

Journal Pre-proofs

Stress Analysis and Optimization of Compression of Food Materials Using FEM and RSM (Case Study: Zucchini)

Reza Rahimzadeh, Reza Amiri Chayjan, Ali Ghasemi

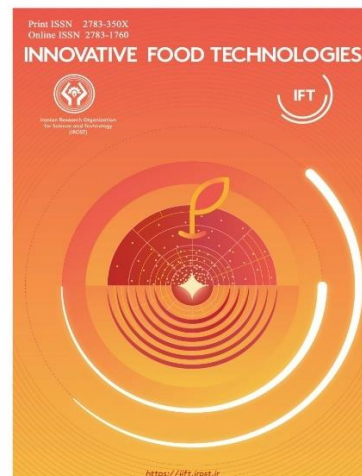
DOI: <https://doi.org/10.22104/ift.2026.8499.2323>

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 18 August 2026

Revised Date: 27 September 2026

Accepted Date: 29 September 2026



Please cite this article as Reza Rahimzadeh, Reza Amiri Chayjan, Ali Ghasemi, Stress Analysis and Optimization of Compression of Food Materials Using FEM and RSM (Case Study: Zucchini), *Innovative Food Technologies* (2026), doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2026.8499.2323>

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2026 The Author(s). Published by iroost.org.

تحلیل تنش و بهینه‌یابی فشرده‌سازی پودر مواد غذایی با FEM و RSM (مطالعه موردی: کدو سبز)

نویسندگان

رضا رحیم زاده^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}، علی قاسمی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی همدان، همدان، ایران

۲. استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی همدان، همدان، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*نویسنده مسئول: amirireza@basu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، فرآیند فشرده‌سازی پودر کدو سبز با روش اجزای محدود شبیه‌سازی و برای بهینه‌سازی هم‌زمان ویژگی‌های مکانیکی و انرژی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. اثر فشار (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال)، قطر قالب (۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی‌متر) و زمان آسایش تنش (۳، ۱۳ و ۲۳ ثانیه) بر توزیع تنش، تراکم‌پذیری و درصد فشردگی قرص‌ها بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی در زمان آسایش تنش ۱۳ ثانیه نشان داد افزایش فشار از ۵ به ۹ مگاپاسکال، تنش بیشینه محوری را از ۱۸۹ به ۱۹۳ مگاپاسکال و درصد تراکم را از ۹/۸۷ به ۱۶/۶۷ درصد افزایش داد، در حالی‌که افزایش قطر قالب از ۱۰ به ۲۶ میلی‌متر، تنش محوری بیشینه را از ۱۹۳ به ۱۵۳ مگاپاسکال کاهش داد و الگوی توزیع تنش را به سمت لبه‌ها متمایل ساخت. نسبت σ_{ave}/CP با افزایش فشار از ۹/۴۳ به ۶/۳۶ کاهش یافت که بیانگر بهبود کارایی تراکم در فشارهای بالاتر است. بهینه‌سازی با تابع مطلوبیت، شرایط بهینه شامل فشار ۹ مگاپاسکال، قطر قالب ۱۵/۱۲ میلی‌متر و زمان آسایش ۶/۳۵ ثانیه با مطلوبیت ۰/۷۳ تعیین شد. در این شرایط، چگالی ۱۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت به نفوذ ۶۳۰/۴۸ نیوتون، تنش در راستای قطر ۱۶/۶۳ مگاپاسکال، انرژی ویژه مصرفی ۱۹۱۷/۰۵ ژول بر سانتی‌متر مکعب و درصد فشردگی ۱۲/۸۷ درصد به‌دست آمد. اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی، میانگین خطای کمتر از ۷ درصد را نشان داد که دقت مدل را تأیید می‌کند. هم‌راستایی نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آماری نشان داد ترکیب این دو رویکرد، روشی کارآمد برای طراحی و بهینه‌سازی فشرده‌سازی پودرهای زیستی است.

کلمات کلیدی: فشرده‌سازی، روش اجزای محدود، بهینه‌سازی سطح پاسخ، قرص کدو سبز

۱. مقدمه

کدو سبز (*Cucurbita pepo* L.) یکی از سبزی‌های پرمصرف است که به‌طور گسترده در مناطق معتدل جهان از جمله اروپا، آمریکا و آسیا کشت می‌شود. این محصول به دلیل ارزش تغذیه‌ای مناسب، محتوای آب بالا و وجود ترکیبات مفید، در رژیم غذایی بسیاری از جوامع مورد استفاده قرار می‌گیرد (Cagliani and Consonni, 2024; Tejada et al., 2020; Savvas et al., 2024). با وجود ارزش غذایی بالا، کدو سبز به دلیل رطوبت زیاد و بافت نرم، از محصولات بسیار فسادپذیر محسوب می‌شود و در مراحل برداشت، حمل‌ونقل و نگهداری دچار افت کیفیت و ضایعات قابل‌توجهی می‌گردد. برآوردها نشان می‌دهد که ضایعات پس از برداشت میوه‌ها و سبزی‌ها می‌تواند بین ۲۰ تا ۵۰ درصد تولید کل باشد (Lorente-Mento et al., 2023; Megías et al., 2015). یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش ضایعات و افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی، تبدیل آن‌ها به پودر از طریق فرآیند خشک‌کردن و سپس فرآوری به شکل محصولات فشرده است. فشرده‌سازی پودرهای گیاهی می‌تواند موجب کاهش حجم، تسهیل حمل‌ونقل، بهبود پایداری و افزایش ارزش افزوده محصول شود. در این فرآیند، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پودر از جمله چگالی، تراکم‌پذیری و استحکام قرص نقش مهمی در کیفیت نهایی محصول دارند (Rashidi et al., 2021).

پودر کدو سبز به دلیل ارزش تغذیه‌ای بالا، رنگ سبز طبیعی و طعم ملایم، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع غذایی دارد. از این پودر می‌توان به عنوان افزودنی در تهیه سوپ‌های فوری، سس‌ها، اسنک‌ها، کیک و بیسکویت استفاده کرد (Aziz et al., 2018). همچنین به دلیل محتوای بالای فیبر و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، به عنوان یک مکمل غذایی طبیعی در محصولات فراسودمند مورد توجه قرار گرفته است. تولید قرص فشرده از پودر کدو سبز، علاوه بر کاهش حجم و تسهیل حمل و نقل، امکان مصرف آسان تر این سبزی را در خارج از فصل فراهم می‌کند (Rashidi et al., 2021).

در فرآیند فشردگی پودر کدو سبز، ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی، سختی و قابلیت فشرد شدن پودر، از جمله عواملی هستند که تأثیر زیادی بر روی کیفیت و استحکام نهایی قرص‌ها دارند. شبیه‌سازی عددی، این ویژگی‌ها را در شرایط مختلف فشاری شبیه‌سازی کرده و می‌تواند به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند کمک کند. در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی عددی به‌ویژه روش اجزای محدود (FEM) به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای فشرد سازی در صنایع غذایی و داروسازی مورد توجه قرار گرفته است. این روش امکان بررسی توزیع تنش، تغییر شکل و رفتار مواد در حین فشرد سازی را فراهم کرده و می‌تواند بدون انجام آزمایش‌های گسترده و پرهزینه، شرایط بهینه فرآیند را پیش‌بینی کند (Wang et al., 2021; Partheniadis et al., 2022).

مطالعات متعددی کاربرد FEM را در فرآوری مواد غذایی و دارویی نشان داده‌اند. از FEM برای مدل‌سازی عددی فرآیند قرص‌سازی پودرهای دارویی استفاده شده و نشان داده شده است که این روش قادر است توزیع تنش و چگالی را در قرص‌های فشرده با دقت بالایی پیش‌بینی کند (Wang et al., 2021). همچنین، مروری جامع بر کاربرد FEM در قرص‌سازی مواد دارویی انجام شده و تأکید شده است که مدل‌های رفتاری مانند دراگر-پراگر کپ، ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی پودرهای دانه‌ای هستند (Partheniadis et al., 2022). در مطالعه‌ای مروری، پیشرفت‌های اخیر در کاربرد شبیه‌سازی عددی در فرآیند قرص‌سازی بررسی شده و بر اهمیت مدل‌سازی FEM در پیش‌بینی رفتار مواد پودری تأکید شده است (Li et al., 2025). همچنین، از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی تولید قرص‌های جوشان از پودر میوه استفاده شده و نشان داده شده است که ترکیب FEM و RSM می‌تواند به طراحی فرآیند کمک کند (Ma et al., 2023). با این حال، بررسی‌ها نشان داد که پژوهش‌های محدودی در مورد مدل‌سازی FEM در فرآیند فشرد سازی پودر سبزیجات انجام شده است. بیشتر مطالعات موجود بر پودرهای دارویی یا مواد دانه‌ای صنعتی متمرکز بوده‌اند و بررسی هم‌زمان اثر پارامترهای عملیاتی بر ویژگی‌های مکانیکی قرص و مصرف انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، این پژوهش با استفاده از FEM و RSM، خلأ موجود در مدل‌سازی فشرد سازی پودر کدو سبز را پر می‌کند.

با این حال، مرور مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های محدودی به مدل‌سازی FEM فرآیند فشرد سازی پودر سبزیجات (به‌ویژه کدو سبز) پرداخته‌اند. بیشتر مطالعات موجود بر پودرهای دارویی یا مواد دانه‌ای صنعتی متمرکز بوده‌اند و بررسی هم‌زمان اثر پارامترهای عملیاتی بر ویژگی‌های مکانیکی قرص و مصرف انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، این پژوهش با استفاده از FEM و RSM، خلأ موجود در مدل‌سازی فشرد سازی پودر کدو سبز را پر می‌کند. با این حال، مطالعات مربوط به مدل‌سازی عددی فشرد سازی پودرهای حاصل از سبزیجات، به‌ویژه کدو سبز، محدود بوده و بررسی هم‌زمان اثر پارامترهای عملیاتی بر ویژگی‌های مکانیکی قرص و مصرف انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، هدف از این پژوهش شبیه‌سازی فرآیند فشرد سازی پودر کدو سبز با استفاده از روش اجزای محدود، بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل فشار، قطر قالب و زمان آسایش تنش بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی قرص، و بهینه‌سازی هم‌زمان پاسخ‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۱. آماده‌سازی نمونه

کدو سبز از بازار محلی تهیه و برای تعیین رطوبت اولیه، سه نمونه ۱۰ گرمی در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شد و رطوبت اولیه به روش وزنی محاسبه گردید. برای تهیه پودر کدو سبز، نمونه‌ها

پس از شستشو به صورت اسلایس‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر برش داده شدند و در ادامه با استفاده از خشک‌کن پیوسته هوای داغ نیمه صنعتی (ساخته شده در آزمایشگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی‌سینا) در دماهای مختلف (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و با سرعت جریان هوای کنترل شده (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه) تا رسیدن به رطوبت نهایی ۱۲ درصد بر پایه خشک، خشک شدند. رطوبت نهایی ۱۲ درصد بر اساس مطالعات پیشین انتخاب شد، زیرا در این رطوبت، پودر حاصل دارای جریان‌پذیری مناسب، قابلیت تراکم‌پذیری بالا و پایداری میکروبی کافی است (Rashidi et al., 2021; Aziz et al., 2018). در نهایت، نمونه‌های خشک شده توسط آسیاب آزمایشگاهی خرد و پودر شدند. پودر حاصل از الک شماره ۱۴ با اندازه مش ۱/۴۱ میلی‌متر عبور داده شد تا اندازه ذرات یکنواخت حاصل شود.

۲.۲. فرایند تولید قرص کدو سبز

به منظور تولید هر قرص فشرده، مقدارهای (۰/۵، ۱/۷ و ۳/۶ گرم) پودر کدو سبز خشک شده به ترتیب در قالب‌های استوانه‌ای با قطرهای (۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی‌متر) و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر ریخته شد. فشرده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیکی آزمایشگاهی مجهز به سامانه کنترل فشار و سرعت که در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی‌سینا ساخته شده بود، با سرعت حرکت سنبه ۶ میلی‌متر بر ثانیه انجام گرفت. در این مطالعه، سطوح بارگذاری بر اساس فشار قرائت شده از گیج فشار مدار هیدرولیک دستگاه پرس شامل ۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال تعریف شدند. این مقادیر به عنوان سطوح بارگذاری اسمی فرآیند در نظر گرفته شده و مبنای توقف اعمال بار در آزمایش‌ها و شرایط متناظر در مدل‌سازی اجزای محدود قرار گرفتند. اثر سطوح بارگذاری اسمی، زمان آسایش تنش (۳، ۱۳ و ۲۳ ثانیه) و قطر قالب بر رفتار فشرده‌سازی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. همچنین برای بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده گردید. در ادامه، نمونه‌های تولید شده تحت آزمون‌های آزمایشگاهی قرار گرفته و چگالی، مقاومت به نفوذ و مقاومت مکانیکی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

۲.۲. آزمون‌های تجربی تعیین خواص و مدل‌سازی ویسکوالاستیک

منظور تعیین خواص الاستیک نمونه‌های فشرده کدو سبز، آزمون‌های فشاری با استفاده از دستگاه آزمون کشش و فشار مدل TM-0250 ساخت شرکت همدان آزمون کاوشگر ایران انجام شد. این دستگاه قابلیت اعمال بار فشاری کنترل شده و ثبت همزمان پاسخ نیرو-جابجایی را داشت. برای این منظور از قرص‌های فشرده کدو سبز با قطر ۱۸ میلی‌متر استفاده شد. ضخامت به صورت ارتفاع پودر ماده در داخل قالب برای همه نمونه‌ها به طور یکسان (۱۰ میلی‌متر) اعمال شد. آزمون‌های فشاری در دو حالت محصور (Confined) و غیر محصور (Unconfined) انجام شدند. در حالت محصور، نمونه درون قالبی تفلونی با قطر داخلی ۱۸ میلی‌متر قرار گرفت تا تغییر شکل جانبی آن محدود شود، در حالی که در حالت غیرمحصور، نمونه بدون محدودیت جانبی تحت بار فشاری قرار گرفت. از داده‌های نیرو-جابجایی، با توجه به مساحت پروب بارگذاری و مقدار تغییر شکل محوری، منحنی‌های تنش-کرنش برای هر دو حالت استخراج گردید. از شیب ناحیه خطی اولیه منحنی‌ها، مدول الاستیک معادل در حالت محصور (E_c) و غیرمحصور (E_r) تعیین شدند. نسبت پواسون نمونه‌ها بر اساس رابطه بین مدول الاستیک در حالت محصور و غیرمحصور و مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (Fan et al., 2022).

$$R = \frac{E_c}{E_r} - 1 \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{4} \left(R + \sqrt{R^2 - 8R} \right) \quad (2)$$

به منظور بررسی رفتار وابسته به زمان پودر کدو سبز، آزمون آسایش تنش بر روی نمونه‌های پودری انجام شد. بدین منظور، نمونه‌ها در قالب تفلونی با قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵ میلی‌متر قرار داده شده و توسط پروبی با قطر ۱۰ میلی‌متر تحت بارگذاری فشاری با نرخ جابجایی ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه قرار گرفتند. به منظور بررسی اثر سطح تغییر شکل بر رفتار آسایش تنش و ارزیابی اعتبار فرض ویسکوالاستیسیته خطی، آزمون‌ها در دو سطح کرنش ۱۰ و ۱۵ درصد انجام شد. نتایج نشان داد که

پاسخ تنش-زمان در این دو سطح کرنش اختلاف ناچیزی داشته و رفتار ماده در این بازه را می‌توان به صورت خطی فرض نمود. بر این اساس، داده‌های مربوط به کرنش ۱۵ درصد برای استخراج پارامترهای مدل و شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. پس از رسیدن نمونه به کرنش ۱۵ درصد، جابجایی ثابت نگه داشته شد و تغییرات نیرو به مدت ۶۰ ثانیه ثبت گردید. سپس تنش از تقسیم نیروی اعمالی بر سطح مقطع نمونه محاسبه و منحنی‌های تنش-زمان استخراج شد.

برای مدل‌سازی رفتار ویسکوالاستیک خطی ماده، از مدل تعمیم‌یافته ماکسول مبتنی بر سری پرونی استفاده شد. در چارچوب نظریه ویسکوالاستیسیته خطی، پاسخ وابسته به زمان ماده، مطابق روابط (۳) تا (۵) با استفاده از توابع آسایش مدول الاستیسیته، مدول برشی و مدول حجمی بیان می‌شود.

