشکیلات با قطر و طول مشخص (قابل تعویض) قرار گرفته بود. به‌منظور قرائت میزان فشار سیلندر، از یک فشارسنج عقربه‌ای با دقت ۱ PSI استفاده شد. به منظور کنترل زمان آسایش تنش، مقدار و جهت حرکت جک هیدرولیک با استفاده از یک شیر کنترل جهت چهار راهه سه وضعیتی (۴/۳) مرکز بسته با تحریک سولنوئیدی کنترل می‌شد. در ابتدا مواد داخل سیلندر استوانه‌ای ورودی قالب ریخته می‌شدند سپس با اعمال فشار توسط جک هیدرولیک (با سرعت جابجایی mm/s ۶) به پیستون فولادی تعبیه شده درون قالب مواد وارد قسمت پیش تراکم قالب می‌شدند و با اعمال فشار بیشتر و عبور مواد از این قسمت مواد نیمه‌فشرده شده وارد یک قالب ته بسته (قالب تشکیل قرص) می‌شدند و قرص فشرده در آنجا تشکیل می‌شد. با رسیدن فشار هیدرولیک به ۷۵ bar حرکت جک هیدرولیک متوقف می‌شد و مواد جهت کاهش تنش و جلوگیری از برگشت فنری قرص به مدت مشخصی (سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ s) در همان حالت درون قالب ته بسته نگهداری می‌شدند و پس از اتمام فرآیند آسایش تنش فشار جک از روی مواد برداشته و قرص تشکیل شده از انتهای قالب خارج می‌شد.

پس از ایجاد قرص‌ها برای رساندن رطوبت آنها به سطح مناسب (w.b. ۱۲٪ برای انبارداری، قرص‌ها با استفاده از روش آون در دمای °C ۲۵ خشک شدند (۲۰۰۳ ASAE S358.2).

برای انجام آزمایش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت اولیه پودر سویا، پنج نمونه ۱۰ گرمی از آن در داخل آون (ممرت^۱ مدل UNE 500 ساخت کشور آلمان) با دمای °C ۱۰۵ به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن نمونه‌ها به وزن ثابت قرار داده شدند (داسیلوا و همکاران ۲۰۱۲). مقدار رطوبت اولیه پودر سویا برابر با ۲۳٪ w.b. محاسبه شد. قبل از انجام آزمایش‌های قرص‌سازی به منظور ایجاد چسبندگی مناسب بین ذرات پودر سویا و رساندن محتوای رطوبتی آنها به سطوح مورد مطالعه به آنها آب‌مقطر (در سه سطح و محتوای رطوبتی ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ w.b. و همچنین مقدار ۴۵ درصد وزنی ملاس چغندر قند (به صورت محلول در آب) اضافه شد (مورالیدحران و همکاران ۲۰۱۶). به عبارت دیگر نسبت آب به ملاس چغندر قند در سطوح محتوای رطوبتی ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ w.b. به ترتیب برابر با ۰/۶۲، ۱/۱ و ۱/۷۶ بود. محلول آب مقطر و ملاس چغندر قند با استفاده از یک آبپاش به پودر سویا اضافه شد (ظفری و همکاران ۱۳۹۲). پس از اضافه‌نمودن محلول آب مقطر و سویا، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای °C ۴ درون کیسه‌های پلاستیکی زیپ کیپ (به منظور جلوگیری از تبادل رطوبت با محیط) درون یخچال نگهداری شدند تا رطوبت به‌طور یکنواخت در نمونه‌ها جذب و توزیع گردد.

فرآیند تولید قرص توسط دستگاه پرس

به‌منظور تولید قرص‌های استوانه‌ای از خمیر سویای تهیه‌شده از یک دستگاه پرس هیدرولیکی در مقیاس آزمایشگاهی و یک قالب ته‌بسته استفاده شد (شکل ۱). این دستگاه در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی‌سینا ساخته شد. دستگاه پرس هیدرولیکی شامل شاسی و یک جک هیدرولیک مجهز به سیستم کنترل فشار و سرعت بود. قالب مورد استفاده به منظور تولید قرص‌های فشرده شامل چهار بخش اصلی پیستون

^۱Memmert

متغیرهای پاسخ

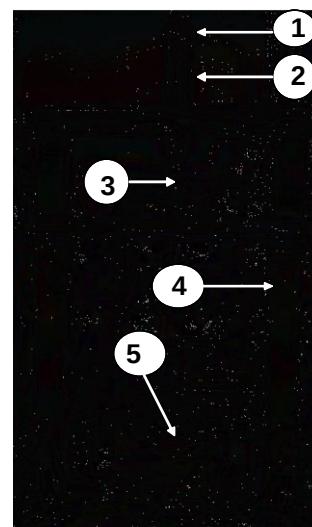
برای اندازه‌گیری استحکام فشاری قرص‌های تولید شده از پودر سویا با استفاده از آزمون فشاری از دستگاه آنالیز بافت مواد شرکت Hounsfield مدل K-S H50 ساخت کشور انگلستان استفاده شد. روش آزمایش بدین‌صورت بود که یک عدد قرص فشرده استوانه‌ای شکل (در جهت قطر) بین دو فک ثابت و متحرک تخت دستگاه قرار می‌گرفت. سپس فک متحرک با سرعت ثابت ۱ mm/s به سمت پایین حرکت کرده و قرص استوانه‌ای شکل را در راستای قطر تا هنگام ترک برداشتن و شکستگی آن فشرده می‌کرد و مقدار نیرو و جابجایی در حافظه یک دیتالاگر با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰۰ داده در دقیقه ثبت می‌شدند. در پایان، حداکثر نیروی ثبت شده برای شکستن قرص به عنوان استحکام فشاری در نظر گرفته شد. آزمون استحکام فشاری در سه تکرار برای هر نمونه انجام شد (قاسمی و همکاران ۲۰۱۸).

برای اندازه‌گیری چگالی ذره‌ای قرص‌ها، یک عدد قرص درون استوانه‌ای مدرج که داخلش به حجم ۵۰ ml (قابل خواندن تا ۰/۵ ml) تلوئن بود، قرار داده شد. سپس بر اساس تغییرات حجم استوانه مدرج حجم هر قرص فشرده اندازه‌گیری و ثبت شد. در پایان با داشتن حجم و وزن هر قرص، چگالی ذره‌ای از رابطه (۱) محاسبه گردید (ظفری و همکاران ۲۰۱۴).

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \quad (1)$$

ρ_p چگالی ذره‌ای قرص (g/mm^3)، m جرم قرص (g) و V_p حجم ذره‌ای قرص (mm^3) است.

چروکیدگی یکی از معیارهای ارزیابی تغییرات فیزیکی محصول طی فرآیند خشک‌کردن و انبارداری می‌باشد. برای اندازه‌گیری چروکیدگی محصول، ارتفاع و قطر یک قرص فشرده استوانه‌ای شکل در سه جهت مختلف، یک بار پیش از فرآیند خشک‌کردن و یک بار نیز در پایان فرآیند خشک‌شدن توسط یک کولیس دیجیتالی با دقت



شکل ۱- دستگاه پرس هیدرولیک به همراه قالب استفاده شده به منظور تولید قرص فشرده (۱- گنج کنترل فشار، ۲- جک هیدرولیک، ۳- قالب قرص، ۴- شاسی و ۵- پاورپک هیدرولیک)

Figure 1-Hydraulic press apparatus with die used for compressed tablet production (1-pressure control, 2-hydraulic jack, 3- tablet die, 4-chassis, 5-hydraulic power pack)

متغیرهای مستقل

در این تحقیق اثر محتوای رطوبتی مواد خام اولیه بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی قرص‌های تشکیل شده از پودر سویا، در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ (w.b.) بررسی شد. به دلیل اینکه اطلاعات قبلی برای فشرده سازی پودر سویا در دسترس نبود این سطوح رطوبتی بر اساس پیش آزمایش‌های اولیه انتخاب شدند. از فرآیند رطوبت‌دهی به منظور رساندن رطوبت اولیه مواد به رطوبت مورد نیاز در آزمایش، استفاده شد. اثر دمایی مواد ورودی به قالب بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی قرص، در سه سطح ۲۵، ۴۵ و ۶۵ °C بررسی شد. اندازه قطر قالب دارای سه سطح ۶، ۸ و ۱۰ mm و زمان آسیایش تنش در آزمایش‌ها ۵، ۱۰ و ۱۵ s بود. تمامی این سطوح به طور تجربی و بر اساس نتایج پیش-آزمایش‌ها، انتخاب شدند.

آسایش تنش (s) و قطر قالب (mm) به‌عنوان متغیرهای مستقل و چگالی ذره‌ای (mm^3)، استحکام فشاری (N) و چروکیدگی (%) به‌عنوان متغیرهای وابسته (متغیرهای پاسخ) تعریف شدند. سطوح متغیرهای مستقل و مقادیر کدبندی‌شده قرص‌های تولید شده از پودر سویا در جدول ۱ و طرح آزمایش‌های تولید قرص از پودر سویا در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر مربوطه

Table 1- Independent process variables and its values

Input variables	Parameter	Code and levels		
		-1	۰	1
Product temperature $^{\circ}\text{C}$	X_1	25	45	65
Moisture content (%)	X_2	30	40	50
Relaxation time (s)	X_3	5	10	15
Die diameter (mm)	X_4	6	8	10

بهینه‌سازی فرآیند قرص‌سازی بر مبنای بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای و استحکام فشاری و کمترین مقدار چروکیدگی در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

ارزیابی چگالی ذره‌ای

بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای طی فرآیند قرص‌سازی از پودر سویا برابر با $3714/22 \text{ kg/m}^3$ تحت شرایط دمایی مواد خام ورودی به قالب 25°C ، زمان آسایش تنش s ۵، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۱۰ mm و کمترین مقدار آن برابر با $557/23 \text{ kg/m}^3$ در دمایی مواد خام ورودی 65°C ، زمان آسایش تنش s ۵، محتوای رطوبتی ۵۰٪ و قطر قالب ۶ mm به دست آمد.

جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمایی مواد خام ورودی، زمان آسایش تنش، محتوای رطوبتی و قطر قالب بر مقدار چگالی ذره‌ای قرص از پودر سویا را

اندازه‌گیری شد. سپس میانگین قطر هندسی قرص از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$d = (a \times b \times c)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، d قطر میانگین هندسی (mm) و a ، b و c به‌ترتیب قطرهای یک قرص فشرده در سه جهت مختلف (mm) می‌باشند.

حجم قرص قبل و بعد از فرآیند خشک‌شدن از معادله (۳) به دست آمد.

$$V = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 h \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، V حجم قرص استوانه‌ای (mm^3) و h ارتفاع قرص (mm) می‌باشند.

برای محاسبه درصد چروکیدگی قرص از رابطه (۴) استفاده شد.

$$S = \left(1 - \frac{V_d}{V_w} \right) \times 100 \quad (4)$$

که در رابطه (۴) S درصد چروکیدگی قرص V_w حجم قرص قبل از خشک‌شدن (mm^3) و V_d حجم قرص بعد از خشک شدن (mm^3) هستند (قاسمی و امیری چایجان، ۲۰۱۸).

تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند قرص‌سازی از روش سطح پاسخ استفاده شد. برازش متغیرهای پاسخ و بهینه‌سازی فرآیند قرص‌سازی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۰ انجام شد؛ تجزیه و تحلیل واریانس بر روی ضرایب مدل درجه دوم با این نرم‌افزار انجام گرفت. هر فاکتور در طرح مرکب مرکزی در سه سطح مختلف (+۱، ۰ و -۱)، دو نقطه محوری و شش تکرار در نقطه مرکزی مورد مطالعه قرار گرفت و شرایط نقاط بهینه بر اساس تابع مطلوبیت تعیین شدند. از طرح مرکب مرکزی روش سطح پاسخ برای ساختن یک مدل مرتبه دوم برای متغیرهای پاسخ استفاده شد. در آزمایش‌های تولید قرص از پودر سویا، دمایی مواد خام ورودی به قالب ($^{\circ}\text{C}$)، محتوای رطوبتی (%، زمان

نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متغیر مستقل قطر قالب در سطح احتمال ۱٪ بر مقدار چگالی معنی‌دار بود و اثر متغیرهای مستقل دمای مواد خام ورودی، زمان آسایش تنش و محتوای رطوبتی معنی‌دار نبودند و همچنین اثر متقابل دمای مواد خام ورودی $\times$ زمان آسایش تنش در سطح احتمال ۵٪ و اثر متقابل محتوای رطوبتی $\times$ قطر قالب در سطح احتمال ۱٪ بر مقدار چگالی ذره‌ای معنی‌دار بودند. شکل ۲ اثرات متقابل دمای مواد خام ورودی $\times$ زمان آسایش تنش و محتوای رطوبتی $\times$ قطر قالب بر مقدار چگالی ذره‌ای قرص‌های تشکیل شده از پودر سویا را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش همزمان قطر قالب و کاهش محتوای رطوبتی مقدار چگالی ذره‌ای قرص فشرده افزایش یافت. از آنجایی که طی فرآیند خشک‌کردن قرص‌هایی با محتوای رطوبتی بالاتر، حجم آب بیشتری از بافت محصول تبخیر می‌شود، بنابراین با افزایش محتوای رطوبتی چگالی ذره‌ای قرص فشرده خشک‌شده نیز کاهش یافت (قاسمی و همکاران ۲۰۱۸). رطوبت عامل مهمی در فرآیند فشرده‌سازی است که در محدوده بهینه خود به صورت یک فیلم بایندر (اتصال دهنده) عمل می‌کند. بایندر نیروهای جاذبه بین مولکولی را افزایش داده و در نتیجه چسبندگی بین ذرات افزایش یافته و فضای خالی بین ذرات کاهش می‌یابد. در نتیجه چگالی قرص‌های تولیدشده افزایش می‌یابد (زین‌الدین و همکاران ۲۰۱۴). همچنین با افزایش قطر قالب از آنجا که مقدار ماده خام بیشتری وارد قالب می‌گردد بنابراین چگالی ذره‌ای قرص‌ها نیز با افزایش قطر قالب افزایش یافت. تیراراتانان و همکاران (۲۰۱۱) خواص فیزیکی قرص‌های ساخته‌شده از ساقه سورگوم، کلش ذرت و کلش کاه را مورد بررسی قرار دادند و به نتایج مشابهی با این

پژوهش دست یافتند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش قطر قالب، چگالی افزایش می‌یابد.