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_E} E_i e^{\left(\frac{-t}{\tau_i^E}\right)} \quad (3)$$

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{\left(\frac{-t}{\tau_i^G}\right)} \quad (4)$$

$$K(t) = K_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{\left(\frac{-t}{\tau_i^K}\right)} \quad (5)$$

این روابط بیانگر فرم کلی پاسخ وابسته به زمان ماده هستند که در آنها E_i و E_{∞} به ترتیب مدول الاستیسیته تعادلی و مدول الاستیسیته جزء i ام، G_i و G_{∞} به ترتیب مدول برشی تعادلی و مدول برشی جزء i ام، K_i و K_{∞} به ترتیب مدول حجمی تعادلی و مدول حجمی جزء i ام و τ_i^E زمان آسایش تنش جز i ام و n_E و n_G تعداد المان‌های مدل ماکسول هستند.

با توجه به ماهیت فشاری آزمون‌ها، ابتدا مدول الاستیسیته وابسته به زمان $E(t)$ از منحنی‌های تنش-کرنش استخراج گردید. سپس با فرض ثابت بودن نسبت پواسون، مدول برشی وابسته به زمان از رابطه (۶) به دست آمد.

$$G(t) = E(t) \left(\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \right) \quad (6)$$

که در این رابطه $G(t)$ مدول برشی وابسته به زمان، $E(t)$ مدول الاستیسیته وابسته به زمان در حالت محصور و μ نسبت پواسون ماده است. پارامترهای مدل با برازش غیرخطی تابع آسایش مدول الاستیسیته (رابطه ۳) بر داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از نرم‌افزار DataFit 9 استخراج شدند. سپس تابع آسایش به صورت سری پرونی برای مدول برشی تقریب زده شد.

با توجه به گزارش‌های موجود در رفتار ویسکوالاستیک مواد دانه‌ای و شبه‌جامدهای زیستی، اثر آسایش حجمی نسبت به مؤلفه برشی معمولاً محدودتر بوده و سهم کمتری در پاسخ وابسته به زمان ماده دارد. از این‌رو، در این پژوهش مدول حجمی مستقل از زمان فرض شده و تنها رفتار ویسکوالاستیک برشی در مدل‌سازی لحاظ گردید. همچنین، با فرض همسانگردی ماده و به منظور کاهش تعداد پارامترهای مجهول مدل، فرض شد که ضرایب نسبی سری پرونی برای مؤلفه‌های الاستیک، برشی و حجمی یکسان باشند. بر این اساس، نسبت مدول کاهشی به مدول لحظه‌ای برای هر جمله از سری پرونی در تمامی مؤلفه‌ها برابر در نظر گرفته شد.

$$\alpha_i^E = \frac{E_i}{E_0} = \alpha_i^G = \frac{G_i}{G_0} = \alpha_i^K = \frac{K_i}{K_0} \quad (7)$$

که در آن α_i^E ، α_i^G و α_i^K به ترتیب ضرایب کاهشی نسبی مدول الاستیسیته، مدول برشی و مدول حجمی در جمله i ام سری پرونی هستند. این ضرایب بیانگر سهم هر مکانیسم ماکسول در کاهش سختی ماده در فرآیند آسایش تنش می‌باشند. بر این اساس، ضرایب نسبی مدول برشی (g_i) و مدول حجمی (k_i) در محیط نرم‌افزار آباکوس برابر فرض شدند، در حالی که مقادیر مطلق

مدول‌های برشی و حجمی مستقل از یکدیگر باقی مانده‌اند. در نهایت، پارامترهای استخراج‌شده از آزمون‌های تجربی به عنوان ورودی مدل ویسکوالاستیک در تحلیل اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفتند.

۴.۲. شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند فشرده‌سازی

به منظور شبیه‌سازی فرآیند تولید قرص فشرده کدو سبز، مدل اجزای محدود در محیط نرم‌افزار آباکوس تعریف شد. هندسه مدل شامل سه بخش قالب، سنبه بارگذاری و نمونه پودر بود. با توجه به سختی بالای قالب و سنبه نسبت به پودر، این اجزا به صورت صلب (Rigid analytical) در نظر گرفته شدند، در حالی که نمونه پودر به صورت ماده تغییرشکل‌پذیر با رفتار همگن مدل شد. با توجه به تقارن هندسی، شرایط بارگذاری محوری و همچنین محصورشدگی سه بعدی ماده درون قالب ناشی از تماس با دیواره‌های جانبی و زیری قالب و سنبه که منجر به حالتی نزدیک به تنش شبه‌هیدروستاتیک می‌شود، به منظور کاهش زمان محاسبات، مدل به صورت متقارن و دوبعدی (2D axisymmetric) تعریف گردید، سپس اجزاء مدل مطابق شکل (۱) نسبت به هم مونتاژ شدند. کلیه سطوح تماس بین قالب، سنبه و نمونه به صورت تماس سطح به سطح با فرمول بندی penalty و ضریب اصطکاک ۰/۵۵ تعریف شدند که مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح بر اساس آزمون سطح شیب‌دار تعیین گردید.

شکل (۱). مونتاژ اجزای مدل شامل قالب، سنبه و بستر پودر در محیط نرم‌افزار آباکوس

Fig. (1). Assembly of the die, punch, and powder bed in Abaqus

پودر کدو سبز در مدل اجزای محدود به صورت یک ماده همگن، همسانگرد و ویسکوالاستیک خطی مدل شد. خواص الاستیک ماده شامل چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون از آزمون‌های تجربی تعیین و به عنوان ورودی مدل در نرم‌افزار آباکوس معرفی شدند. رفتار وابسته به زمان ماده نیز با استفاده از مدل تعمیم‌یافته ماکسول و در قالب سری پرونی تعریف گردید. ضرایب سری پرونی شامل ضرایب نسبی مدول برشی (G_i)، ضرایب نسبی مدول حجمی (K_i) و زمان‌های آسایش از نتایج آزمون آسایش تنش استخراج شدند. با توجه به فرض همسانگردی ماده و به منظور کاهش تعداد پارامترهای مجهول مدل، ضرایب نسبی مدول برشی و حجمی برابر فرض شدند. جزئیات استخراج پارامترهای ویسکوالاستیک و روابط حاکم در بخش ۳.۲ ارائه شده است. کلیه خواص مکانیکی و ویسکوالاستیک مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود در جدول (۱) ارائه شده‌اند. علاوه بر این، مقادیر تنش تسلیم و انرژی شکست از آزمون‌های فشاری استخراج شدند و صرفاً به عنوان شاخص‌هایی برای تحلیل و تفسیر رفتار مکانیکی نمونه در بخش نتایج مورد استفاده قرار گرفتند و در حل عددی وارد نشدند.

جدول (۱). خواص الاستیک و ویسکوالاستیک پودر کدو سبز مورد استفاده در مدل اجزای محدود

Table (1). Elastic and viscoelastic properties of zucchini powder used in the finite element model

شبیه‌سازی فرآیند فشرده‌سازی شامل سه مرحله بارگذاری، آسایش تنش و باربرداری بود. در مرحله بارگذاری، جابجایی کنترل‌شده به سنبه اعمال شد تا سطوح تنش فشاری مورد نظر در نمونه ایجاد گردد. لازم به ذکر است که کلیه نتایج عددی گزارش‌شده در این پژوهش، از انتهای مرحله بارگذاری استخراج شده‌اند. پس از رسیدن به جابجایی متناظر با هر سطح بارگذاری، حرکت سنبه متوقف شده و مرحله آسایش تنش به منظور بررسی رفتار وابسته به زمان ماده اجرا گردید. زمان آسایش تنش در سه سطح ۳، ۱۳ و ۲۳ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، در مرحله باربرداری، سنبه از نمونه جدا شده و فرآیند حذف بار شبیه‌سازی شد. با توجه به وجود تماس‌های غیرخطی بین قالب، سنبه و ماده و همچنین تغییر شکل‌های بزرگ در فرآیند فشرده‌سازی، تحلیل‌ها با استفاده از حلگر دینامیک صریح (Explicit) انجام شدند. همچنین، با توجه به سرعت پایین حرکت سنبه (۶ میلی‌متر بر ثانیه)، فرآیند فشرده‌سازی در شرایط شبه‌استاتیکی فرض شده و اثر نیروهای اینرسی بر پاسخ مکانیکی نمونه ناچیز در نظر گرفته شد.

شرایط اولیه و مرزی مدل بر اساس هندسه محورممتقارن و شرایط واقعی فرآیند فشردن سازی تعریف شدند. در مدل محورممتقارن، محور مرکزی نمونه به عنوان محور تقارن در نظر گرفته شد و جابجایی گره‌های واقع بر این محور در راستای شعاعی مقید گردید. قالب به صورت جسم صلب صلب مدل شد و تمامی درجات آزادی آن در طول تحلیل ثابت در نظر گرفته شد. همچنین، سطح زیرین نمونه بر روی تکیه‌گاه صلب قرار داشته و جابجایی عمودی آن محدود گردید. سنبه بارگذاری نیز به صورت جسم صلب در نظر گرفته شد و تنها در راستای محور عمودی (Y) دارای حرکت کنترل شده بود.

بارگذاری به صورت جابجایی کنترل شده با سرعت ثابت ۶ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد. مقدار جابجایی متناظر سنبه برای هر سطح بارگذاری، بر اساس یک تحلیل کالیبراسیون عددی تعیین گردید. در این راستا، ابتدا فشارهای قرائت شده از مدار هیدرولیک دستگاه (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) به نیروی معادل روی پیستون تبدیل شد. سپس با انجام تحلیل مقدماتی اجزای محدود و استخراج منحنی نیرو-جابجایی، مقدار جابجایی متناظر با رسیدن نیروی واکنش سنبه به مقدار نیروی معادل تعیین گردید (جدول ۲). این رویکرد امکان اعمال شرایط بارگذاری منطبق با داده‌های آزمایشگاهی را در مدل عددی فراهم کرد.

پس از اعمال هر مقدار جابجایی، موقعیت سنبه ثابت نگه داشته شد تا مرحله آسایش تنش ماده شبیه‌سازی شود. در ادامه، مرحله باربرداری با حرکت معکوس سنبه و جداسازی کامل آن از نمونه انجام گرفت. در نهایت به منظور مش‌بندی نمونه پودر، از المان‌های دوبعدی محورممتقارن از نوع چهارگره‌ای با کاهش انتگرال‌گیری (CAX4R) استفاده شد. مش‌بندی به صورت ساختاریافته (Structured) انجام گرفت تا دقت محاسبات در نواحی با گرادیان تنش بالا، به‌ویژه در ناحیه تماس با سنبه و دیواره قالب، افزایش یابد. به منظور اطمینان از استقلال نتایج از اندازه مش، تحلیل استقلال مش با افزایش تدریجی تعداد المان‌ها انجام شد و معیار همگرایی بر اساس تغییرات حداکثر تنش و جابجایی سنبه در نظر گرفته شد. بر اساس این بررسی، مش نهایی به گونه‌ای انتخاب شد که تغییر نتایج نسبت به حالت ریزتر از ۳٪ کمتر باشد. تعداد المان‌های به‌کاررفته در مدل‌های مختلف به ترتیب شامل ۱۲۵۰، ۲۲۵۰ و ۳۲۵۰ المان برای قالب‌های با قطر ۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی‌متر بود.

جدول (۲). نتایج کالیبراسیون اجزای محدود شامل فشار هیدرولیکی، قطر قالب، نیروی معادل و جابجایی متناظر سنبه

Table (2). Calibration results relating hydraulic pressure, die diameter, and piston displacement

۵.۲. طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی فرآیند فشردن سازی

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر متغیرهای فرآیند بر رفتار فشردن سازی پودر کدو سبز و تعیین شرایط بهینه، از روش سطح پاسخ (RSM) با استفاده از نرم افزار Design-Expert استفاده شد. متغیرهای مستقل شامل فشار (۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ مگاپاسکال) زمان آسایش تنش (۳، ۸، ۱۳، ۱۸ و ۲۳ ثانیه) و قطر قالب (۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۲ و ۲۶ میلی‌متر) در نظر گرفته شدند. همچنین پاسخ‌ها شامل مقاومت به نفوذ، تنش در راستای قطر و چگالی بودند. برای مدل‌سازی پاسخ‌ها، از مدل چندجمله‌ای درجه دوم استفاده شد که به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (8)$$

که در این رابطه، Y بیانگر پاسخ مورد بررسی بوده و X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب معرف فشار، قطر قالب و زمان آسایش تنش هستند. ضرایب مدل (β) شامل اثرات خطی، درجه دوم و متقابل متغیرها می‌باشند. برازش مدل‌ها و تحلیل آماری با استفاده از آزمون ANOVA انجام شد و معنی‌داری اثرات در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) ارزیابی گردید. نتایج تحلیل آماری نشان داد که مدل درجه دوم توانایی مناسبی در پیش‌بینی رفتار پاسخ‌ها دارد و برای بهینه‌سازی فرآیند قابل استفاده است.

در این مطالعه، برای افزایش دقت مدل‌سازی و درک بهتر مکانیزم‌های فیزیکی حاکم بر فرآیند، از شبیه‌سازی اجزای محدود به عنوان ابزار مکمل استفاده شد. در حالی که تحلیل RSM به منظور مدل‌سازی آماری و تعیین شرایط بهینه فرآیند به کار گرفته شد، شبیه‌سازی اجزای محدود امکان تفسیر دقیق‌تر توزیع تنش، کرنش و رفتار مکانیکی درون ماده را فراهم نمود. به منظور

افزایش دقت مدل پاسخ در RSM، در آزمایش‌ها از دامنه پیوسته‌تر متغیرها استفاده شد، در حالی که در شبیه‌سازی به دلیل هزینه محاسباتی و کاهش بار محاسباتی، از سطوح محدودتر استفاده گردید. بدین ترتیب، ترکیب این دو رویکرد امکان هم‌راستایی تحلیل آماری و تفسیر مکانیکی فرآیند فشرده‌سازی را فراهم ساخت.

۶.۲. آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین پاسخ‌های فرآیند

ه منظور ارزیابی اثر شرایط فرآیند فشرده‌سازی، پاسخ‌های فیزیکی و مکانیکی قرص‌های تولیدشده شامل چگالی، مقاومت به نفوذ، تنش در راستای قطر، درصد فشردگی و انرژی ویژه مصرفی تعیین شدند. چگالی ظاهری هر قرص از نسبت جرم به حجم آن مطابق رابطه (۹) محاسبه شد. جرم نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل GF-6100 با دقت 0.01 گرم اندازه‌گیری شد. همچنین قطر و ضخامت نهایی قرص‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری. و حجم آن‌ها با فرض هندسه استوانه‌ای محاسبه گردید.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

که در آن ρ چگالی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، m جرم هر قرص بر حسب گرم و V حجم قرص بر حسب سانتی‌متر مکعب است.

برای تعیین مقاومت به نفوذ، آزمون نفوذ با استفاده از دستگاه تست محوری مدل TM-0250 ساخت شرکت همدان آزمون کاوشگر ایران و پروب استوانه‌ای به قطر ۵ میلی‌متر انجام شد. پروب با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در نمونه نفوذ داده شد و بیشینه نیروی اندازه‌گیری‌شده به عنوان مقاومت به نفوذ قرص گزارش گردید (Gholami et al., 2012).

برای تعیین تنش در راستای قطر، آزمون فشاری قطری (Brazilian test) توسط دستگاه تست محوری مدل TM-0250 ساخت شرکت همدان آزمون کاوشگر ایران بر روی قرص‌ها انجام شد. بدین منظور، نمونه‌ها بین دو صفحه صلب قرار گرفتند و نیروی فشاری با سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه اعمال شد. اگرچه بارگذاری به صورت فشاری انجام شد، اما شکست در اثر تنش‌های کششی داخلی رخ داد. تنش کششی قطری از رابطه (۱۰) محاسبه گردید (Sun et al., 2020).

$$\sigma_t = \frac{2F_{\max}}{\pi DH} \quad (10)$$

که در آن σ_t تنش کششی قطری بر حسب مگاپاسکال، $F_{\max}$ بیشینه نیروی شکست بر حسب نیوتن، D قطر و H ضخامت قرص بر حسب میلی‌متر هستند.