با کاهش همزمان دمای مواد خام ورودی به قالب و افزایش زمان آسایش تنش، مقدار چگالی ذره‌ای افزایش یافت (شکل ۲). دلیل احتمالی این پدیده آن است که با افزایش دمای مواد خام ورودی به قالب مقدار انبساط و تغییرات حجم مواد نیز افزایش یافته و همچنین در اثر آب شدن چربی موجود در بافت محصول نیز مقدار فشار وارد بر مواد در اثر کاهش اصطکاک بین مواد و دیواره قالب کمتر شده و در نتیجه باعث کاهش چگالی ذره‌ای قرص تشکیل شده از پودر سویا شد. بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای در قرص‌سازی از پودر سویا برابر $3714/22$ کیلوگرم بر مترمربع در دمای مواد خام ورودی ۲۵ درجه سلسیوس، زمان آسایش تنش ۵ ثانیه، محتوای رطوبتی ۵۰ درصد و قطر قالب ۱۰ میلی-متر و کمترین مقدار آن $557/23$ کیلوگرم بر مترمربع در دمای مواد خام ورودی ۶۵ درجه سلسیوس، زمان آسایش تنش ۵ ثانیه، محتوای رطوبتی ۵۰ درصد و قطر قالب ۶ میلی-متر به دست آمد.

برخلاف نتایج این تحقیق، رن و همکاران (۲۰۰۵) طی تحقیقی با بررسی تاثیر نوع، محتوای رطوبتی مواد خام و دمای مواد خام ورودی به قالب و فشار وارد بر مواد طی فرآیند فشرده‌سازی بر خواص قرص دریافتند که دمای مواد خام، اثر افزایشی بر چگالی قرص دارد. دلیل این پدیده را می‌توان در ترکیبات ماده اولیه بیان کرد که سلولز بوده و نتایج متفاوتی در مقایسه با مواد اولیه تحقیق حاضر ارائه داده است. معادله‌ی نهایی بر مبنای متغیرهای مستقل واقعی برای پیش‌بینی مقدار چگالی ذره‌ای از قرص‌سازی پودر سویا به صورت رابطه (۵) با ضریب تبیین $R^2=0.95$ به دست آمد.

$$\rho = 4.7 \times 10^{-3} - 1.2 \times 10^{-3} D - 7.5 \times 10^{-7} T \times RT - 5.1 \times 10^{-6} MC \times D + 5.9 \times 10^{-8} T^2 + 7.5 \times 10^{-5} D^2 \quad (5)$$

D قطر قالب (mm) می‌باشند.

که در رابطه‌ی $(T, ^\circ\text{C})$ دمای مواد خام ورودی RT

زمان آسایش تنش (s) ، MC محتوای رطوبتی (%w.b.) و

جدول ۲- آزمایش‌های مختلف قرص‌سازی بر اساس طرح مرکب مرکزی با استفاده از روش سطح پاسخ

Table 2- Different experiments of tablet making based on central composit design using response surface method

Experiment number	Input variable values			
	Die diameter (mm)	Relaxation time (s)	Moisture content (%)	Product temperature ($^\circ\text{C}$)
1	6(-1)	5(-1)	50(+1)	25(-1)
2	10(+1)	5(-1)	30(-1)	25(-1)
3	8(0)	15(+1)	50(+1)	45(0)
4	6(-1)	15(+1)	30(-1)	65(+1)
5	10(+1)	15(+1)	50(+1)	25(-1)
6	8(0)	15(+1)	40(0)	45(0)
7	6(-1)	15(+1)	30(-1)	25(-1)
8	8(0)	10(0)	40(0)	25(-1)
9	10(+1)	15(+1)	50(+1)	65(+1)
10	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
11	10(+1)	5(-1)	50(+1)	25(-1)
12	6(-1)	15(+1)	50(+1)	65(+1)
13	6(-1)	5(-1)	30(-1)	65(+1)
14	10(+1)	5(-1)	30(-1)	65(+1)
15	10(+1)	15(+1)	30(-1)	65(+1)
16	10(+1)	5(-1)	50(+1)	65(+1)
17	8(0)	5(-1)	40(0)	45(0)
18	8(0)	10(0)	30(-1)	45(0)
19	6(-1)	10(0)	40(0)	45(0)
20	10(+1)	15(+1)	30(-1)	25(-1)
21	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
22	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
23	6(-1)	5(-1)	50(+1)	65(+1)
24	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
25	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
26	6(-1)	5(-1)	30(-1)	25(-1)
27	8(0)	10(0)	40(0)	65(+1)
28	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
29	8(0)	10(0)	40(0)	45(0)
30	6(-1)	15(+1)	50(+1)	25(-1)

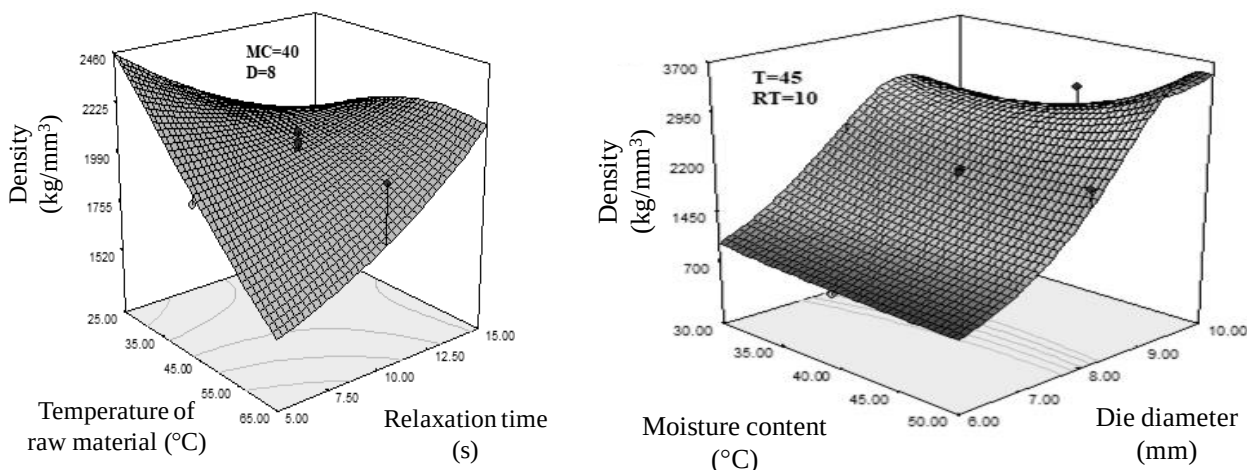
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مقدار چگالی ذره‌ای قرص سویا

Table 3- Results of variance analysis for particle density of soybean tablet

Sources	Mean squar	Sum of squar	F -Value	p-value
Model	2.833×10^{-7}	3.966×10^{-6}	20.87	<0.0001**
Product temperature (A)	4.288×10^{-8}	4.288×10^{-8}	3.16	0.0958
Relaxation time (B)	9.585×10^{-9}	9.585×10^{-9}	0.73	0.4075
Moisture content (C)	2.116×10^{-8}	2.116×10^{-8}	1.56	0.2309
Die diameter (D)	2.930×10^{-6}	2.930×10^{-6}	215.86	<0.0001**
A×B	9.008×10^{-8}	9.008×10^{-8}	6.64	0.0211*
A×C	2.104×10^{-8}	2.104×10^{-8}	1.55	0.2322
A×D	4.088×10^{-8}	4.088×10^{-8}	3.01	0.1031
B×C	8.367×10^{-9}	8.367×10^{-9}	0.62	0.4446
B×D	5.213×10^{-8}	5.213×10^{-8}	3.84	0.0689
C×D	1.619×10^{-7}	1.619×10^{-7}	11.93	0.0035*
A ²	1.439×10^{-9}	1.439×10^{-9}	0.11	0.7492
B ²	1.518×10^{-10}	1.518×10^{-10}	0.011	0.9172
C ²	1.619×10^{-7}	3.829×10^{-9}	0.28	0.6031