درصد فشردگی قرص (Compression Percentage, CP) به عنوان شاخصی برای بیان میزان فشردگی بستر پودر و ارزیابی رفتار تراکم ماده در فرآیند فشرده‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص که به طور گسترده در مطالعات مرتبط با فشرده‌سازی مواد غذایی و زیستی به کار می‌رود (Markl and Zeitler, 2017; Mohilyuk and Bandere, 2023)، بر اساس تغییر ارتفاع بستر پودر قبل و بعد از فشرده‌سازی مطابق رابطه (۱۱) محاسبه شد.

$$CP(\%) = \frac{H_0 - H_t}{H_0} \times 100 \quad (11)$$

که در آن H_0 ارتفاع اولیه بستر پودر و H_t ارتفاع نهایی قرص پس از فشرده‌سازی بر حسب میلی‌متر هستند. انرژی ویژه مصرفی (Specific Energy Consumption, SEC) به عنوان انرژی مصرف‌شده به ازای واحد حجم قرص مطابق رابطه (۱۲) محاسبه شد.

$$SEC = \frac{E}{V} \quad (12)$$

که در آن SEC انرژی ویژه مصرفی بر حسب ژول بر سانتی متر مکعب، E انرژی مصرفی فرآیند فشرده سازی بر حسب ژول و V حجم نهایی قرص بر حسب سانتی متر مکعب هستند. انرژی مصرفی فرآیند از حاصل ضرب توان هیدرولیکی دستگاه پرس در زمان اعمال بار محاسبه گردید. توان هیدرولیکی دستگاه نیز بر اساس فشار مدار هیدرولیک و دبی روغن ورودی به جک تعیین شد، به طوری که دبی روغن در طول آزمایش ها توسط شیر کنترل جریان در مقدار ثابتی تنظیم و نگهداری گردید. فشار و دبی روغن به ترتیب توسط گیج فشار و فلومتر اندازه گیری شدند. حجم نهایی قرص با فرض هندسه استوانه ای و بر اساس اندازه گیری قطر و ارتفاع نهایی آن تعیین شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. توزیع تنش ون میسز (Von Mises Stress)

تنش ون میسز (Von Mises Stress) به عنوان معیاری برای ارزیابی تنش معادل در مواد استفاده می شود و نشان دهنده سطح تنش کاری ماده است. در فرآیند فشرده سازی پودر، تنش ون میسز امکان شناسایی نقاط بحرانی (نقاط با احتمال ترک خوردگی و جدایش لایه ای) را فراهم می کند. این معیار در مطالعات پیشین برای تحلیل توزیع تنش در قرص های دارویی و غذایی به کار رفته است (Wang et al., 2021; Partheniadis et al., 2022).

شکل (۲)، توزیع تنش ون میسز (Von Mises Stress) در نمونه های قرص با قطرهای ۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی متر و در فشارهای ۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال را نشان می دهد.

شکل (۲). توزیع تنش ون میسز (مگاپاسکال) در نمونه های قرص کدوسبز با قطرهای ۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی متر و در فشارهای ۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال (نتایج استخراج شده در انتهای مرحله بارگذاری، با زمان آسایش ۱۳ ثانیه و محدوده رنگ یکسان ۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال)

Fig. (2). Von Mises Stress distribution in zucchini tablet samples with diameters of 10, 18 and 26 mm and at compression pressures of 5, 7 and 9 MPa. (Results extracted at the end of the loading step, with relaxation time of 13 s and identical color scale of 0-200 MPa)

۱.۱.۳. تأثیر فشار فشرده سازی بر توزیع تنش

در هر سه قطر، با افزایش فشار از ۵ به ۹ مگاپاسکال، شدت تنش ون میسز (Von Mises stress) در مرکز قرص افزایش معنی داری نشان داد. لازم به ذکر است که تمام تنش های مذکور در این بخش تنش ون میسز (معادل) است که با تنش محوری متفاوت است. برای نمونه، در قطر ۱۰ میلی متر، بیشترین تنش در مرکز از ۱۷۵ مگاپاسکال در فشار ۵ مگاپاسکال به ۱۸۹/۷ مگاپاسکال در فشار ۹ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین، در قطر ۱۸ میلی متر، این تنش از ۱۶۴ مگاپاسکال به ۱۷۸ مگاپاسکال و در قطر ۲۶ میلی متر از ۱۴۴ مگاپاسکال به ۱۶۸/۸ مگاپاسکال رسید. در فشارهای پایین (۵ مگاپاسکال)، توزیع تنش نسبتاً متعادل است و نواحی پیرامون قرص دارای تنش های کمتر است. در مقابل، در فشار ۹ مگاپاسکال، ناحیه ی قرمز رنگ در مرکز قرص گسترش یافته و نشان دهنده ی مقادیر تنش بالا است. افزایش فشار موجب تراکم بیشتر ذرات، کاهش تخلخل و افزایش پیوندهای بین ذره ای شده و در نتیجه تمرکز تنش در نواحی مرکزی افزایش یافت، این تمرکز تنش در مرکز قرص، به ویژه در فشارهای بالا، می تواند خطر ترک خوردگی در حین خروج از قالب را افزایش دهد که از نظر طراحی فرآیند فشرده سازی بسیار مهم است (Dudhat et al., 2017; Mohylyuk et al., 2024a). این تمرکز تنش در مرکز قرص، به ویژه در فشارهای بالا، می تواند خطر ترک خوردگی در مرحله خروج از قالب را افزایش دهد که از نظر طراحی فرآیند فشرده سازی بسیار مهم است (Partheniadis et al., 2022).

۲.۱.۳. اثر قطر قرص بر الگوی توزیع تنش

افزایش قطر قرص از ۱۰ به ۲۶ میلی‌متر سبب تغییر الگوی توزیع تنش ون‌میسز (Von Mises stress) از حالت متمرکز مرکزی به حالت پخش‌شده‌تر و متمایل به لبه‌ها شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه ارتفاع پودر ماده در همه‌ی نمونه‌های تولیدشده یکسان بود، ضخامت قرص در شرایط مختلف با توجه به سطوح فشار و اندازه قالب متغیر بود. بنابراین معیارهای قابل کنترل دیگر مانند فشار هیدرولیک و قطر قالب که توسط سیستم‌های کنترل قابل اعمال بودند، در نظر گرفته شدند. در قرص‌های با قطر کوچک (۱۰ میلی‌متر)، بیشترین تمرکز تنش در مرکز مشاهده شد و توزیع به‌صورت شعاعی یکنواخت است؛ اما در قطرهای بزرگ‌تر (۱۸ و ۲۶ میلی‌متر)، الگوی توزیع تنش به سمت نواحی محیطی متمایل می‌شود. به‌عنوان مثال، در فشار ثابت ۷ مگاپاسکال، تنش در مرکز قرص با افزایش قطر کاهش یافت: در قطر ۱۰ میلی‌متر ۱۷۸ مگاپاسکال، در قطر ۱۸ میلی‌متر ۱۷۳/۷ مگاپاسکال و در قطر ۲۶ میلی‌متر ۱۶۰/۸ مگاپاسکال ثبت شد. این امر نشان‌دهنده انتقال تمرکز تنش از مرکز به سمت نواحی محیطی با افزایش قطر است.

این روند تمام فشارها را شامل می‌شود؛ به‌عنوان مثال در فشار ۹ مگاپاسکال، تنش مرکزی از ۱۸۹/۷ مگاپاسکال (قطر ۱۰ میلی‌متر) به ۱۷۸ مگاپاسکال (قطر ۱۸ میلی‌متر) و سپس به ۱۶۸/۸ مگاپاسکال (قطر ۲۶ میلی‌متر) کاهش یافت. مطابق با نتایج، در قرص‌های با قطر بزرگ‌تر، انتقال نیرو از سنبه به مرکز نمونه دشوارتر بوده و این موضوع موجب کاهش تراکم در مرکز و تمرکز تنش در حواشی شد (Partheniadis et al., 2022). در نتیجه، قرص‌های بزرگ‌تر گرایش بیشتری به جدایش یا ترک‌خوردگی از نواحی کناری دارند. این روند در تمامی فشارها (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) مشاهده شد، اما شدت آن در فشارهای بالاتر افزایش یافت.

۳.۱.۳. رفتار تنش در ناحیه تماس قالب و سنبه

در تمام آزمایش‌ها، نواحی تماس بین سنبه و سطح قرص مقادیر تنش ون‌میسز (Von Mises stress) قابل‌توجهی را نشان دادند. در فشار بالا (۹ مگاپاسکال)، نوارهای باریک از تنش‌های بالا (رنگ قرمز) در مجاورت سطح فوقانی و تحتانی قرص قابل‌مشاهده است. این موضوع با یافته‌های پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد که بیان می‌کنند اصطکاک بین قالب و ماده موجب تمرکز تنش در ناحیه تماس شده و در صورت افزایش بیش‌ازحد فشار، احتمال آسیب سطحی قرص یا جدایش لایه‌ای (lamination) وجود دارد (Mohilyuk et al., 2024a).

الگوی توزیع تنش ون‌میسز در قرص‌های مختلف نشان می‌دهد که در قطر ۱۰ میلی‌متر، توزیع تنش در مرکز قرص نسبتاً متقارن و متمرکز است. تنش ون‌میسز از ۱۷۵ مگاپاسکال در فشار ۵ مگاپاسکال افزایش یافته و به ۱۸۹/۷ مگاپاسکال در فشار ۹ مگاپاسکال رسید. در این حالت، ناحیه قرمز رنگ عمیق‌تر به داخل قرص نفوذ می‌کند. در قطر ۱۸ میلی‌متر، توزیع تنش نسبتاً متعادل‌تر است؛ تنش ون‌میسز از ۱۶۴ مگاپاسکال به ۱۷۸ مگاپاسکال افزایش یافت و در فشارهای میانی (۷ مگاپاسکال) نسبتاً توزیع بهتری دیده می‌شود. در قطر ۲۶ میلی‌متر تمرکز تنش مرکزی کمتر است (از ۱۴۴ به ۱۶۸/۸ مگاپاسکال)، اما نواحی کناری و محیطی تنش‌های بیشتری را نشان می‌دهند، بنابراین احتمال شکست از حاشیه‌ها افزایش می‌یابد. (تمام این تنش‌ها تنش ون‌میسز (معادل) هستند که نشان‌دهنده سطح تنش کاری ماده است و نه تنش‌های محوری یا شعاعی منفرد).

۲.۳. شبیه‌سازی عددی فرآیند فشردن قرص

به‌منظور بررسی رفتار مکانیکی پودر کدو سبز تحت فشار و تعیین شرایط بهینه‌ی فشردگی، شبیه‌سازی عددی فرآیند فشردن قرص در نرم‌افزار ABAQUS ۲۰۲۴ در سه سطح فشار (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) و سه قطر قرص (۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی‌متر) انجام شد. تمامی نتایج عددی ارائه‌شده در این بخش، مربوط به انتهای مرحله بارگذاری (End of Loading Step) هستند. نتایج عددی شامل مقادیر تنش بیشینه (σ_{max})، تنش میانگین (σ_{ave})، انرژی ویژه مصرفی (SEC)، درصد تراکم (CP) و نسبت‌های $\frac{\sigma_{ave}}{CP}$ و $\frac{SEC}{CP}$ ، بیان‌گر کارایی فرآیند (در جدول (۳) ارائه گردید. لازم به ذکر است که تمام تنش‌های ارائه‌شده در جدول و تحلیل‌های مرتبط با

آن، تنش‌های محوری (σ_{33}) هستند نه تنش معادل ون‌میسز. هدف از این تحلیل، بررسی تأثیر فشار و ابعاد هندسی بر روی تراکم، استحکام و انرژی موردنیاز در فرآیند فشردده‌سازی قرص بود.

۱.۲.۳. تأثیر فشار بر پارامترهای مکانیکی و انرژی مصرفی

افزایش فشار از ۵ به ۹ مگاپاسکال موجب تغییرات قابل توجهی در تنش محوری میانگین (σ_{ave})، درصد تراکم (CP) و دیگر پارامترهای فرآیند شد. در قطر ۱۰ میلی‌متر، مقدار σ_{max} (تنش محوری بیشینه) از ۱۸۹ مگاپاسکال در فشار ۵ مگاپاسکال به ۱۹۳ مگاپاسکال در فشار ۹ مگاپاسکال افزایش یافت (جدول ۳). همزمان با این افزایش فشار، درصد تراکم (CP) نیز از ۹/۸۷ درصد به ۱۶/۶۷ درصد افزایش یافت، که نشان‌دهنده بهبود تماس بین ذرات و افزایش تراکم نهایی قرص است (Horabik et al., 2019).

در مقابل، در قطر ۱۸ میلی‌متر، تنش محوری بیشینه (σ_{max}) از ۱۲۶ مگاپاسکال در فشار ۵ مگاپاسکال به ۱۷۴ مگاپاسکال در فشار ۹ مگاپاسکال افزایش یافت. درصد تراکم (CP) در این حالت مقادیر پایین‌تری (۶ درصد در فشار ۵ مگاپاسکال و ۱۱/۳۳ درصد در فشار ۹ مگاپاسکال) را نشان داد (جدول ۳). این نشان می‌دهد که افزایش قطر قرص، علیرغم افزایش فشار، سبب کاهش تراکم و پخش شدن توزیع تنش می‌شود (Wang et al., 2021).

علاوه بر این، افزایش فشار باعث افزایش معنی‌داری در انرژی ویژه مصرفی (SEC) شد. در قطر ۱۰ میلی‌متر، این مقدار از ۴۳۳۳ ژول بر سانتی متر مکعب در فشار ۵ مگاپاسکال به ۷۸۰۰ ژول بر سانتی متر مکعب در فشار ۹ مگاپاسکال افزایش یافت (جدول ۳). این افزایش انرژی نشان می‌دهد که در فشارهای بالاتر، مقدار بیشتری انرژی برای فشردن ماده مصرف می‌شود. با این حال، نسبت انرژی ویژه به درصد تراکم (SEC/CP) از ۴۳۹ به ۴۶۸ افزایش یافت، که بدین معنی است که هرچند انرژی کل افزایش یافته است، اما کارایی تراکم در فشارهای بالا بهتر شده است.

تنش محوری میانگین (σ_{ave}) نیز افزایش یافت: در قطر ۱۰ میلی‌متر از ۹۳ مگاپاسکال به ۱۰۶ مگاپاسکال و در قطر ۱۸ میلی‌متر از ۳۱ مگاپاسکال به ۷۸ مگاپاسکال (جدول ۳)، که حاکی از بهبود مکانیکی و افزایش پایداری قرص فشردده شده است (Mohilyuk et al., 2024b).

جدول (۳). بررسی تأثیر فشار و ابعاد هندسی بر روی تراکم، استحکام و انرژی موردنیاز در فرآیند فشردده‌سازی قرص کدو

سبز (نتایج استخراج شده در انتهای مرحله بارگذاری)

Table (3). The effect of pressure and geometric dimensions on density, strength, and energy required in the zucchini tablet compression process (Results recorded at the end of the load phase)

۲.۲.۳. اثر قطر قرص بر استحکام و تراکم

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش قطر قرص از ۱۰ به ۲۶ میلی‌متر، مقادیر تنش محوری بیشینه (σ_{max}) و تنش محوری میانگین (σ_{ave}) روندی کاهشی داشتند (جدول ۳). لازم به ذکر است که تمام تنش‌های مذکور در این بخش تنش‌های محوری (σ_{33}) هستند. در فشار ۹ مگاپاسکال، مقدار σ_{max} از ۱۹۳ مگاپاسکال برای قطر ۱۰ میلی‌متر به ۱۵۳ مگاپاسکال برای قطر ۲۶ میلی‌متر کاهش یافت و مقدار σ_{ave} از ۱۰۶ مگاپاسکال به ۳۷ مگاپاسکال کاهش یافت. این روند ناشی از توزیع غیریکنواخت تنش و کاهش انتقال نیرو در نواحی مرکزی قرص است. مطالعات پیشین، مانند تحقیق وانگ و همکاران، نشان داده‌اند که در قطرهای بزرگ‌تر، گرادیان تراکم در راستای محور مرکزی افزایش یافته و موجب کاهش استحکام مؤثر قرص می‌شود (Wang et al., 2021). همچنین، درصد تراکم (CP) با افزایش قطر کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، در فشار ۷ مگاپاسکال، درصد تراکم از ۱۳/۲۷ درصد برای قطر ۱۰ میلی‌متر به ۴/۲۰ درصد برای قطر ۲۶ میلی‌متر کاهش یافت (جدول ۳). در فشار ۹ مگاپاسکال نیز این روند مشهود است: CP از ۱۶/۶۷ درصد (قطر ۱۰ میلی‌متر) به ۵/۱۳ درصد (قطر ۲۶ میلی‌متر) کاهش یافت. این کاهش قابل توجه تراکم در قرص‌های بزرگ‌تر به دلیل توزیع غیریکنواخت نیروی تماس در سطح و کاهش چگالی موضعی در مرکز قرص است که می‌تواند باعث تضعیف پیوندهای بین‌ذره‌ای شود (Wang et al., 2021; Horabik et al., 2019).

با مقایسه تنش‌های محوری در فشارهای مختلف، مشخص شد که تأثیر قطر بر کاهش استحکام در فشارهای بالاتر بیشتر است. به عنوان مثال، در فشار ۵ مگاپاسکال، کاهش σ_{max} از ۱۸۹ (قطر ۱۰ میلی‌متر) به ۱۰۵ مگاپاسکال (قطر ۲۶ میلی‌متر) ۴۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد، در حالی که این کاهش در فشار ۹ مگاپاسکال ۲۱ درصد است (از ۱۹۳ به ۱۵۳ مگاپاسکال). این نشان می‌دهد که در فشارهای پایین‌تر، تأثیر قطر بر توانایی انتقال نیرو شدیدتر است.

۳.۲.۳. تحلیل نسبت‌های $\frac{SEC}{CP}$ و $\frac{\sigma_{ave}}{CP}$

نسبت‌های $\frac{SEC}{CP}$ و $\frac{\sigma_{ave}}{CP}$ به عنوان شاخص‌های مهم برای ارزیابی کارایی فرآیند فشردگی قرص محسوب می‌شوند (Jiang and Ahuja, 2021). نسبت $\frac{\sigma_{ave}}{CP}$ نشان می‌دهد چه مقدار تنش محوری میانگین برای هر واحد درصد تراکم لازم است. مقادیر بالای این نسبت نشان‌دهنده نیاز به تنش بیشتر برای دستیابی به تراکم است، در حالی که مقادیر پایین نشان‌گر کارایی بهتر فرآیند است.

در نتایج این پژوهش، بیشترین مقدار $\frac{\sigma_{ave}}{CP} = 9/43$ مربوط به قطر ۱۰ میلی‌متر در فشار ۵ مگاپاسکال و کمترین مقدار ۵/۱۵ $\frac{\sigma_{ave}}{CP} =$ مربوط به قطر ۱۸ میلی‌متر در فشار ۵ مگاپاسکال بود (شکل ۳). این اختلاف نشان می‌دهد که در فشارهای پایین‌تر، قطرهای کوچک‌تر نیاز به تنش بیشتری برای تراکم دارند. با افزایش فشار، این نسبت برای قطر ۱۰ میلی‌متر کاهش یافت: از ۹/۴۳ (فشار ۵) به ۷/۶۸ (فشار ۷) و سپس به ۶/۳۶ (فشار ۹)، که بیانگر بهبود کارایی تراکم در فشارهای بالاتر است.

برای قطر ۲۶ میلی‌متر، نسبت $\frac{\sigma_{ave}}{CP}$ در فشارهای مختلف نسبتاً پایدار ماند: ۷/۴۲ (فشار ۵)، ۷/۷۷ (فشار ۷) و ۷/۲۴ (فشار ۹). این پایداری نسبت نشان می‌دهد که قطرهای بزرگ‌تر رفتار متوازن‌تری در برابر تغییرات فشار دارند. این یافته با گزارش‌های لی و همکاران (Li et al., 2025) مطابقت دارد، زیرا قطرهای بزرگ‌تر به دلیل انتقال نسبتاً یکنواخت‌تر تنش در حین فشردگی، پایداری و پیش‌بینی‌پذیری بالاتری دارند.

شکل (۳). نسبت σ_{ave} / CP بر حسب قطر در فشارهای مختلف فشردسازی (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) برای قرص‌سازی پودر کدو سبز

Fig. (3). Ratio of σ_{ave}/CP as a function of die diameter at different compaction pressures (5, 7 and 9 MPa) for zucchini powder tableting

نسبت $\frac{SEC}{CP}$ نیز شاخص مهمی برای ارزیابی بهره‌وری انرژی است. در فشار ۵ مگاپاسکال، نسبت $\frac{SEC}{CP}$ برای قطر ۱۰ میلی‌متر ۴۳۹ بود و برای قطر ۲۶ میلی‌متر ۲۱۴، که نشان می‌دهد قطرهای بزرگ‌تر انرژی کمتری برای تراکم صرف می‌کنند. این تفاوت در فشارهای بالاتر نیز حفظ شد: در فشار ۹ مگاپاسکال، نسبت $\frac{SEC}{CP}$ برای قطر ۱۰ میلی‌متر برابر ۴۶۸ و برای قطر ۲۶ میلی‌متر برابر ۲۲۵ بود (شکل ۴).

شکل (۴). نمودار نسبت SEC / CP بر حسب قطر، در فشارهای مختلف فشردسازی (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) برای قرص سازی پودر کدو سبز

Fig. (4). Graph of SEC/CP ratio by diameter, at different compression pressures (5, 7 and 9 MPa) for zucchini powder tableting

۳.۳. آنالیز واریانس

ضرایب معادله رگرسیونی حاصل از روش سطح پاسخ و اطلاعات آماری به دست آمده برای متغیرهای پاسخ در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به مقادیر آماری ارائه شده در جدول (۳)، مشاهده می شود که مقدار ضریب تبیین (R^2) برای تمامی مدل های ارائه شده در شرایط تهیه قرص حاصل از پودر کدو سبز خشک شده بالاتر از ۰/۹۱ بود، به طوری که بالاترین مقدار مربوط به متغیر چگالی (۰/۹۹۹۹) و کمترین مقدار مربوط به متغیر کشش قطری (۰/۹۱۴۲) بود. این نتایج نشان می دهد که مدل های رگرسیون درجه دوم توانسته اند بیش از ۹۱ درصد تغییرات متغیرهای پاسخ را تبیین کنند. همچنین مقادیر ضریب تبیین تعدیل شده ($Adjusted-R^2$) برای تمامی مدل ها بالاتر از ۰/۸۰ بود که نشان دهنده برازش مناسب مدل های رگرسیونی پس از اعمال برای تعداد پارامترهای موجود در مدل است. با توجه به معنی دار نبودن فاکتور عدم برازش (Lack of Fit) برای همه متغیرهای مورد مطالعه ($P < 0.05$)، می توان نتیجه گرفت که مدل های ارائه شده به خوبی توانسته اند تغییرات متغیرهای وابسته را توصیف کنند و داده های آزمایشگاهی به طور مناسبی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ها هم خوانی دارند. ضریب تغییرات (C.V) برای همه متغیرها کمتر از ۱۵ درصد بود، که نشان دهنده دقت قابل قبول آزمایش ها و تکرارپذیری مناسب داده های تجربی است. کمترین ضریب تغییرات مربوط به متغیر چگالی (۰/۰۵ درصد) و بیشترین مقدار مربوط به انرژی مخصوص تراکم (۱۴/۱۰ درصد) بود. با این حال، مقدار ضریب تبیین پیش بینی شده ($Predicted R^2$) برای پاسخ تنش در راستای قطر (۰/۲۹۷۶) نسبت به ضریب تبیین تعدیل شده آن (۰/۸۰۳۸) اختلاف قابل توجهی دارد که نشان دهنده برازش بیش از حد (Overfitting) مدل درجه دوم برای این پاسخ خاص است. این پدیده عمدتاً به دلیل رفتار غیر خطی تر و اثرات متقابل پیچیده تر این پارامتر در مقایسه با سایر پاسخ هاست و بیانگر آن است که مدل درجه دوم ساده، توانایی پیش بینی دقیق این پاسخ را در خارج از محدوده داده های آزمایشگاهی ندارد. در مقابل، سایر متغیرهای پاسخ (چگالی، مقاومت به نفوذ، CP و SEC) دارای ضریب تبیین پیش بینی شده بالاتر از ۰/۷۵ هستند که نشان دهنده توانایی بسیار خوب مدل ها در پیش بینی مقادیر جدید برای این پاسخ هاست. بنابراین، در این پژوهش، تأکید اصلی بر روی مدل های معتبر برای چگالی، مقاومت به نفوذ، انرژی ویژه مصرفی و درصد فشردگی بوده و نتایج مربوط به تنش در راستای قطر باید با احتیاط تفسیر شوند. مقدار P-value مدل برای تمامی متغیرهای پاسخ کمتر از ۰/۰۱ بود که نشان دهنده معنی داری بالای مدل های رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. این یافته تأیید می کند که حداقل یکی از متغیرهای مستقل (فشار هیدرولیکی، قطر قالب، یا زمان آسایش تنش) تأثیر معنی داری بر هر یک از متغیرهای پاسخ دارد.

جدول (۴). ضرایب مدل برازش داده شده به معادله رگرسیون درجه دوم برای متغیرهای پاسخ در فرآیند قرص سازی. (X_1 :

فشار هیدرولیکی (مگاپاسکال)، X_2 : قطر قالب (میلی متر) و X_3 : زمان آسایش تنش (ثانیه))

Table (4). Coefficients of the model fitted to the quadratic regression equation for the response variables in the process of tablet making of zucchini powder (X_1 : Pressure (MPa), X_2 : Die diameter (mm) and X_3 : Stress relaxation time (S))

۳.۳.۱. چگالی

نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دوم برای پاسخ چگالی (جدول ۵) نشان داد که اثرات خطی فشار هیدرولیکی (X_1)، قطر قالب (X_2) و زمان آسایش تنش (X_3) در سطح احتمال ۱ درصد ($P < 0.01$) معنی دار هستند. بر اساس ضرایب مدل، متغیر قطر قالب با ضریب (۱۰/۲۵-) بیشترین تأثیر منفی را بر چگالی قرص ها داشت، به طوری که افزایش قطر قالب منجر به کاهش چگالی می گردد. متغیر زمان آسایش تنش با ضریب (۳۸/۷۵) تأثیر مثبت و متغیر فشار هیدرولیکی با ضریب (۲۵/۸) تأثیر مثبت کمتری بر چگالی نشان دادند. همچنین، اثرات متقابل دوگانه (X_1X_2 ، X_1X_3 و X_2X_3) و اثرات درجه دوم (X_1^2 ، X_2^2 و X_3^2) از نظر آماری غیر معنی دار بودند ($P > 0.05$). بررسی شاخص های آماری نشان داد که مقدار P-value مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱، ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۹۹۹ و ضریب تبیین تعدیل یافته (R^2_{adj}) برابر با ۰/۹۹۹۸ بود که حاکی از برازش بسیار عالی مدل می باشد.

مقدار P-value مربوط به آزمون عدم برازش (Lack of Fit) برابر با ۰/۹۷۷۰ محاسبه شد که عدم معنی‌داری آن ($P > 0.05$) نشان‌دهنده کفایت مدل در توصیف تغییرات چگالی است.

شکل (۵) تأثیر متغیرهای مستقل بر چگالی قرص کدو سبز را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزایش زمان آسایش تنش از ۳ به ۲۳ ثانیه، منجر به افزایش جزئی چگالی قرص‌ها شد (شکل ۵-الف). همچنین با افزایش قطر قالب از ۱۰ به ۲۶ میلی‌متر، چگالی قرص‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت (شکل ۵-ب). این کاهش چگالی می‌تواند ناشی از کاهش نسبت سطح به حجم و توزیع غیریکنواخت‌تر فشار در قرص‌های بزرگ‌تر باشد. در بررسی تأثیر فشار هیدرولیکی (شکل ۵-ج)، مشاهده شد که با افزایش فشار از ۵ به ۹ مگاپاسکال، چگالی قرص‌ها افزایش یافت. با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۵)، فشار هیدرولیکی ($P < 0.0001$)، قطر قالب ($P < 0.0001$) و زمان آسایش تنش ($P < 0.0001$) هر سه به‌عنوان عوامل مؤثر بر چگالی شناسایی شدند (Abker et al., 2023; Li et al., 2025).

۲.۳.۳. مقاومت به نفوذ و تنش در راستای قطر

نتایج تجزیه واریانس مربوط به مقاومت به نفوذ و تنش در راستای قطر قرص‌های حاصل از پودر کدو سبز در جدول‌های (۸) و (۹) ارائه شده است. مطابق با جدول (۶)، فشار (A) با P-value برابر با ۰/۰۰۱۷، به‌عنوان مهم‌ترین عامل خطی مؤثر بر مقاومت به نفوذ شناسایی شد. همچنین، اثرات متقابل فشار × قطر قالب (AB) و زمان آسایش تنش × قطر قالب (BC) با P-value کمتر از ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۵، به‌ترتیب، تأثیر بسیار معنی‌داری بر مقاومت به نفوذ داشتند. اثر درجه دوم فشار (A^2) نیز با P-value کمتر از ۰/۰۰۰۱ معنی‌دار بود که نشان‌دهنده رابطه غیرخطی بین فشار و مقاومت به نفوذ است. در مقابل، قطر قالب (B) و زمان آسایش تنش (C) به‌تنهایی تأثیر معنی‌داری بر این پارامتر نداشتند ($P\text{-value} > 0.05$). مقدار عدم‌برازش (Lack of Fit) با P-value برابر با ۰/۱۳۸۷ نشان داد که مدل به‌طور مناسبی به داده‌ها برازش یافته است. بر اساس نتایج جدول (۷)، فشار (A) با P-value برابر با ۰/۰۰۳۶، به‌عنوان معنی‌دارترین عامل خطی مؤثر بر کشش قطری شناسایی شد. اثرات متقابل فشار × قطر قالب (AB) و فشار × زمان آسایش تنش (AC) هر دو با P-value برابر با ۰/۰۰۸۷، تأثیر معنی‌داری بر تنش در راستای قطر داشتند. همچنین، اثر درجه دوم قطر قالب (B^2) با P-value برابر با ۰/۰۰۱۷ بسیار معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش هم‌زمان فشار و قطر قالب یا افزایش هم‌زمان فشار و زمان آسایش تنش می‌تواند منجر به افزایش کشش قطری شود. قطر قالب (B) و زمان آسایش تنش (C) به‌تنهایی تأثیر معنی‌داری بر این پارامتر نداشتند. مقدار عدم‌برازش (Lack of Fit) با P-value برابر با ۰/۰۶۸ نشان می‌دهد که مدل برازش مناسبی دارد. این نتایج تأکید می‌کنند که کنترل فشار و بهینه‌سازی تعاملات آن با قطر قالب و زمان آسایش تنش برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب قرص‌ها ضروری است. البته باید توجه داشت که مدل رگرسیونی برای پاسخ تنش در راستای قطر به‌دلیل محدودیت پیش‌بینی ($Predicted R^2$ پایین)، عمدتاً برای تحلیل روند کلی تغییرات (افزایش با فشار، کاهش با قطر) قابل‌استفاده است و برای پیش‌بینی دقیق عددی در شرایط جدید، نیاز به توسعه‌ی مدل‌های غیرخطی یا انجام آزمایش‌های تکمیلی دارد.

جدول (۵). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم چگالی قرص کدو سبز

Table (5). Analysis of variance of the quadratic response surface model for zucchini tablet density

شکل (۵). تأثیر متغیرهای فرآیند بر چگالی قرص کدو سبز: A) تأثیر زمان آسایش تنش، B) تأثیر قطر قالب و C) تأثیر فشار

Fig. (5). Effect of process variables on zucchini tablet density: A) Effect of stress relaxation time, B) Effect of die diameter, C) Effect of hydraulic pressure

جدول (۶). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم مقاومت به نفوذ، قرص کدو سبز

Table (6). Analysis of variance of the quadratic response surface model of penetration resistance of zucchini tablet

برای بررسی دقیق‌تر این اثرات متقابل، شکل (۶) اثرات متقابل فشار و قطر قالب و زمان آسایش تنش را بر مقاومت به نفوذ قرص کدو سبز نشان می‌دهد. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که چگونه افزایش هم‌زمان این فاکتورها بر مقاومت به نفوذ اثرگذار است. همچنین، شکل (۷) اثرات متقابل فشار و قطر قالب و زمان آسایش تنش را بر تنش در راستای قطر قرص کدو سبز نمایش می‌دهد. این اثرات متقابل، به‌ویژه افزایش هم‌زمان فشار و قطر قالب، منجر به افزایش تنش در راستای قطر شده است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که فشار در کنار قطر قالب و زمان آسایش تنش، فاکتورهای مؤثری در تعیین مقاومت به نفوذ و تنش در راستای قطر قرص‌ها هستند. برای بهینه‌سازی این خصوصیات، باید توجه ویژه‌ای به تنظیم این فاکتورها در فرایند تولید قرص‌ها صورت گیرد تا قرص‌ها به استحکام و مقاومت مناسبی دست یابند (Nandi et al., 2021; Horabik et al., 2019; Dudhat et al., 2017; Uzundu et al., 2018; Shah et al., 2019; Mohylyuk et al., 2024b).