D ²	1.439×10^{-9}	2.343×10^{-7}	17.26	0.0008**
Lake of fit	1.518×10^{-10}	2.033×10^{-7}	358.18	0.103
Residual	3.829×10^{-9}	2.833×10^{-10}		
Total		4.169×10^{-6}		

** Significant difference at 1%, * Significant difference at 5%



شکل ۲- اثرات متقابل متغیرهای مختلف بر چگالی ذره‌ای قرص‌های ساخته شده از پودر سویا (RT زمان آسایش تنش (s)، MC محتوای رطوبتی (%w.b.)، D قطر قالب (mm) و T دمای مواد خام ورودی به قالب (°C))

Figure 2-Interaction effect of different variables on particle density of produced tablets from soybean powder (RT is relaxation time (s), MC is moisture content (%w.b.), D is die diameter (mm) and T is temperature of input raw material (°C))

ارزیابی استحکام فشاری

بیشترین مقدار استحکام فشاری در فرآیند قرص‌سازی از پودر سویا برابر با ۵۱۸/۵۸ N در دمای مواد خام ورودی به قالب ۶۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰٪ W.b. و قطر قالب ۱۰ mm حاصل شد و کمترین مقدار آن برابر ۳۳۱/۴۵ N در دمای مواد خام ورودی به قالب ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۰ s، محتوای رطوبتی ۴۰٪ w.b. و قطر قالب ۶ mm به دست آمد. جدول ۴ نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای مواد خام ورودی به قالب، زمان آسایش تنش، محتوای رطوبتی و قطر قالب را بر مقدار استحکام فشاری قرص فشرده سویا نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متغیر مستقل دمای مواد خام ورودی در سطح احتمال ۱٪ و اثر متغیر مستقل محتوای رطوبتی در سطح احتمال ۵٪ بر مقدار استحکام فشاری قرص‌های ساخته شده از پودر سویا معنی‌دار بودند و فاکتورهای دیگر اثر معنی-

داری بر استحکام فشاری قرص نداشتند. همچنین اثر متقابل دمای مواد خام ورودی × قطر قالب و اثر متقابل محتوای رطوبتی × قطر قالب در سطح احتمال ۱٪ بر مقدار استحکام فشاری قرص معنی‌دار بود. شکل ۳ اثرات متقابل دمای مواد خام ورودی × قطر قالب و اثر متقابل محتوای رطوبتی × قطر قالب را بر مقدار استحکام فشاری قرص‌های ساخته شده از پودر سویا نشان می‌دهد.

همان‌طور که از نتایج شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش هم‌زمان دمای مواد خام و قطر قالب، استحکام فشاری قرص افزایش یافت. علت این امر را می‌توان به بالا بودن درصد پروتئین خام پودر سویا نسبت داد. از آنجایی که پروتئین بسیار حساس به دماست، در دماهای بالا پروتئین دناتوره شده (بافت آن نرم و چسبنده می‌شود) و در نتیجه سبب تشکیل پیوندهای مستحکم‌تری بین ذرات طی فرآیند فشرده‌سازی می‌شود (قاسمی و همکاران ۲۰۱۸). همچنین با افزایش قطر

قالب مواد بیشتری وارد قالب شده و سطح مقطع قرص (مقاومت بیشتر در برابر اعمال نیروهای فشاری) نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث افزایش استحکام فشاری قرص شد. ظفیری و کیانمهر (۲۰۱۰) با بررسی اثر خواص مواد خام و اندازه قطر قالب بر روی چگالی قرص‌های تولید شده از زباله‌های شهری به منظور تولید کمپوست دریافتند که اعمال پیش‌تیمار حرارتی به مواد سبب می‌شود که نشاسته و پروتئین موجود در ثرص به‌عنوان یک اتصال‌دهنده عمل کنند و در نتیجه دوام محصول را افزایش دهند.

با توجه به نتایج شکل ۳، با افزایش هم‌زمان قطر قالب و محتوای رطوبتی، مقدار استحکام فشاری قرص افزایش یافت. زیرا با افزایش محتوای رطوبتی، پیوندهای ایجاد شده بین ذرات به دلیل بیشتر شدن نیروی واندروالسی، قوی‌تر شده و در نتیجه استحکام فشاری افزایش می‌یابد. همچنین نشاسته موجود در سویا با در معرض

رطوبت و حرارت قرار گرفتن ژلاتینه شده و پروتئین آن نیز دنا توره می‌گردد که این امر ایجاد استحکام بیشتر بین پیوندهای قرص را در پی دارد (قاسمی و همکاران ۲۰۱۸). طی تحقیقی روی فرآیند قرص‌سازی از خاک اره به منظور استفاده در نیروگاه‌های تولید بیو سوخت، رابطه‌ای مثبتی بین قطر قالب و محتوای رطوبتی گزارش شد (نیلسون و همکاران ۲۰۰۹). محتوای رطوبتی زمانی که ترکیبات محلول در آب از جمله: شکر، نشاسته، کربنات سدیم، فسفات سدیم، نمک، پتاسیم و کلرید کلسیم در خوراک وجود دارد، باعث افزایش دوام قرص می‌شود (کالیان و همکاران ۲۰۰۹).

معادله‌ی نهایی بر مبنای متغیرهای مستقل واقعی برای پیش‌بینی مقدار استحکام فشاری (CS) قرص‌های ساخته‌شده از پودر سویا با ضریب تبیین ۰/۸۸ ($R^2=0.88$) در رابطه (۶) ارائه شده است.

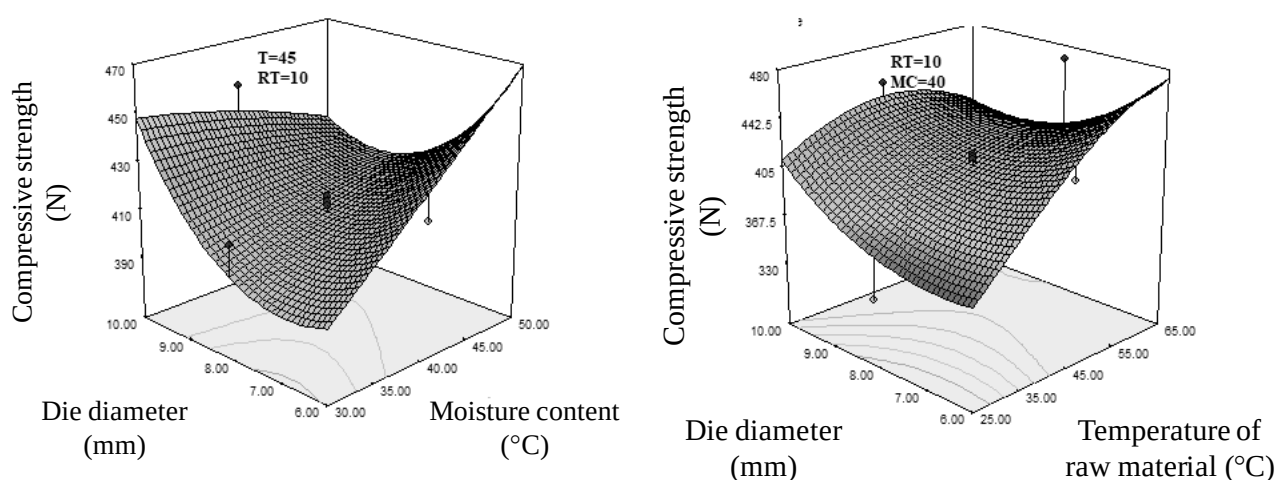
$$CS = 5.99 \times 10^{-3} - 6.6 \times 10^{-5}T - 7.8 \times 10^{-5}MC + 4.1 \times 10^{-6}T \times D + 6.5 \times 10^{-6}MC \times D \quad (6)$$