جدول (۷). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم تنش در راستای قرص، قرص کدو سبز

Table (7). Analysis of variance of the quadratic stress response surface model along the tablet of zucchini

شکل (۶). اثرات متقابل فشار و قطر قالب و زمان آسایش تنش بر مقاومت به نفوذ قرص کدو سبز : A) اثر متقابل فشار و قطر قالب، B) اثر متقابل قطر قالب و زمان آسایش تنش

Fig.(6). Interaction effects of pressure and die diameter and stress relaxation time on the penetration resistance of zucchini tablets: A) Interaction effect of pressure and die diameter, B) Interaction effect of die diameter and stress relaxation time

شکل (۷). اثرات متقابل فشار و قطر قالب و زمان آسایش تنش بر تنش در راستای قرص کدو سبز : A) اثر متقابل فشار و قطر قالب، B) اثر متقابل فشار و زمان آسایش تنش

Fig. (7). Interaction effects of mold pressure and diameter and stress relaxation time on stress along the diameter of zucchini tablet: A) Interaction effect of die pressure and diameter, B) Interaction effect of pressure and stress relaxation time

۳.۳.۳. انرژی ویژه مصرفی و درصد فشردگی

طبق نتایج جدول (۸)، هر سه متغیر مستقل فشار (A)، قطر قالب (B) و زمان آسایش تنش (C) تأثیر معنی‌داری بر انرژی ویژه مصرفی، دارند ($P\text{-value} < 0.01$). قطر قالب با $P\text{-value}$ کمتر از 0.0001 و $F\text{-value}$ برابر با $202/96$ ، مهم‌ترین عامل مؤثر بر انرژی مصرفی شناسایی شد. پس از آن، زمان آسایش تنش با $P\text{-value}$ کمتر از 0.0001 و فشار با $P\text{-value}$ برابر با 0.0074 به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش قطر قالب و زمان آسایش تنش به‌طور چشم‌گیری منجر به افزایش انرژی مصرفی در فرایند قرص‌سازی شد. همچنین، اثر متقابل قطر قالب $\times$ زمان آسایش تنش (BC) با $P\text{-value}$ برابر با 0.146 در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود، که نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان این دو پارامتر بر انرژی مصرفی است. علاوه بر این، اثر درجه دوم قطر قالب (B^2) با $P\text{-value}$ برابر با 0.0007 بسیار معنی‌دار بود که بیانگر رابطه غیرخطی بین قطر قالب و انرژی مصرفی است. در مقابل، اثرات متقابل AB و AC از نظر آماری معنی‌دار نبودند ($P\text{-value} > 0.05$). مقدار عدم‌برازش (Lack of Fit) با $P\text{-value}$ برابر با 0.245 نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی درجه دوم به‌طور مناسبی به داده‌های تجربی برازش یافته است (Dudhat et al., 2017). برای بررسی دقیق‌تر، شکل (۸) اثرات متقابل قطر قالب و زمان آسایش تنش بر انرژی ویژه مصرفی را نشان می‌دهد، که به‌طور غیرخطی تغییرات مصرف انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Uzundu et al., 2018).

بر اساس نتایج جدول (۹)، فشار (A) و قطر قالب (B) تأثیر بسیار معنی‌داری بر درصد فشردگی قرص کدو سبز داشتند ($P < 0.0001$). در حالی که زمان آسایش تنش (C)، اثرات متقابل (AB، AC و BC) و همچنین اثرات درجه دوم (A^2 ، B^2 و C^2) تأثیر معنی‌داری بر این پاسخ نداشتند ($P\text{-value} > 0.05$) (Shah et al., 2019; Mohylyuk et al., 2024b). شکل (۹) تأثیر فاکتورهای مستقل بر درصد فشردگی قرص کدوسبز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در قسمت (الف) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار از ۵ به ۹ مگاپاسکال، درصد فشردگی به طور معنی‌داری از حدود ۷٪ به بیش از ۱۰٪ افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده تأثیر مثبت فشار بر تراکم ذرات و کاهش فضای خالی درون قرص است. در قسمت (ب)، رابطه معکوس بین قطر قالب و درصد فشردگی مشاهده شد، به‌طوری‌که با افزایش قطر از ۱۳ به ۲۵ میلی‌متر، درصد فشردگی از حدود ۱۳٪ به کمتر از ۴٪ کاهش یافت. این کاهش به دلیل توزیع یکنواخت‌تر فشار در سطح وسیع‌تر و کاهش تنش‌های موضعی است. در قسمت (ج)، زمان آسایش تنش تأثیر معنی‌داری بر درصد فشردگی نشان نمی‌دهد و منحنی تقریباً افقی باقی می‌ماند، که با نتایج آنالیز واریانس مطابقت دارد (Wang et al., 2021).

جدول (۸). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم انرژی ویژه مصرفی، قرص کدو سبز

Table (8). Analysis of variance of the quadratic response surface model of specific energy consumption, zucchini tablets

شکل (۸). A) اثر مستقل فشار، بر انرژی ویژه مصرفی، قرص کدو سبز B) اثرات متقابل قطر قالب و زمان آسایش تنش بر انرژی ویژه مصرفی، قرص کدو سبز

Fig. (8). A) Independent effect of compression pressure on specific energy consumption of zucchini tablet; B) Interactive effects of die diameter and stress relaxation time on specific energy consumption of zucchini tablet.

جدول (۹). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم درصد فشردگی، قرص کدو سبز

Table (9). Analysis of variance of the quadratic response surface model for compression percentage of zucchini tablets

شکل (۹). A) اثر فشار، B) اثر قطر قالب و C) اثر زمان آسایش تنش بر درصد فشردگی قرص کدو سبز

Fig. (9). A) The effect of pressure, B) the effect of die diameter and C) the effect of stress relaxation time on the compression percentage of zucchini tablets

۴.۳. اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی دقت مدل اجزای محدود، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه گردید. از آنجا که درصد فشردگی (CP) در فرآیند کالیبراسیون مدل (تعیین جابجایی سنبه) استفاده نشده بود، این پارامتر به‌عنوان معیار اصلی اعتبارسنجی انتخاب شد. همچنین تنش میانگین محوری (σ_{ave}) به‌عنوان معیار ثانویه در نظر گرفته شد. جدول (۱۰) نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

جدول (۱۰). مقایسه نتایج شبیه‌سازی (FEM) با داده‌های تجربی (Exp) برای تنش میانگین محوری و درصد تراکم

Table (10). Comparison of FEM results with experimental data for average axial stress (σ_{ave}) and compression percentage (CP)

نتایج نشان می‌دهد که میانگین خطای مدل برای پیش‌بینی تنش میانگین محوری (σ_{ave}) برابر با ۲/۶۱ درصد و برای درصد فشردگی (CP) برابر با ۶/۰۸ درصد است. بیشترین خطای CP (۳۰/۲۳ درصد) مربوط به شرایط فشار ۹ مگاپاسکال و قطر ۱۰ میلی‌متر است. این خطا به دلیل افزایش غیرخطی تراکم و اثرات اصطکاکی در فشارهای بالا و قطرهای کوچک رخ داده است.

(Cagliani and Consonni, 2024; Tejada et al., 2020; Savvas et al., 2024) پدیده‌ای که مدل با فرض رفتار خطی ویسکوالاستیک قادر به پیش‌بینی کامل آن نیست و این موضوع نشان‌دهنده محدودیت ذاتی مدل‌های خطی در شرایط بحرانی است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که با حذف این نقطه‌ی بحرانی (که تنها یک مورد از ۹ حالت بررسی‌شده را شامل می‌شود)، میانگین خطای CP به $1/83$ درصد کاهش می‌یابد که بیانگر دقت بسیار بالای مدل در ۸۹ درصد از محدوده‌ی مورد مطالعه است. بنابراین، با وجود خطای قابل‌توجه در یک نقطه‌ی خاص، میانگین خطای کلی مدل ($6/08$ درصد) در محدوده‌ی قابل‌قبولی برای مواد زیست‌پایه قرار دارد. همچنین عملکرد بسیار خوب مدل در اکثر شرایط فرآیند (خطای زیر ۲ درصد در ۸ حالت از ۹ حالت)، نشان‌دهنده‌ی قابلیت اطمینان بالای آن برای پیش‌بینی رفتار فشرده‌سازی در محدوده‌ی فشارهای میانی تا بالا (۵ تا ۹ مگاپاسکال) و قطرهای مختلف (۱۰ تا ۲۶ میلی‌متر) است. از این‌رو، مدل عددی توسعه‌یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند فشرده‌سازی پودر کدو سبز در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد (Ma et al., 2023).

۵.۳. بهینه‌یابی شرایط تهیه قرص

به‌منظور بهینه‌یابی هم‌زمان متغیرهای پاسخ، از بهینه‌یابی آماری با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت استفاده شد. در این فرآیند، هدف رسیدن به مقادیر بهینه برای چگالی، مقاومت به نفوذ، تنش در راستای قطر و درصد فشردگی بود که در حالت بهینه قرار می‌گرفتند، همچنین انرژی ویژه مصرفی در حالت کمینه هدف‌گذاری شد. نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی آماری نشان داد که شرایط بهینه با مطلوبیت $0/73$ به شرح زیر حاصل شد: فشار برابر با ۹ مگاپاسکال، قطر قالب برابر با $15/12$ میلی‌متر و زمان آسایش تنش برابر با $6/35$ ثانیه. در این شرایط بهینه، مقدار چگالی قرص 1320 کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت به نفوذ $48/63$ نیوتون، تنش در راستای قطر $16/63$ مگاپاسکال و درصد فشردگی $12/87$ درصد به‌دست آمد. همچنین، مقدار انرژی ویژه مصرفی (SEC) در این شرایط $1917/05$ ژول بر سانتی‌متر مکعب محاسبه گردید.

انتخاب فشار ۹ مگاپاسکال به عنوان نقطه بهینه به دلیل مشاهده بیشترین میزان تراکم و چگالی در این سطح از فشار است، چرا که افزایش فشار موجب تراکم بیشتر ذرات، کاهش تخلخل و افزایش پیوندهای بین‌ذره‌ای می‌شود (Patel et al., 2006). قطر $15/12$ میلی‌متر به عنوان قطر بهینه انتخاب شد زیرا در قطرهای بزرگ‌تر، انتقال نیرو از سنبه به مرکز نمونه دشوارتر شده و تمرکز تنش در حواشی افزایش می‌یابد (Zakowiecki et al., 2025). زمان آسایش تنش $6/35$ ثانیه نیز امکان توزیع یکنواخت تنش و کاهش تنش‌های پسماند را فراهم می‌کند. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که افزایش زمان آسایش تنش تا یک حد معین می‌تواند استحکام قرص را بهبود بخشد، اما زمان‌های طولانی‌تر تأثیر معنی‌داری بر کیفیت نهایی ندارد (Casian et al., 2026).

نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با یافته‌های پژوهشگران دیگر همخوانی دارد. پاتل و همکاران (Patel et al., 2006) گزارش کردند که در فرآیند فشرده‌سازی پودرهای گیاهی، افزایش فشار تا یک حد مشخص باعث افزایش چگالی و استحکام قرص می‌شود. همچنین زاکوویکی و همکاران (Zakowiecki et al., 2025) در بررسی رفتار مکانیکی مواد ویسکوالاستیک و شکننده در طی قرص‌سازی نشان دادند که ترکیب مناسب فشار و ابعاد هندسی قالب می‌تواند استحکام قرص را بهینه نموده و مصرف انرژی را کاهش دهد. علاوه بر این، مطالعات کاشن و همکاران (Casian et al., 2026) نشان داد که استفاده از روش سطح پاسخ و تابع مطلوبیت ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی هم‌زمان چندین پاسخ در فرآیند تولید قرص است. این شرایط بهینه در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شکل (۱۰). نتایج بهینه‌یابی آماری با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای تهیه قرص کدو سبز

Fig. (10). Statistical optimization results using Design Expert software for preparing zucchini tablets

نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داد که افزایش فشار از ۵ به ۹ مگاپاسکال، تنش ون‌میسز مرکزی را از ۱۷۵ به ۱۸۹/۷ مگاپاسکال افزایش داد، در حالی که افزایش قطر قالب از ۱۰ به ۲۶ میلی‌متر، این تنش را از ۱۸۹/۷ به ۱۶۸/۸ مگاپاسکال کاهش داد و الگوی توزیع تنش را از حالت متمرکز مرکزی به سمت لبه‌ها متمایل ساخت که خطر ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد. بررسی تنش محوری (σ_{33}) نشان داد که افزایش فشار موجب افزایش تنش محوری بیشینه (σ_{max}) و میانگین (σ_{ave}) گردید، به‌طوری‌که در قطر ۱۰ میلی‌متر، σ_{max} از ۱۸۹ به ۱۹۳ مگاپاسکال و σ_{ave} از ۹۳ به ۱۰۶ مگاپاسکال افزایش یافت. در مقابل، افزایش قطر قالب از ۱۰ به ۲۶ میلی‌متر در فشار ۹ مگاپاسکال، σ_{max} را از ۱۹۳ به ۱۵۳ مگاپاسکال کاهش داد که نشان‌دهنده کاهش انتقال نیرو به مرکز قرص‌های بزرگ‌تر است.

تحلیل نسبت‌های کارایی نشان داد که نسبت σ_{ave}/CP با افزایش فشار از ۹/۴۳ به ۶/۳۶ کاهش یافت که بیانگر بهبود کارایی تراکم در فشارهای بالاتر است. همچنین نسبت SEC/CP در قطر ۱۰ میلی‌متر از ۴۳۹ به ۴۶۸ افزایش یافت، در حالی که در قطر ۲۶ میلی‌متر این نسبت به‌طور قابل‌توجهی کمتر (۲۱۴ تا ۲۲۵) بود که نشان‌دهنده مصرف انرژی کمتر در قطرهای بزرگ‌تر به ازای هر واحد تراکم است. به‌طور کلی، استفاده هم‌زمان از نسبت‌های σ_{ave}/CP و SEC/CP به‌عنوان معیارهای کارآمد برای ارزیابی بهره‌وری مکانیکی و انرژی در طراحی فرآیند فشرده‌سازی پودرهای زیستی پیشنهاد می‌شود که تمامی نتایج عددی ارائه‌شده در این پژوهش مربوط به انتهای مرحله بارگذاری بود.

نتایج آنالیز واریانس مدل‌های رگرسیونی درجه دوم نشان داد که مدل‌های توسعه‌یافته برای تمامی پاسخ‌ها از برازش مناسبی برخوردار بودند ($R^2 > 0.91$ و $P\text{-value Model} < 0.01$). فشار و قطر قالب به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پاسخ‌ها شناسایی شدند. اثرات متقابل فشار و قطر قالب (AB) بر مقاومت به نفوذ و تنش در راستای قطر معنی‌دار بود، در حالی که اثرات درجه دوم در بسیاری از پاسخ‌ها غیرمعنی‌دار بودند.

از میان مدل‌های رگرسیونی توسعه‌یافته، مدل‌های مربوط به چگالی ($R^2=0.9999$)، مقاومت به نفوذ ($R^2=0.9703$)، انرژی ویژه مصرفی ($R^2=0.9815$) و درصد فشردگی ($R^2=0.9831$) از اعتبار پیش‌بینی بالایی برخوردار بودند و می‌توانند با اطمینان در طراحی فرآیند استفاده شوند. اما مدل تنش در راستای قطر به‌دلیل Overfitting، صرفاً برای تحلیل روندهای کیفی توصیه می‌شود و پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آینده با استفاده از مدل‌های غیرخطی یا تبدیلات ریاضی، اعتبار پیش‌بینی آن بهبود داده شود. بهینه‌سازی هم‌زمان پاسخ‌ها با استفاده از تابع مطلوبیت، شرایط بهینه شامل فشار ۹ مگاپاسکال، قطر قالب ۱۵/۱۲ میلی‌متر و زمان آسایش تنش ۶/۳۵ ثانیه با مطلوبیت ۰/۷۳ را معرفی نمود. در این شرایط بهینه، مقادیر پیش‌بینی‌شده چگالی، مقاومت به نفوذ، تنش در راستای قطر، درصد فشردگی و انرژی ویژه مصرفی به ترتیب برابر با ۱۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۶۳۰/۴۸ نیوتون، ۱۶/۶۳ مگاپاسکال، ۱۲/۸۷ درصد و ۱۹۱۷/۰۵ ژول بر سانتی‌متر مکعب حاصل گردید.

تطابق روند تغییرات در نتایج شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی آماری نشان‌دهنده اعتبار مدل‌های توسعه‌یافته و قابلیت پیش‌بینی رفتار سیستم می‌باشد. از دیدگاه صنعتی، استفاده از شرایط بهینه به‌دست‌آمده می‌تواند ضمن بهبود کیفیت، یکنواختی و مقاومت مکانیکی قرص‌ها، مصرف انرژی را نیز بهینه نموده و ضایعات تولیدی را کاهش دهد.

نتایج اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های تجربی نشان داد که مدل اجزای محدود توسعه‌یافته با میانگین خطای ۲/۶۱ درصد برای تنش محوری و ۶/۰۸ درصد برای درصد تراکم، از دقت کافی برای تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند فشرده‌سازی برخوردار است. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر تأثیر عوامل دیگر نظیر رطوبت پودر، سرعت فشرده‌سازی و نوع روان‌کننده بر خواص نهایی قرص‌ها متمرکز شوند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

دسترسی به داده‌ها

اسناد و داده‌های پشتیبان مقاله، در صورت درخواست، قابل ارائه خواهند بود.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه بوعلی سینا برای تأمین هزینه‌های مالی این پژوهش، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- Abker, A. M., Wang, S., Chen, S., Ma, M., & Fu, X. (2023). The effects of high-intensity ultrasound and oil types on the physicochemical properties of egg white protein emulsions. *J. Food Eng.*, 339, 111276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111276>
- Abu Fara, D., Al-Hmoud, L., & Badwan, A. A. (2025). Composites of chitin as excipient for pharmaceutical solid. *Jordanian J. Eng. Chem. Ind. (JJEI)*, 8 (1), 36–49. doi: <https://doi.org/10.48103/jjeci842025>
- Adeeko, A., Yudelevich, F., Raphael, G., Avraham, L., Alon, H., Presman, M. Z., & Ziv, C. (2020). Quality and storability of trellised greenhouse-grown, winter-harvested, new sweet acorn squash hybrids. *Agronomy*, 10 (9), 1443. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091443>
- Aziz, M. G., Yusof, Y. A., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., & Scheiling, G. (2018). Material properties and tableting of fruit powders. *Food Engineering Reviews*, 10(2), 66–80. doi: <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9175-0>
- Berkinova, Z., Sauirbayeva, A., Kenzheshov, A., Golman, B., & Spitas, C. (2025). Experimental and numerical analysis of compaction of fine powder bed under artificial high gravity for additive manufacturing. *Adv. Indust. Manufac. Eng.*, 12, 100178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2025.100178>
- Cagliani, L. R., & Consonni, R. (2024). Monitoring the metabolite content of seasoned zucchinis during storage by NMR-based metabolomics. *Heliyon*, 10 (4), e25976. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25976>
- Casian, T., Iurian, S., Gâvan, A., Negoî, O., Marusca, D., Marina, A., & Tomuță, I. (2026). Bridging material variability and tablet performance: Optimization of direct compression using tensile strength–ejection stress mapping. *Pharmaceutics*, 18 (3), 357. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics18030357>
- Dudhat, S. M., Kettler, C. N., & Dave, R. H. (2017). To study capping or lamination tendency of tablets through evaluation of powder rheological properties and tablet mechanical properties of directly compressible blends. *AAPS PharmSciTech*, 18 (4), 1177–1189. doi: <https://doi.org/10.1208/s12249-016-0576-1>
- Fan, Y., Zhang, L., Zhu, J., Zu, Y., & Wang, X. (2022). Viscoelasticity and friction of solid foods measurement by simulating meal-assisting robot. *Int. J. Food Prop.*, 25 (1), 2301–2319. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2133141>
- Gholami, R., Lorestani, A. N., & Jaliliantabar, F. (2012). Determination of physical and mechanical properties of zucchini (summer squash). *Agric. Eng. Int.: CIGR J.*, 14 (1), 136–140
- Horabik, J., Wiącek, J., Parafiniuk, P., Stasiak, M., Bańda, M., & Molenda, M. (2019). Tensile strength of pressure-agglomerated potato starch determined via diametral compression test: Discrete element method simulations and experiments. *Biosyst. Eng.*, 183, 95–109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.019>
- Iswaldi, I., Gómez-Caravaca, A. M., Lozano-Sánchez, J., Arráez-Román, D., Segura-Carretero, A., & Fernández-Gutiérrez, A. (2013). Profiling of phenolic and other polar compounds in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) by reverse-phase high-performance liquid

chromatography coupled to quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Food Res. Int.*, 50 (1), 77–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.030>

Jiang, J., & Ahuja, S. (2021). Addressing patient to patient variability for autologous CAR T therapies. *J. Pharm. Sci.*, 110 (5), 1871–1876. doi: <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2020.12.015>

Li, Z., Xiong, H., Li, Q., Naeem, A., Yang, L., Zhu, W., & Ming, L. (2025). Advancements in the application of numerical simulation during tablet compaction. *Pharmaceutics*, 17 (2), 220. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17020220>

Lorente-Mento, J. M., Serrano, M., Martínez-Romero, D., Ruiz-Aracil, M. C., Valero, D., & Guillén, F. (2023). The simultaneous use of 1-methylcyclopropene and methyl jasmonate vapor as an innovative strategy for reducing chilling injury and maintaining pomegranate fruit quality at suboptimal temperatures. *Foods*, 13 (1), 60. doi: <https://doi.org/10.3390/foods13010060>

Ma, Y., Lian, Y., Meng, X., Xu, M., Zhang, T., Zou, H., & Yang, H. (2023). Process optimization of sea buckthorn fruit powder effervescent tablets by random centroid methodology combined with fuzzy mathematical sensory evaluation. *Processes*, 11 (9), 2639. doi: <https://doi.org/10.3390/pr11092639>

Markl, D., & Zeitler, J. A. (2017). A review of disintegration mechanisms and measurement techniques. *Pharm. Res.*, 34 (5), 890–917. doi: <https://doi.org/10.17863/CAM.9398>

Megías, Z., Martínez, C., Manzano, S., García, A., Reboloso-Fuentes, M. D. M., Garrido, D., & Jamilena, M. (2015). Individual shrink wrapping of zucchini fruit improves postharvest chilling tolerance associated with a reduction in ethylene production and oxidative stress metabolites. *PLoS ONE*, 10 (7), e0133058. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133058>

Mohylyuk, V., & Bandere, D. (2023). High-speed tableting of high drug-loaded tablets prepared from fluid-bed granulated isoniazid. *Pharmaceutics*, 15 (4), 1236. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15041236>

Mohylyuk, V., Paulausks, A., Radzins, O., & Lauberte, L. (2024a). The effect of microcrystalline cellulose–CaHPO₄ mixtures in different volume ratios on the compaction and structural–mechanical properties of tablets. *Pharmaceutics*, 16 (3), 362. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16030362>

Mohylyuk, V., Paulausks, A., Radzins, O., & Lauberte, L. (2024b). Compaction and structural mechanical properties of tablets. *Powder Technol.*, 438, 119–130. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17467.84009/1>

Moradikouchi, A., Sparén, A., Folestad, S., Stake, J., & Rodilla, H. (2022). Terahertz frequency domain sensing for fast porosity measurement of pharmaceutical tablets. *Int. J. Pharm.*, 618, 121579. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.121579>

Nandi, U., Trivedi, V., Ross, S. A., & Douroumis, D. (2021). Advances in twin-screw granulation processing. *Pharmaceutics*, 13 (5), 624. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13050624>

Partheniadis, I., Terzi, V., & Nikolakakis, I. (2022). Finite element analysis and modeling in pharmaceutical tableting. *Pharmaceutics*, 14 (3), 673. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14030673>

Patel, S., Kaushal, A. M., & Bansal, A. K. (2006). Compression physics in the formulation development of tablets. *Crit. Rev. Ther. Drug Carrier Syst.*, 23 (1). doi: <https://doi.org/10.1615/critrevtherdrugcarriersyst.v23.i1.10>

Rashidi, M., Amiri Chaijan, R., Ershadi, A., & Ghasemi, A. (2021). Investigation of chemical and qualitative properties of compressed tablet production from tomato powder under

microwave-hot air condition and process optimization using response surface method. *J. Food Res.*, 31 (4), 73–87. [In Persian]

Savvas, D., Magkana, P., Yfantopoulos, D., Kalozoumis, P., & Ntatsi, G. (2024). Growth and nutritional responses of zucchini squash to a novel consortium of six *Bacillus* sp. strains used as a biostimulant. *Agronomy*, 14 (2), 362. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy14020362>

Shah, H. G., Dugar, R. P., Li, H., Dave, V. S., & Dave, R. H. (2019). Influence of punch geometry (head-flat diameter) and tooling type ('B' or 'D') on the physical–mechanical properties of formulation tablets. *Drug Dev. Ind. Pharm.*, 45 (1), 1–22. doi: <https://doi.org/10.1080/03639045.2018.1525395>

Sun, H., Wang, X., Wang, J., Shi, G., & Chen, L. (2020). Influence of the formula on the properties of a fast dispersible fruit tablet made from mango, Chlorella, and cactus powder. *Food Sci. Nutr.*, 8 (1), 479–488. doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1330>

Tejada, L., Buendía-Moreno, L., Villegas, A., Cayuela, J. M., Bueno-Gavilá, E., Gómez, P., & Abellán, A. (2020). Nutritional and sensorial characteristics of zucchini (*Cucurbita pepo* L.) as affected by freezing and the culinary treatment. *Int. J. Food Prop.*, 23 (1), 1825–1836. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1826512>

Uzundu, B., Leung, L. Y., Mao, C., & Yang, C. Y. (2018). A mechanistic study on tablet ejection force and its sensitivity to lubrication for pharmaceutical powders. *Int. J. Pharm.*, 543 (1-2), 234–244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.03.064>

Wang, L. G., Omar, C., Litster, J. D., Li, J., Mitchell, N., Bellinghausen, S., ... & Slade, D. (2021). Tableting model assessment of porosity and tensile strength using a continuous wet granulation route. *Int. J. Pharm.*, 607, 120934. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120934>

Zakowiecki, D., Kukuls, K., Cal, K., Pelloux, A., & Mohylyuk, V. (2025). Investigating the mechanical behaviour of viscoelastic and brittle pharmaceutical excipients during tableting: Revealing the unobvious potential of advanced compaction simulation. *Pharmaceutics*, 17 (12), 1606. doi: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17121606>

جدول (۱). خواص الاستیک و ویسکوالاستیک پودر کدو سبز مورد استفاده در مدل اجزای محدود

Table (1). Elastic and viscoelastic properties of zucchini powder used in the finite element model

ρ (kg.m ⁻³)	E_0 (MPa)	ν	$g_1=k_1$	$g_2=k_2$	τ_1 (s)	τ_2 (s)
452	95.75	0.42	210.56	50.26	3.56	105.39

* ρ : density, E_0 : initial elastic modulus, ν : Poisson's ratio, g_i and k_i : relative coefficients of shear and bulk moduli in Prony series, τ_i : relaxation time of i -th Prony term.

جدول (۲). نتایج کالیبراسیون اجزای محدود شامل فشار هیدرولیکی، قطر قالب، نیروی معادل و جابجایی متناظر سنبه

Table (2). Calibration results relating hydraulic pressure, die diameter, and piston displacement

Pressure (MPa)	Die diameter (mm)	Equivalent force (kN)	Piston displacement (mm)
5	10	9.82	1.48
	18	9.82	0.9
	26	9.82	0.45
7	10	13.74	1.99
	18	13.74	1.3
	26	13.74	0.63
9	10	17.67	2.5
	18	17.67	1.7
	26	17.67	0.77

جدول (۳). بررسی تأثیر فشار و ابعاد هندسی بر روی تراکم، استحکام و انرژی مورد نیاز در فرآیند فشردن قرص کدو

سبز. (نتایج استخراج شده در انتهای مرحله بارگذاری)

Table (3). The effect of pressure and geometric dimensions on density, strength, and energy required in the zucchini tablet compression process. (Results recorded at the end of the load phase)

P (MPa)	D (mm)	σ_{max} (MPa)	σ_{ave} (MPa)	SEC (J/cm ³)	CP (%)	$\frac{SEC}{CP}$	$\frac{\sigma_{ave}}{CP}$
5	10	189	93	4333	9.87	439	9.43
	18	126	31	1337	6.00	223	5.15
	26	105	22	641	3.00	214	7.42
7	10	191	102	6067	13.27	457	7.68
	18	168	68	1872	8.67	216	7.87
	26	146	33	897	4.20	214	7.77
9	10	193	106	7800	16.67	468	6.36
	18	174	78	2407	11.33	212	6.90
	26	153	37	1154	5.13	225	7.24

* σ_{max} : maximum axial stress, σ_{ave} : average axial stress, SEC: specific energy consumption, CP: compression percentage.

جدول (۴). ضرایب مدل برازش داده شده به معادله رگرسیون درجه دوم برای متغیرهای پاسخ در فرآیند قرص سازی. (X_1 : فشار هیدرولیکی (مگاپاسکال)، X_2 : قطر قالب (میلی متر) و X_3 : زمان آسایش تنش (ثانیه))

Table (4). Coefficients of the model fitted to the quadratic regression equation for the response variables in the process of tablet making of zucchini powder (X_1 : Pressure (MPa), X_2 : Die diameter (mm) and X_3 : Stress relaxation time (S))

Model coefficients	Response variable				
	Density (kg.m^{-3})	Resistance to penetration (N)	Tension along the diameter (MPa)	CP (%)	SEC (J.cm^{-3})
Intercept					
(b ₀)	1301.65	496.61	16.13	8.97	1837.47
Linear coefficients					
(b ₁) X_1	8.25 **	-54.13**	2.21**	2.63**	578.11**
(b ₂) X_2	-100.25**	-12.88 ^{ns}	1.19 ^{ns}	-4.3**	-2213.2**
(b ₃) X_3	38.75**	22.87 ^{ns}	0.0125 ^{ns}	0 ^{ns}	1556.45**
Interaction coefficients					
(b ₁₂) X_1X_2	-5.2E-15 ^{ns}	-267.5**	5.25**	-0.8**	-526.23 ^{ns}
(b ₁₃) X_1X_3	-1.3E-15 ^{ns}	42.5 ^{ns}	-5.25**	0 ^{ns}	477.88 ^{ns}
(b ₂₃) X_2X_3	-2.1E-15 ^{ns}	-185.5**	0.65 ^{ns}	0 ^{ns}	-1416.77*
Quadratic coefficients					
(b ₁₁) X_1^2	-17.39 ^{ns}	169.3**	-1.53 ^{ns}	-0.35 ^{ns}	-17.48 ^{ns}
(b ₂₂) X_2^2	-17.39 ^{ns}	34.8 ^{ns}	-4.63**	-0.61*	1592.15**
(b ₃₃) X_3^2	-17.39 ^{ns}	2.3 ^{ns}	-2.03 ^{ns}	-0.34 ^{ns}	-17.48 ^{ns}
Lack of Fit (P-value)	0.9770	0.1378	0.0680	0.9929	0.245
P-value of model	< 0.0001	0.0002	0.0054	< 0.0001	< 0.0001
R ²	0.9999	0.9703	0.9142	0.9831	0.9815
Adjusted-R ²	0.9998	0.9321	0.8038	0.9783	0.9577
Predicted R ²	0.9997	0.7586	0.2976	0.9936	0.8439
C.V. (%)	0.0537	4.01	7.26	3.88	14.10
Std. Dev.	0.6994	21.86	1.03	0.3324	310.71

*: Significant at the 5% probability level ($0.01 < P \leq 0.05$)

**: Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$)

^{ns}: Not significant ($P > 0.05$)