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مقدار استحکام فشاری موجود در تولید قرص از پودر سویا

Table 4- Results of variance analysis for compressive strength of soybean tablet

Sources	Mean squar	Sum of squar	F -Value	p-value
Model	1.115×10^{-7}	1.560×10^{-6}	7.68	0.0002**
Product temperature (A)	5.884×10^{-7}	5.844×10^{-7}	40.53	<0.0001**
Relaxation time (B)	6.906×10^{-9}	6.906×10^{-9}	0.48	0.5009
Moisture content (C)	9.693×10^{-8}	9.693×10^{-8}	6.68	0.0208*
Die diameter (D)	9.690×10^{-9}	9.690×10^{-9}	0.67	0.4267
A×B	2.490×10^{-8}	2.490×10^{-8}	1.71	0.2101
A×C	3.389×10^{-9}	3.389×10^{-9}	0.23	0.6360
A×D	4.256×10^{-7}	4.256×10^{-7}	29.31	<0.0001**
B×C	3.711×10^{-8}	3.711×10^{-8}	2.56	0.1307
B×D	2.737×10^{-7}	9.642×10^{-9}	0.66	0.4279
C×D	5.064×10^{-8}	2.737×10^{-7}	18.85	0.0006**
A ²	9.053×10^{-10}	5.064×10^{-8}	3.49	0.0815
B ²	5.934×10^{-10}	9.053×10^{-10}	0.062	0.8060
C ²	4.607×10^{-8}	5.934×10^{-10}	0.041	0.8425
D ²	1.439×10^{-9}	4.607×10^{-8}	3.17	0.0951
Lake of fit	2.163×10^{-8}	2.163×10^{-7}	73.49	0.112
Residual	2.943×10^{-10}	1.472×10^{-9}		
Total		1.778×10^{-6}		

** Significant difference at 1%, * Significant difference at 5%



شکل ۳- اثرات متقابل متغیرهای مختلف بر استحکام فشاری قرص‌های تشکیل شده از پودر سویا (RT زمان آسایش تنش (s)، MC محتوای رطوبتی (%w.b.) و T دمای مواد خام ورودی به قالب (°C))

Figure 3-Interaction effect of differnt variables on compressive strength of produced tablets from soybean powder (RT is relaxation time (s), MC is moisture content (%w.b.), D is die diameter (mm) and T is temperature of input raw material (°C))

ارزیابی چروکیدگی

بیشترین مقدار چروکیدگی در قرص‌سازی از پودر سویا برابر با ۵۷٪ در دمای مواد خام ورودی ۶۵ °C، زمان آسایش تنش ۱۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰ w.b. و قطر قالب ۶ mm به دست آمد و کمترین مقدار آن برابر با ۸/۶۳٪ در دمای مواد خام ورودی ۲۵ °C، زمان آسایش تنش ۵ s، محتوای رطوبتی ۵۰ w.b. و قطر قالب ۱۰ mm به دست آمد. جدول ۵ نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای مواد خام ورودی، زمان آسایش تنش، محتوای رطوبتی و قطر قالب را بر مقدار چروکیدگی قرص سویا نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر متغیر مستقل دمای مواد خام ورودی و قطر قالب در سطح احتمال ۱٪ و اثر متغیر مستقل زمان آسایش تنش در سطح احتمال ۵٪ بر مقدار چروکیدگی قرص‌های ساخته شده از پودر سویا معنی‌دار بودند و فاکتورهای دیگر اثر معنی‌داری بر چروکیدگی قرص سویا نداشتند. همچنین اثر متقابل زمان آسایش تنش × محتوای رطوبتی، اثر متقابل زمان آسایش تنش × قطر قالب و اثر متقابل محتوای رطوبتی × قطر قالب در سطح احتمال ۱٪ بر مقدار چروکیدگی قرص معنی‌دار بودند.

مقدار p-Value، عامل عدم برازش برای چروکیدگی، برابر با ۰/۱۱۳ به دست آمد و نشان‌دهنده این بود که مدل پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ به خوبی داده‌های واقعی چروکیدگی را برازش می‌کند. شکل ۴ اثرات متقابل زمان آسایش تنش × قطر قالب، اثرات متقابل زمان آسایش تنش × محتوای رطوبتی، اثرات متقابل محتوای رطوبتی × قطر قالب و اثر مستقل دمای مواد خام ورودی به قالب بر مقدار چروکیدگی قرص‌های ساخته شده از پودر سویا را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل نمودارها شکل ۴ نشان داد که با افزایش هم‌زمان قطر قالب و زمان آسایش تنش مقدار چروکیدگی افزایش یافت. دلیل آن پدیده این است که با افزایش قطر قالب به دلیل آنکه مقاومت بافت محصول برای انتقال رطوبت از مرکز به سطح قرص افزایش می‌یابد در نتیجه زمان بیشتری برای خشک‌کردن قرص مورد نیاز است که سبب ایجاد تنش‌های حرارتی بیشتر می‌گردد همچنین با افزایش قطر قرص فشرده اختلاف رطوبت بین سطح قرص و مرکز آن طی فرآیند خشک‌شدن افزایش می‌یابد که باعث افزایش گرادیان‌های محتوای رطوبتی و افزایش تنش‌های رطوبتی می‌شود و

چروکیدگی قرص فشرده طی فرآیند خشک‌کردن به نتایج کشابهی دست یافتند آنها نشان دادند که با افزایش زمان ماندگاری مواد داخل قالب، چروکیدگی قرص افزایش یافت.

با توجه به نتایج شکل ۴ مشاهده شد که با افزایش هم-زمان محتوای رطوبتی و افزایش قطر قالب، چروکیدگی افزایش یافت. همچنین نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش دمای مواد خام ورودی به قالب مقدار چروکیدگی افزایش یافت. زیرا با افزایش دمای مواد خام ورودی به قالب، در اثر اعمال حرارت بیشتر بافت محصول نرم‌تر شد و همچنین با افزایش دمای مواد تغییرات حجم در اثر سرد شدن و انقباض قرص پس از خروج از قالب نیز بیشتر می‌شود، در نتیجه همین مسئله سبب ایجاد چروکیدگی بیشتر در قرص گردید. دیویدسن و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی چروکیدگی ذرات خاک اره در طول پیرولیسیس (تغییر شیمیایی در اثر حرارت) دریافتند که با افزایش درجه حرارت از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰°C، قطر قرص‌ها از ۵٪ به ۲۳٪ کاهش یافت و چروکیدگی بیشتر شد.