جدول (۵). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم چگالی قرص کدو سبز

Table (5). Analysis of variance of the quadratic response surface model for zucchini tablet density

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	f-value	P-value
Model	46478.81	9	5164.31	10558.15	< 0.0001**
A-Pressure	272.25	1	272.25	556.6	< 0.0001**
B-Diameter	40200.25	1	40200.25	82187.18	< 0.0001**
C-Relaxation time	6006.25	1	6006.25	12279.44	< 0.0001**
AB	-5.2E-15	1	-5.2E-15	-5.2E-15	1 ^{ns}
AC	-1.3E-15	1	-1.3E-15	-1.3E-15	1 ^{ns}

BC	-2.1E-15	1	-2.1E-15	-2.1E-15	1 ^{ns}
A ²	0.0366	1	0.0366	0.0749	0.7923 ^{ns}
B ²	0.0366	1	0.0366	0.0749	0.7923 ^{ns}
C ²	0.0366	1	0.0366	0.0749	0.7923 ^{ns}
Residual	3.42	7	0.4891		
Lack of fit	0.7572	5	0.1514	0.1136	0.977 ^{ns}
Pure error	2.67	2	1.33		
Total	46482.24	16			

*: Significant at the 5% probability level ($0.01 < P \leq 0.05$)

**: Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$)

ns: Not significant ($P > 0.05$)

جدول (۶). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم مقاومت به نفوذ، قرص کدو سبز

Table (6). Analysis of variance of the quadratic response surface model of penetration resistance of zucchini tablet

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	f-value	P-value
Model	1.09E+05	9	12147.21	25.42	0.0002**
A-Pressure	11718.06	1	11718.06	24.52	0.0017**
B-Diameter	663.06	1	663.06	1.39	0.2773 ^{ns}
C-Relaxation time	2093.06	1	2093.06	4.38	0.0747 ^{ns}
AB	35778.13	1	35778.13	74.86	< 0.0001**
AC	903.13	1	903.13	1.89	0.2116 ^{ns}
BC	17205.13	1	17205.13	36	0.0005**
A ²	34698.48	1	34698.48	72.6	< 0.0001**
B ²	1466.36	1	1466.36	3.07	0.1233 ^{ns}
C ²	6.43	1	6.43	0.0134	0.9109 ^{ns}
Residual	3345.6	7	477.94		
Lack of fit	3152.93	5	630.59	6.55	0.1378 ^{ns}
Pure error	192.67	2	96.33		
Total	1.13E+05	16			

*: Significant at the 5% probability level ($0.01 < P \leq 0.05$)

**: Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$)

^{ns}: Not significant ($P > 0.05$)

جدول (۷). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم تنش در راستای قرص، قرص کدو سبز

Table (7). Analysis of variance of the quadratic stress response surface model along the tablet of zucchini

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	f-value	P-value
Model	79.23	9	8.8	8.28	0.0054**
A-Pressure	19.58	1	19.58	18.42	0.0036**
B-Diameter	5.64	1	5.64	5.31	0.0547 ^{ns}
C-Relaxation time	0.0006	1	0.0006	0.0006	0.9813 ^{ns}
AB	13.78	1	13.78	12.97	0.0087**
AC	13.78	1	13.78	12.97	0.0087**
BC	0.2113	1	0.2113	0.1988	0.6692 ^{ns}
A ²	2.84	1	2.84	2.68	0.1459 ^{ns}
B ²	25.98	1	25.98	24.44	0.0017**
C ²	5	1	5	4.71	0.0667 ^{ns}
Residual	7.44	7	1.06		
Lack of fit	7.23	5	1.45	14	0.068 ^{ns}
Pure error	0.2067	2	0.1033		
Total	86.67	16			

*: Significant at the 5% probability level ($0.01 < P \leq 0.05$)

**: Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$)

^{ns}: Not significant ($P > 0.05$)

جدول (۸). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم انرژی ویژه ی مصرفی، قرص کدو سبز

Table (8). Analysis of variance of the quadratic response surface model of specific energy consumption, zucchini tablets

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	f-value	P-value
Model	3.60E+07	9	4.00E+06	41.38	< 0.0001**
A-Pressure	1.34E+06	1	1.34E+06	13.85	0.0074**
B-Diameter	1.96E+07	1	1.96E+07	202.96	< 0.0001**
C-Relaxation time	9.69E+06	1	9.69E+06	100.38	< 0.0001**
AB	1.39E+05	1	1.39E+05	1.43	0.27ns
AC	1.14E+05	1	1.14E+05	1.18	0.3128ns
BC	1.00E+06	1	1.00E+06	10.4	0.0146*
A ²	362.51	1	362.51	0.0038	0.9528ns
B ²	3.20E+06	1	3.20E+06	33.19	0.0007**
C ²	362.51	1	362.51	0.0038	0.9528ns
Residual	6.76E+05	7	96536.93		
Lack of fit	6.69E+05	5	1.34E+05	40.15	0.245ns
Pure error	6666.67	2	3333.33		
Total	3.66E+07	16			

*: Significant at the 5% probability level ($0.01 < P \leq 0.05$)

** : Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$)

ns: Not significant ($P > 0.05$)

جدول (۹). تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم درصد فشردگی ، قرص کدو سبز

Table (9). Analysis of variance of the quadratic response surface model for compression percentage of zucchini tablets

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	f-value	P-value
Model	103.7	9	11.52	104.25	< 0.0001**
A-Pressure	27.72	1	27.72	250.81	< 0.0001**
B-Diameter	75.17	1	75.17	680.13	< 0.0001**
C-Relaxation time	0	1	0	0	1 ^{ns}
AB	0.32	1	0.32	2.9	0.1326 ^{ns}
AC	-5.2E-15	1	-5.2E-15	-5.2E-15	1 ^{ns}
BC	-1.3E-15	1	-1.3E-15	-1.3E-15	1 ^{ns}
A2	0.1509	1	0.1509	1.37	0.2809 ^{ns}
B2	0.4624	1	0.4624	4.18	0.0801 ^{ns}
C2	0.1466	1	0.1466	1.33	0.2872 ^{ns}
Residual	0.7737	7	0.1105		
Lack of fit	0.107	5	0.0214	0.0642	0.9929 ^{ns}
Pure error	0.6667	2	0.3333		
Total	104.47	16			

*: Significant at the 5% probability level ($0.01 < P \leq 0.05$)

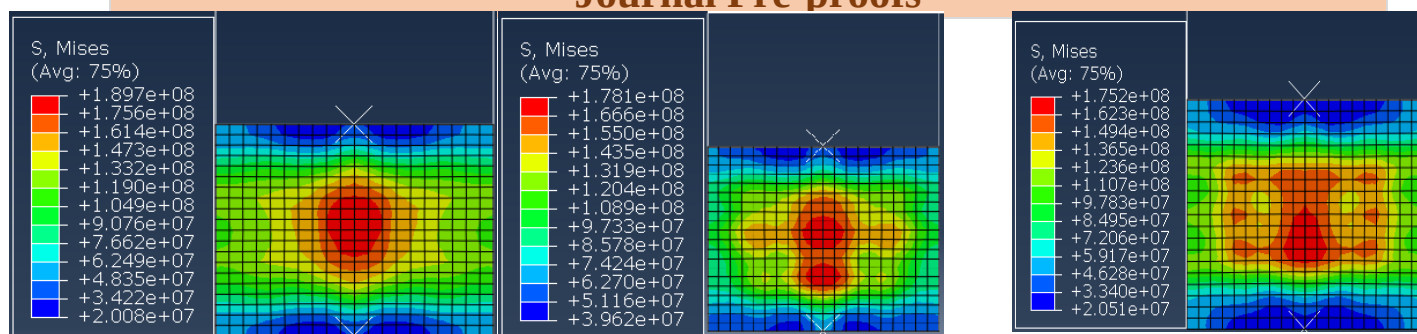
** : Significant at the 1% probability level ($P \leq 0.01$)

ns: Not significant ($P > 0.05$)

جدول (۱۰). مقایسه نتایج شبیه‌سازی (FEM) با داده‌های تجربی (Exp) برای تنش میانگین محوری و درصد تراکم

Table (10). Comparison of FEM results with experimental data for average axial stress (σ_{ave}) and compression percentage (CP)

P (MPa)	D (mm)	σ_{ave} (FEM) (MPa)	σ_{ave} (Exp) (MPa)	Error σ_{ave} (%)	CP (FEM) (%)	CP (Exp) (%)	Error CP (%)
5	10	93	94	1.06	9.87	9.8	0.71
	18	31	30	3.33	6	6.2	3.23
	26	22	23	4.35	3	3.1	3.23
7	10	102	103	0.97	13.27	11.8	12.46
	18	68	70	2.86	8.67	8.7	0.34
	26	33	34	2.94	4.2	4.2	0
9	10	106	102	3.92	16.67	12.8	30.23
	18	78	79	1.27	11.33	10.9	3.94
	26	37	36	2.78	5.13	5.1	0.59
Mean				2.61			6.08



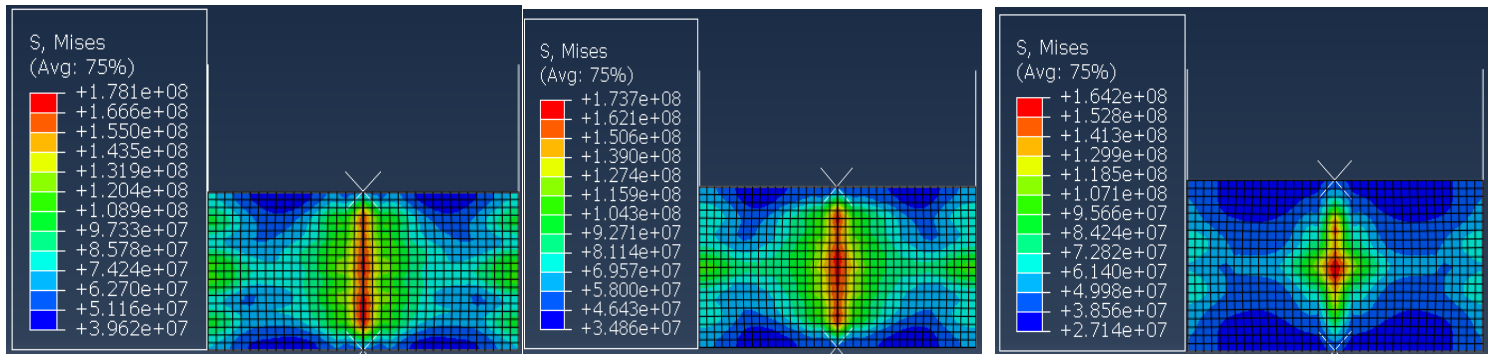
شکل (۱). مونتاژ اجزای مدل شامل قالب، سنبه و بستر پودر در محیط نرم افزار آباکوس

Fig. (1). Assembly of the die, punch, and powder bed in Abaqus

Die diameter =10mm, Pressure= 9 MPa

Die diameter =10mm, Pressure= 7 MPa

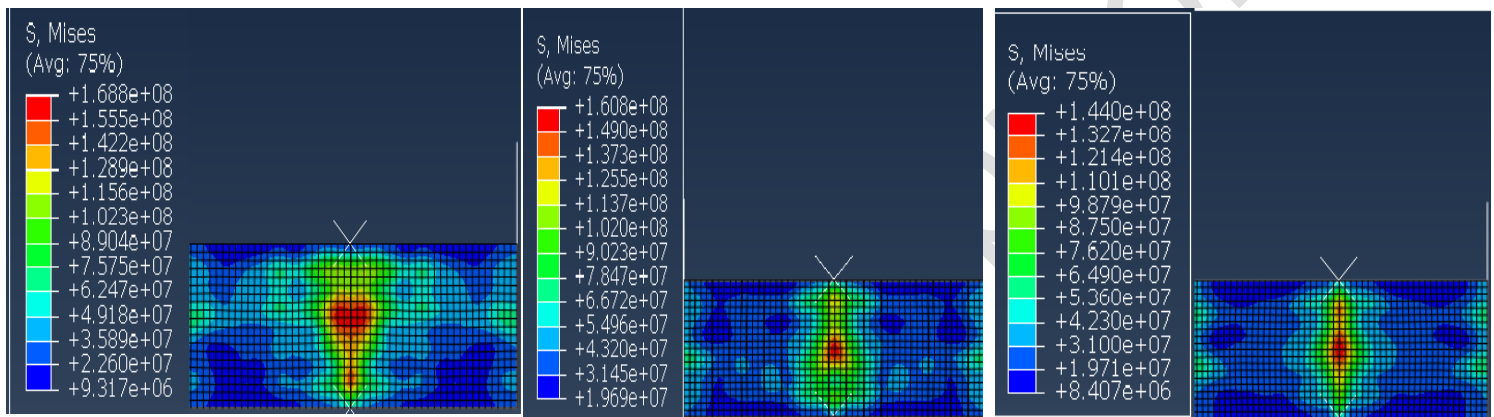
Die diameter =10mm, Pressure= 5 MPa



Die diameter =18 mm, Pressure= 9 MPa

Die diameter =18 mm, Pressure= 7 MPa

Die diameter =18 mm, Pressure= 5 MPa



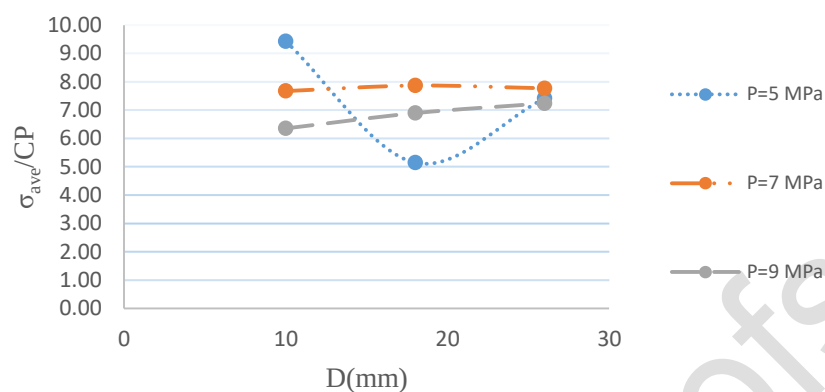
Die diameter =26 mm, Pressure= 9 MPa

Die diameter =26 mm, Pressure= 7 MPa

Die diameter =26 mm, Pressure= 5 MPa

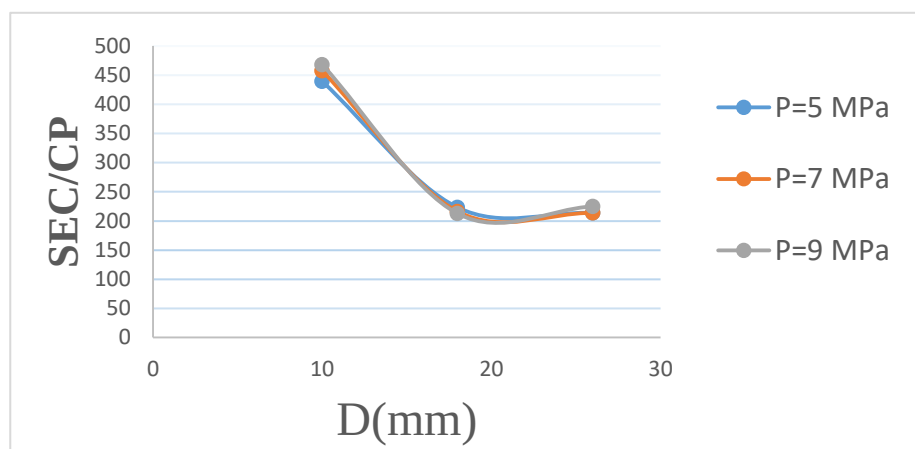
شکل (۲). توزیع تنش ون میسز در نمونه های قرص کدوسبز با قطرهای ۱۰، ۱۸ و ۲۶ میلی متر و در فشارهای ۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال (نتایج استخراج شده در انتهای مرحله بارگذاری، با زمان آسایش ۱۳ ثانیه و محدوده رنگ یکسان ۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال)

Fig. (2). Von Mises Stress distribution in zucchini tablet samples with diameters of 10, 18 and 26 mm and at compression pressures of 5, 7 and 9 MPa. (Results extracted at the end of the loading step, with relaxation time of 13 s and identical color scale of 0-200 MPa)