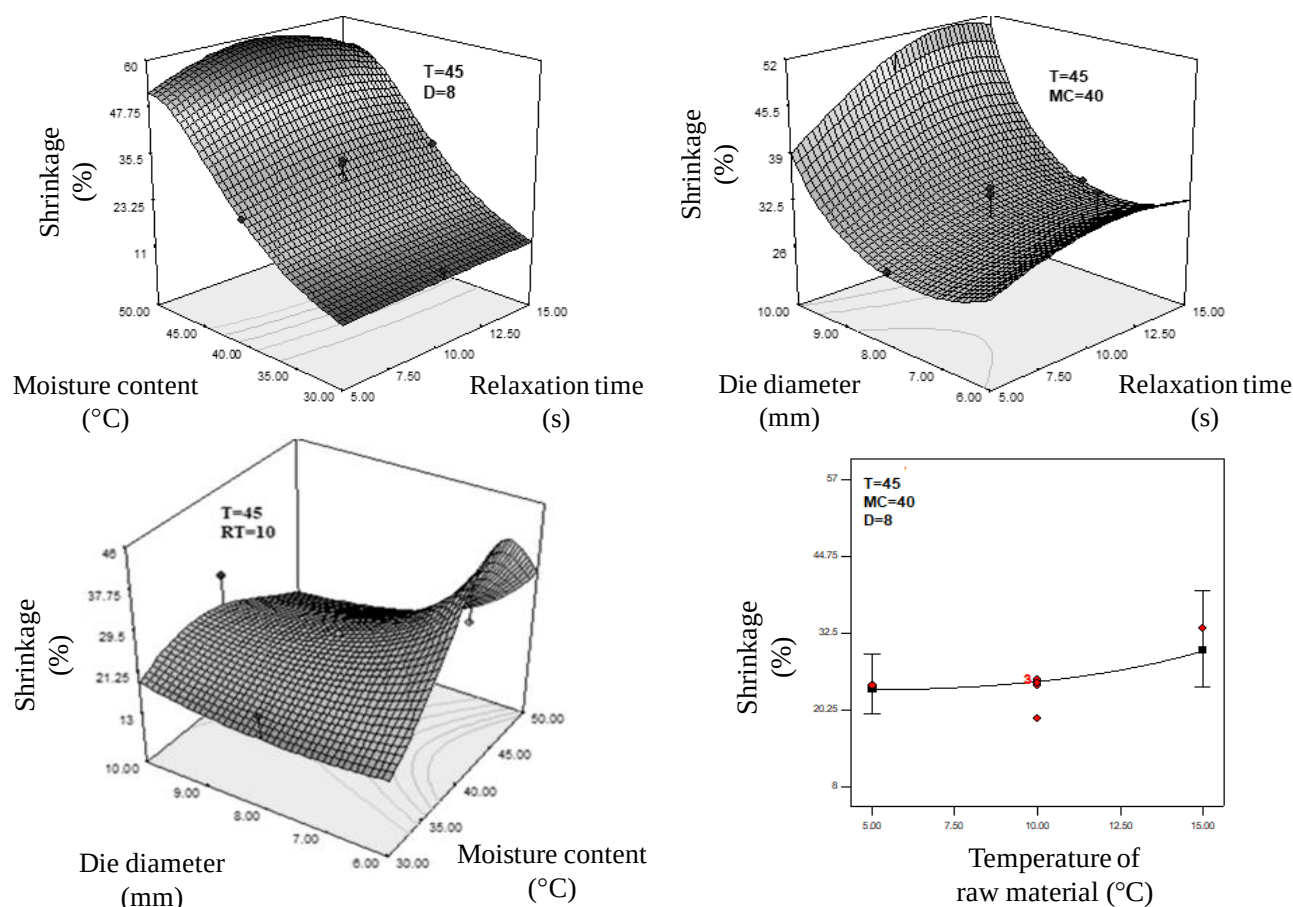
در نتیجه سبب افزایش مقدار چروکیدگی قرص فشرده می‌گردد (قاسمی و امیری چایجان ۲۰۱۸).
با توجه به نتایج شکل ۴ مشخص شد که با افزایش هم-زمان محتوای رطوبتی و زمان آسایش تنش، مقدار چروکیدگی افزایش یافت. از آنجایی که با افزایش محتوای رطوبتی طی فرآیند خشک‌شدن قرص تا رسیدن به سطح محتوای رطوبتی ایمن (۱۲ w.b.٪) مقدار آب بیشتری باید از بافت محصول خارج شود در نتیجه زمان فرآیند خشک‌شدن نیز افزایش می‌یابد و همین مسئله سبب اعمال تنش‌های حرارتی بیشتر و تخریب بیشتر بافت محصول می‌شود که افزایش مقدار چروکیدگی را به همراه دارد. (قاسمی و همکاران ۲۰۱۷).
علت احتمالی افزایش چروکیدگی با افزایش زمان آسایش تنش این است که از آنجایی که زمان آسایش تنش سبب کاهش فشار ترگر (فشار آب حبس شده در بین بافت سلولی محصول) می‌گردد در نتیجه، این امر سبب نرم‌تر شدن ساختار محصول شده و افزایش چروکیدگی را به همراه دارد. رضایی و همکاران (۲۰۱۸) نیز با بررسی اثر زمان آسایش تنش بر

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس مقدار چروکیدگی در تولید قرص از پودر سویا

Table 5- Results of variance analysis for shrinkage of soybean tablet

Sources	Mean squar	Sum of squar	F -Value	p-value
Model	1.056×10^{-3}	0.015	16.97	0.0001**
Product temperature (A)	6.625×10^{-4}	6.625×10^{-4}	10.65	0.0052**
Relaxation time (B)	3.580×10^{-4}	3.580×10^{-4}	5.76	0.0229*
Moisture content (C)	3.721×10^{-7}	3.721×10^{-7}	0.0058	0.9394
Die diameter (D)	1.846×10^{-3}	1.846×10^{-3}	29.67	<0.0001**
A×B	4.971×10^{-5}	4.971×10^{-5}	0.80	0.3584
A×C	1.556×10^{-5}	1.556×10^{-5}	0.25	0.6360
A×D	2.735×10^{-5}	2.735×10^{-5}	0.44	0.5173
B×C	4.731×10^{-3}	4.731×10^{-3}	76.06	<0.0001**
B×D	3.488×10^{-3}	3.488×10^{-3}	56.06	<0.0001**
C×D	2.409×10^{-3}	2.409×10^{-3}	38.74	<0.0001**
A ²	1.400×10^{-5}	1.400×10^{-5}	0.23	0.6420
B ²	1.294×10^{-5}	1.294×10^{-5}	0.21	0.6548
C ²	9.572×10^{-4}	9.572×10^{-4}	15.39	0.0014**
D ²	1.069×10^{-4}	1.069×10^{-4}	1.76	0.2044
Lake of fit	8.026×10^{-5}	8.026×10^{-4}	3.08	0.1130
Residual	2.605×10^{-5}	1.303×10^{-4}		
Total		0.016		

** Significant difference at 1%, * Significant difference at 5%



شکل ۴- اثرهای متقابل متغیرهای مختلف بر چروکیدگی قرص‌های تشکیل شده از پودر سویا (RT زمان آسایش تنش (s)، MC محتوای رطوبتی (%w.b.)، D قطر قالب (mm) و T دمای مواد خام ورودی به قالب (°C))

Figure 4-Interaction effect of different variables on shrinkage of produced tablets from soybean powder (RT is relaxation time (s), MC is moisture content (%w.b.), D is die diameter (mm) and T is temperature of input raw material (°C))

پودر سویا با ضریب تبیین 0.96 ($R^2=0.96$) در رابطه (V) ارائه شده است.

معادله نهایی بر مبنای متغیرهای مستقل واقعی برای پیش‌بینی مقدار چروکیدگی طی فرآیند قرص‌سازی از

$$S = 0.15 + 1.1 \times 10^{-4} T + 0.03 RT + 0.02 D - 3.44 \times 10^{-4} RT \times MC - 1.5 \times 10^{-3} RT \times D + 6.1 \times 10^{-4} MC \times D + 1.9 \times 10^{-4} MC^2 \quad (V)$$

بهینه‌سازی برای تولید قرص از پودر سویا دارای شاخص مطلوبیت 0.853 بود. در این نقطه‌ی بهینه، دمای مواد خام ورودی به قالب برابر با 42.3°C ، زمان آسایش تنش 5 s، محتوای رطوبتی 5% w.b. و قطر قالب 5 mm می‌باشد. طی فرآیند قرص‌سازی تحت این شرایط بهینه، چگالی ذره‌ای برابر با $4895/49 \text{ kg/m}^3$ ، مقدار استحکام فشاری $432/31 \text{ N}$ و مقدار چروکیدگی $9\%/0.27$ به‌دست آمد. شکل ۵ اثر متقابل دمای مواد خام

بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

به‌طور کلی هدف از انجام این پژوهش یافتن نقاط بهینه و شاخص مطلوبیت تولید قرص فشرده از پودر سویا بر اساس بیشترین مقدار چگالی ذره‌ای و استحکام فشاری و کمترین مقدار چروکیدگی بود. در جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی فرآیند تولید قرص از پودر سویا با روش سطح پاسخ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در فرآیند قرص‌سازی، اولین پاسخ

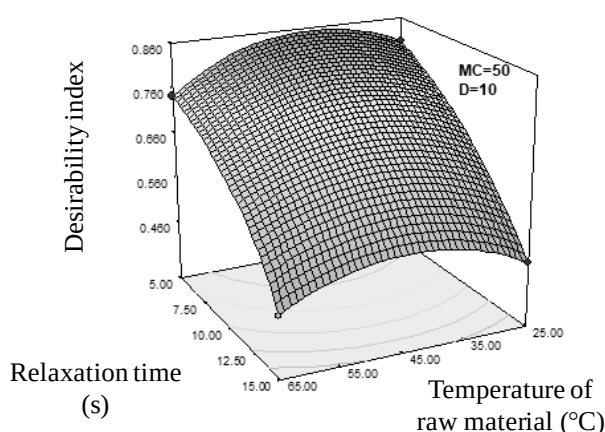
کشاورزی را با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌سازی کرده و مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد نقاط بهینه برای بیشترین مقدار چگالی حجمی، چگالی ذره‌ای و ضریب موثر انتشار رطوبت و کمترین مقدار انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن و مقدار چروکیدگی در نقطه بهینه با محتوای رطوبتی ۵۴٪ d.b.، اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴ mm خشک شده در دمای ۷۵ °C و بدون اعمال توان مادون قرمز به دست آمد.

ورودی و زمان آسایش تنش را بر اساس شاخص مطلوبیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده شد با افزایش هم‌زمان دمای مواد خام ورودی به قالب از ۳۰ به ۴۵ °C و کاهش زمان آسایش تنش از ۱۵ به ۵ s، شاخص مطلوبیت افزایش یافت. زمان آسایش تنش، بیشترین تأثیر را در این شاخص داشت. قاسمی و چایجان (۲۰۱۸) فرآیندهای قرص‌سازی و خشک‌کردن (به شیوه هوای داغ-مادون قرمز)، قرص‌های فشرده تولیدی از مواد غذایی و ضایعات

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی فرآیند تولید قرص از پودر سویا به روش سطح پاسخ

Figure 5-Optimization results of tablet production process from soyabean powder using respons surface method

Answer	Material Temperature (°C)	Relaxation Time (s)	Moisture content (%w.b.)	Die diameter (mm)	Density (kg/m ³)	Compressive strength (N)	Shrinkage (%)	Desirability
1	42.03	5	50	10	4895.49	423.31	9.027	0.853
2	40.45	5	50	10	5094.19	431.64	8.98	0.853
3	43.26	5	50	10	4748.62	432.54	9.06	0.853
4	38.39	5	50	10	5360.07	430.28	8.92	0.853
5	37.98	5	50	10	5420.41	429.95	8.91	0.852
6	45.79	5	50	10	4457.15	432.59	9.15	0.851
7	43.03	5	50	9.9	4810.84	430.63	9.16	0.846
8	50.73	5	50	10	3946.83	430.16	9.33	0.847
9	29.81	5	50	10	6649.09	419.04	8.73	0.831
10	55.56	15	30	8.1	3078.13	418.24	15.72	0.683



شکل ۵- اثر متقابل دمای مواد خام ورودی و زمان آسایش تنش بر اساس شاخص مطلوبیت نقطه بهینه قرص‌سازی از پودر سویا (MC محتوای رطوبتی (%w.b.) و D قطر قالب (mm))

Figure 5-Interaction effect of temprtature of raw material and relaxation time on desirability index in optimized tablet production from soybean powder (MC is moisture content (%w.b.) and D is die diameter (mm))

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر محتوای رطوبتی مواد خام، دمای مواد خام ورودی به قالب، قطر قالب و زمان آسایش تنش بر مقادیر چگالی ذره‌ای، استحکام فشاری و چروکیدگی قرص فشرده سویا مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین شرایط بهینه فرآیند قرص‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ به منظور دستیابی به

بهترین خواص فیزیکی و مکانیکی تعیین شد. در شرایط بهینه فرآیند قرص‌سازی، چگالی ذره‌ای برابر با $4895/49 \text{ kg/mm}^3$ ، استحکام فشاری $432/31 \text{ N}$ و چروکیدگی $9/03\%$ حاصل شد. از این قرص‌های فشرده سویا می‌توان در همه مواردی که پودر یا سویای خشک‌شده کاربرد دارد استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

- ظفری ع، ۱۳۹۲. بهینه‌سازی مصرف انرژی ویژه در فرآیند اکستروژن کود کمپوست به روش سطح پاسخ " پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران.
- ASAE Standards, 2003. ASAE S358.2: Moisture measurement- Forages (50th ed.). St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.
- Asefi N, 2015. Stabilization of sunflower oil by pennyroyal (*Mentha piperita*) extracts during accelerated storage. *International Journal of Food Properties*, 20(1): 30-40.
- Da Silva FRGB, De Souza M, Da Costa AMDS, De Matos LMJ and Paraíso PR, 2012. Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed. *Powder Technology*, 229: 61-70.
- Davidsson KO and Pettersson JBC, 2002. Birch wood particle shrinkage during rapid pyrolysis. *Fuel*, 81(3): 263-270.
- Ghasemi A and Amiri Chayjan R, 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.
- Ghasemi A, Sadeghi M and Mireei SA, 2017. Multi-stage intermittent drying of rough rice in terms of tempering and stress cracking indices and moisture gradients interpretation. *Drying Technology*, 36(1): 109-117.
- Ghasemi A and Amiri Chayjan R, Jahanian Najafabadi H. 2018, Optimization of granular waste production based on mechanical properties. *Waste Management*. 75: 82-93.
- Kaliyan N and Morey RV, 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101(3): 1082-1090.
- Li JW, Ding SD and Ding XL, 2007. Optimization of the ultrasonically assisted extraction of polysaccharides from *Zizyphus jujuba* cv. jinsixiaozao. *Journal of Food Engineering*, 80(1): 176-183.
- Muralidharan J, Thiruvankadan AK and Saravanakumar VR, 2016. Effect of concentrate and urea molasses mineral block (UMMB) supplementation on the growth and feed consumption of Mecheri lambs under intensive rearing. *Indian Journal of Animal Res*
- Rhén C, Gref R, Sjöström M and Wästerlund I, 2005. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology*, 87(1): 11-16.
- Rezaei H, Sokhansanj S, Lim CJ, Lau A and Bi X, 2018. Effects of the mass and volume shrinkage on pellet particles in drying rates. *Particuology*. 38: 1-9.
- Salema AA and Afzal MT, 2015. Numerical simulation of heating behaviour in biomass bed and pellets under multimode microwave system. *International Journal of Thermal Sciences*, 91: 12-24.
- Terrill TH, Mosjidis JA, Moore DA, Shaik SA, Miller JE, Burke JM, Muir JP and Wolfe R, 2007. Effect of pelleting on efficacy of sericea lespedeza hay as a natural dewormer in goats. *Veterinary Parasitology*, 146(1-2): 117-122.

- Theerarattananoon K, Xu F, Wilson J, Ballard R, Mckinney L, Staggenborg S, Vadlani P, Pei ZJ and Wang D, 2011. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 33(2): 325-332.
- Tumuluru JS, 2014. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosystems Engineering*, 119: 44-57.
- Wani SM, Jan N, Wani TA, Ahmad M, Masoodi FA and Gani A, 2017. Optimization of antioxidant activity and total polyphenols of dried apricot fruit extracts (*Prunus armeniaca* L.) using response surface methodology. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(2): 119-126.
- Zafari A and Kianmehr MH, 2014. Factors affecting mechanical properties of biomass pellet from compost. *Environmental Technology*. 35(4): 478-486.
- Zainuddin MF, Rosnah S, Noriznan MM and Dahlan I, 2014. Effect of moisture content on physical properties of animal feed pellets from pineapple plant waste. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2: 224-230.

Journal of Food Researches/vol.31 No.4 2021/pp 1-17
<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>
DOI:10.22034/FR.2021.28585.1587

Optimization of compressed soybean tablet production using response surface methodology

A Ghorbani¹, R Amiri Chayjan^{2*} and A Ghasemi³

Received: July 26, 2018

Accepted: October 28, 2018

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

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

³PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

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

Introduction: Compressing materials during the tableting process is an appropriate solution to increase the bulk density of agricultural materials and thus reduce their transportation and storage costs. Other benefits of using compact tablets include reducing environmental contamination due to the absence of fine particles and dust, increasing the nutritional value per unit volume due to compression, and also facilitating the control of compacted nutrients to meet nutritional needs (Kaliyan and Morey 2010). In order to improve the quality of the tablet, it is necessary to know the optimum conditions and working points of the device, as well as to find the relationships between the effective factors and the final product for the researchers, so optimizing the food processing processes is one of the most important. One of the most important steps in increasing the efficiency of the food industry. Numerous analytical and numerical methods are available for this purpose. Nowadays, statistical methods are used for optimization such as Response Surface Methodology (RSM). Response level methodology is a set of statistical techniques used to optimize the processes in which the response is affected by a number of variables. The graphical representation of the mathematical model has defined the word surface methodically. With the help of this statistical design, the number of trials is reduced and all the coefficients of the quadratic regression model and the interactions of the factors can be estimated. In general, the models developed in response surface methodology are generally quadratic (Lee et al., 2007). Increasing the speed of operation and increasing accuracy in achieving the desired goal are some of the criteria that are considered as an optimization method for quality evaluation (Asefi et al., 2015; Wani et al., 2017). Finding the best pelletizing conditions for agro-materials is of particular importance in order to achieve the highest quality pellets including the lowest wrinkles and the highest compressive strength. Therefore, it is necessary to find the optimum conditions for the variables of the tableting process such as moisture content, temperature of the feedstock, and mold size. Soy is used in the preparation of a variety of sauces, syrups, meat substitutes and ready-made foods (Dasilva et al., 2012). So far, no research has been done to optimize the pellet production from soy powder. The purpose of this study was to investigate the effects of independent variables of moisture content, die diameter, inlet temperature and stress relaxation time on the mechanical and physical properties of soybean powder and tablet formulations in order to determine the optimum conditions for achieving the highest density and compressive strength and the lowest amount of shrinkage of the tablet.

Material and methods: In this research, soybean powder was used for tableting experiments. Soybean dough prepared and used in a laboratory scale hydraulic press machine with a closed die to produce cylindrical tablets. When the hydraulic pressure reached 75 bar, the movement of the

hydraulic jack was stopped, and the materials were kept in the closed die for the specified time (three levels of 5, 10 and 15 s) to reduce stress and prevent spring compression. At the end of the compressive relaxation process, the pressure of the jack was removed from the material and the tablet formed was removed from the bottom of the mold. The effect of the tableting process on particle density, compressive strength and shrinkage of soybean tablet was studied. The experiments were carried out using soybean powder at feedstock moisture content of 30, 40 and 50% w.b., feedstock temperature 25, 45 and 60 °C, relaxation time of 5, 10 and 15 s, and die diameter of 6, 8 and 10 mm. To measure the compressive strength of the tablets made from soybean powder, the Hounsfield Model K-S H50, was used for compressive strength testing. The test method was that a number of cylindrical compact tablets (in diameter) were positioned between the two fixed and removable flat jaws. The jaw was then moved downward at a constant velocity of 1 mm/s, compressing the cylindrical shape along the diameter until it was removed and fractured, and the amount of force and displacement in the memory of a data logger at a sampling rate of 1000 data points. Finally, the maximum recorded force for breaking the tablet was considered as compressive strength. To measure the particle density of the tablets, a number of tablets were inserted into the graduated cylinders containing a volume of 50 ml (readable to 0.5 ml) of toluene. The volume of each cylinder was measured and recorded according to the volume changes of the cylinder. To measure product shrinkage, the height and diameter of a cylindrical compact tablet were measured in three different directions once before the drying process and once at the end of the drying process by a digital caliper. Then the average geometric diameter of the tablet was calculated from the related equation. The response surface method (RSM) with central composite design and six replications for central point was also used to analyze the data and optimize the process.

Results and discussion: The result showed that the highest particle density was 3714.32 kg/mm³ under conditions of the feedstock moisture content of 50% w.b., feedstock temperature of 25 °C, relaxation time of 5 s, and the die diameter of 10 mm. During the tableting processes, the highest compressive strength (518.18 N) was obtained at the feedstock moisture content of 50% w.b., feedstock temperature of 65 °C, relaxation time of 5 s, and the die diameter of 6 mm. The highest shrinkage of soybean powder (57%) was obtained at the feedstock moisture content of 50% w.b., feedstock temperature of 65 °C, relaxation time of 15 s, and the die diameter of 6 mm. The best optimization results for tableting conditions for soybean powder was under feedstock moisture content of 50% w.b., feedstock temperature of 42.03 °C, relaxation time of 5 s and die diameter of 10 mm. The predicted values of particle density, compressive strength and shrinkage at the optimized conditions were 4895.49 kg/mm³, 433.17 N and 9.03% with a desirability of 0.853, respectively. By increasing simultaneously, the temperature of the feedstock to the die from 30 to 45 °C and decreasing the stress relaxation time from 15 to 5 s, the desirability index increased. Stress relaxation time had the most effect on this index.

Conclusion: In this study, the effect of moisture content of raw materials, temperature of feedstock, die diameter and stress relaxation time on particle density, compressive strength and shrinkage of soybean tablets were studied. Also, the optimum conditions of the tableting process were determined by using the response surface method to obtain the best physical and mechanical properties. Under optimum conditions of the tableting process, a particle density of 4895.49 kg / mm³, compressive strength of 432.31 N and shrinkage of 9.03% were obtained. These compact soy tablets can be used in all cases where powdered or dried soy is used.

Key words: Compressive strength, Relaxation time, Shrinkage, Tableting