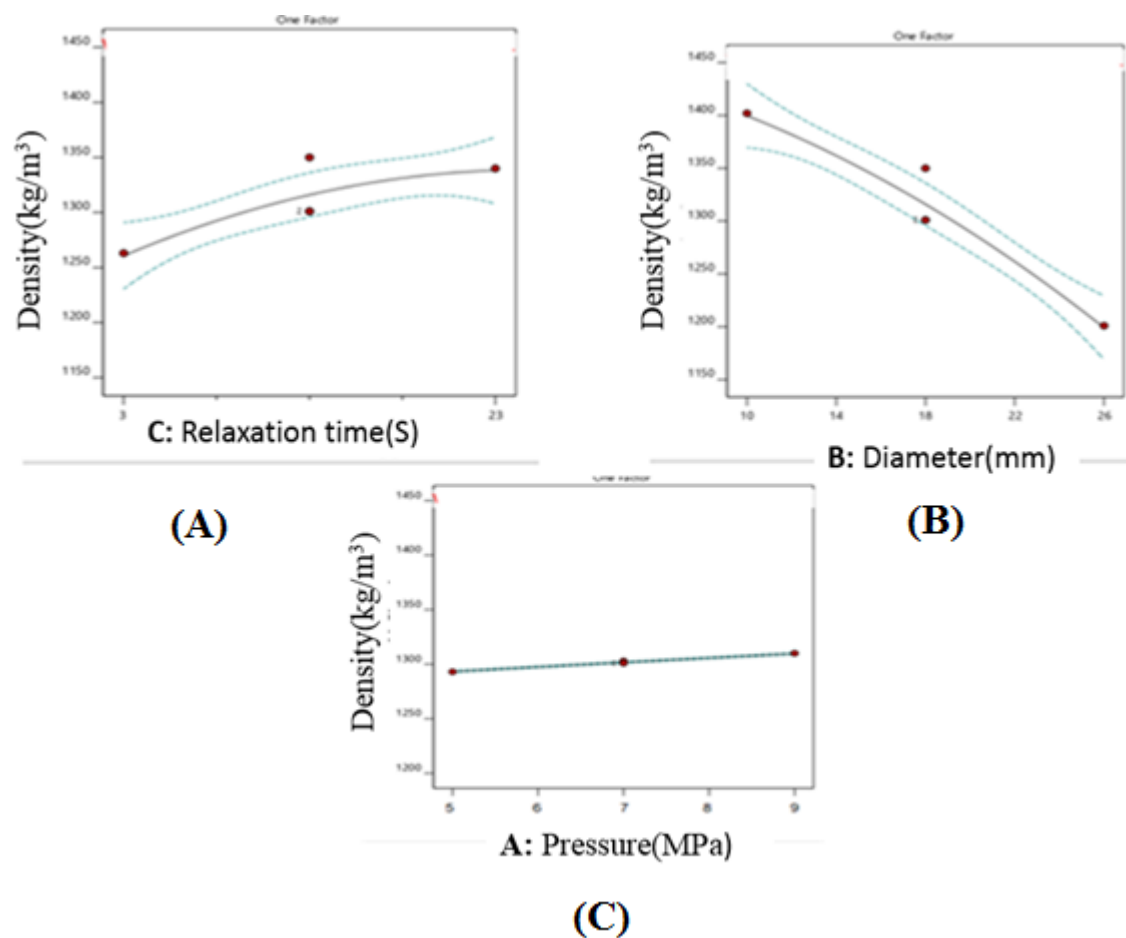
شکل (۳). نسبت σ_{ave}/CP بر حسب قطر در فشارهای مختلف (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) برای قرص سازی پودر کدو سبز

Fig. (3). Ratio of σ_{ave}/CP as a function of die diameter at different compaction pressures (5, 7 and 9 MPa) for zucchini powder tableting



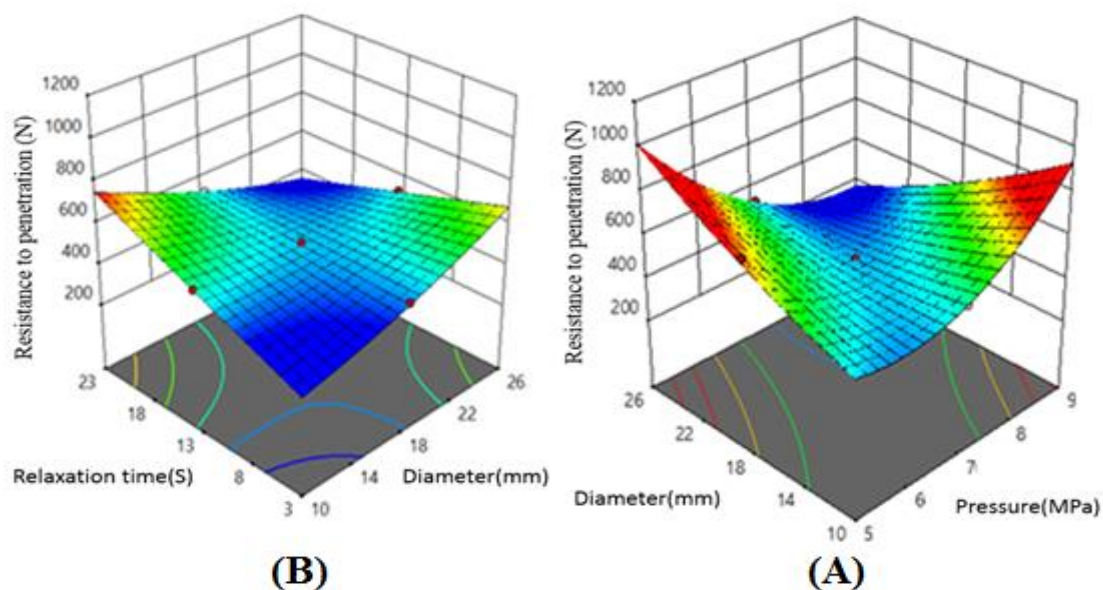
شکل (۴). نمودار نسبت SEC / CP بر حسب قطر، در فشارهای مختلف (۵، ۷ و ۹ مگاپاسکال) برای قرص سازی پودر کدو سبز

Fig. (4). Graph of SEC/CP ratio by diameter, at different compression pressures (5, 7 and 9 MPa) for zucchini powder tableting



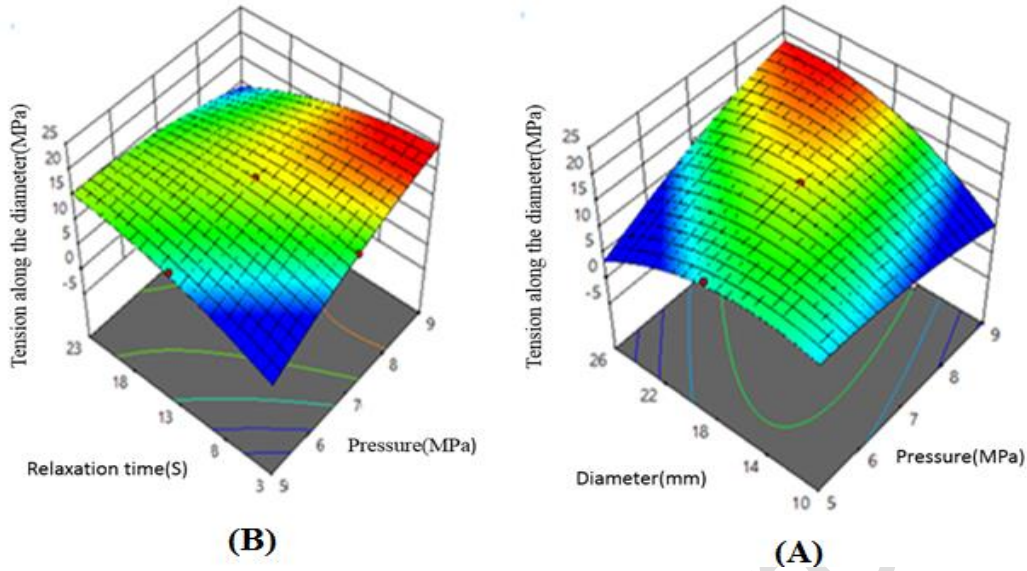
شکل (۵). تأثیر متغیرهای فرآیند بر چگالی قرص کدو سبز: (A) تأثیر زمان آسایش تنش، (B) تأثیر قطر قالب و (C) تأثیر فشار

Fig. (5). Effect of process variables on zucchini tablet density: A) Effect of stress relaxation time, B) Effect of die diameter, C) Effect of hydraulic pressure



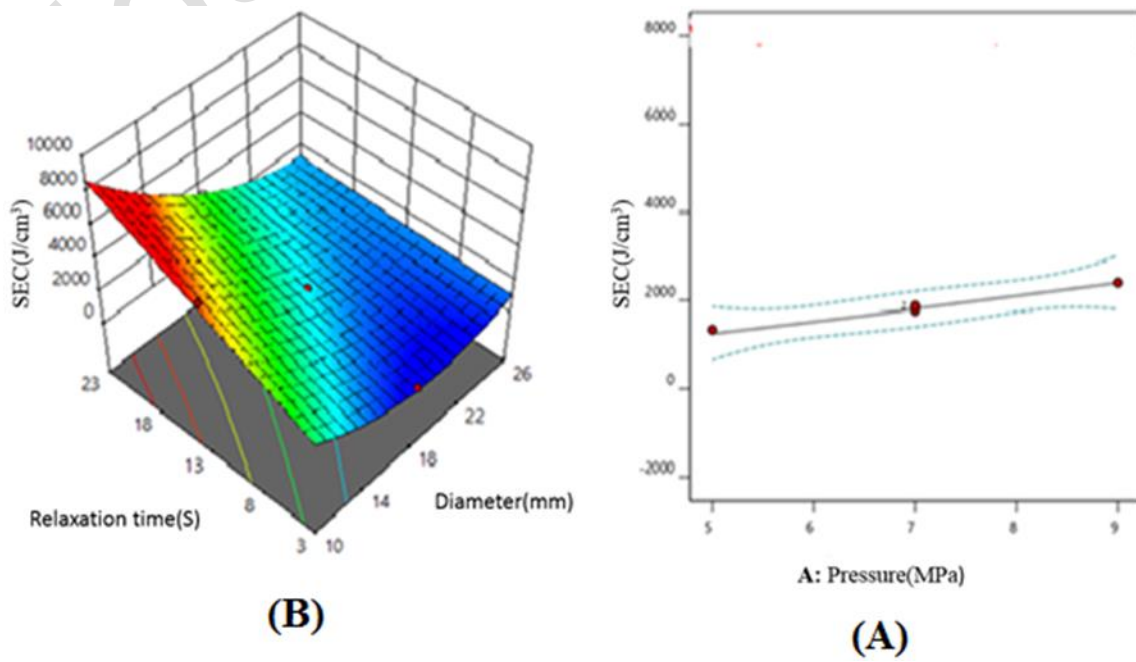
شکل (۶). اثرات متقابل فشار و قطر قالب و زمان آسایش تنش بر مقاومت به نفوذ قرص کدو سبز : (A) اثر متقابل فشار و قطر قالب، (B) اثر متقابل قطر قالب و زمان آسایش تنش

Fig. (6). Interaction effects of pressure and die diameter and stress relaxation time on the penetration resistance of zucchini tablets: A) Interaction effect of pressure and die diameter, B) Interaction effect of die diameter and stress relaxation time



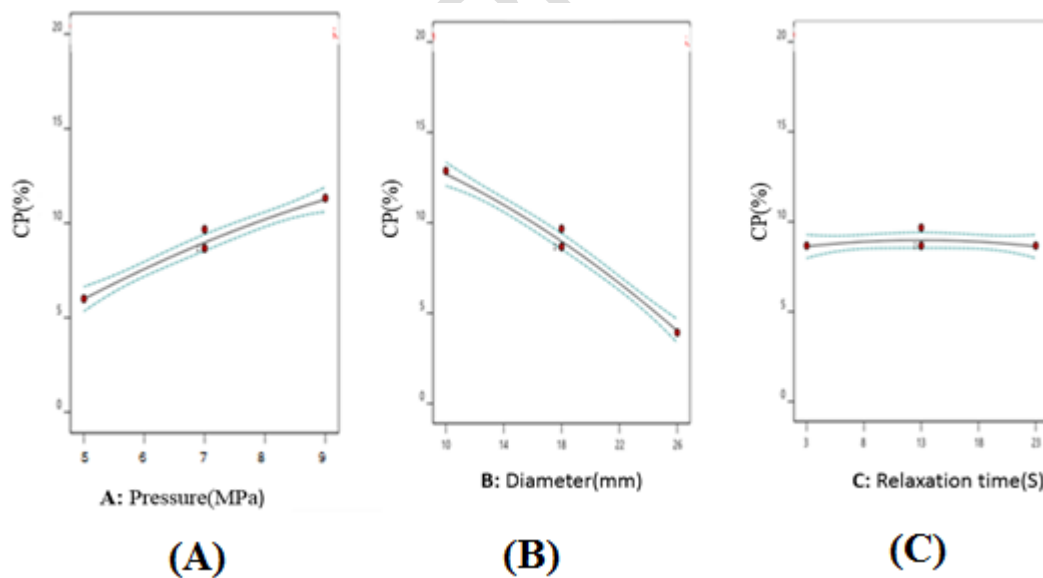
شکل (۷). اثرات متقابل فشار و قطر قالب و زمان آسایش تنش بر تنش در راستای قطر، قرص کدو سبز: (A) اثر متقابل فشار و قطر قالب، (B) اثر متقابل فشار و زمان آسایش تنش

Fig. (7). Interaction effects of mold pressure and diameter and stress relaxation time on stress along the diameter of zucchini tablet: A) Interaction effect of die pressure and diameter, B) Interaction effect of pressure and stress relaxation time



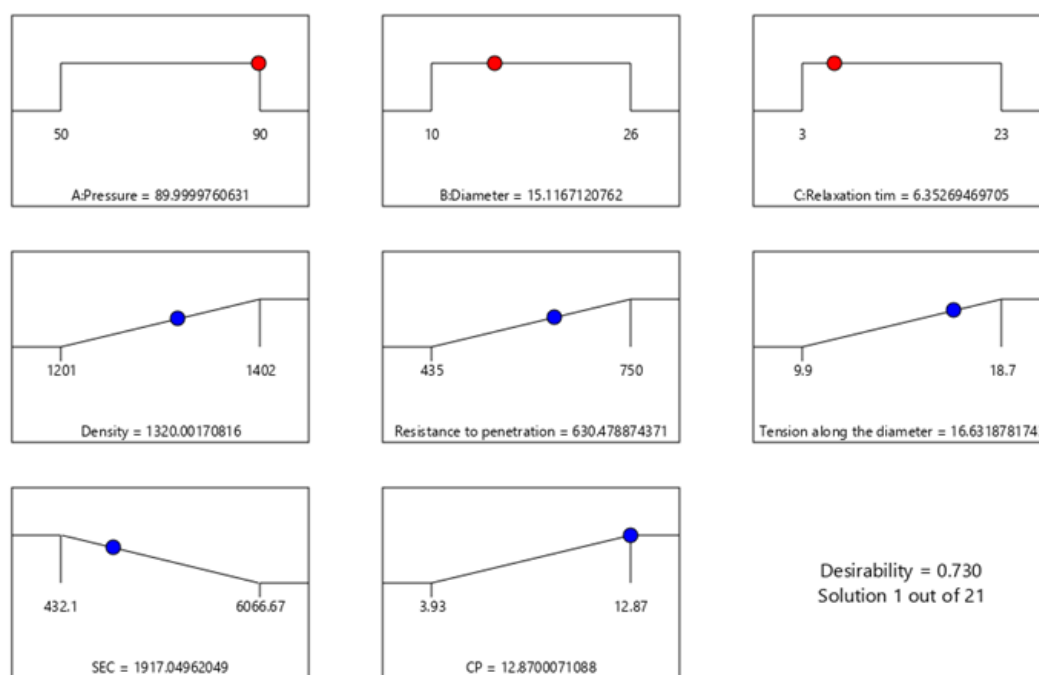
شکل (۸). A) اثر مستقل فشار، بر انرژی ویژه مصرفی، قرص کدو سبز B) اثرات متقابل قطر قالب و زمان آسایش تنش بر انرژی ویژه مصرفی، قرص کدو سبز

Fig. (8). A) Independent effect of compression pressure on specific energy consumption of zucchini tablet; B) Interactive effects of die diameter and stress relaxation time on specific energy consumption of zucchini tablet.



شکل (۹). A) اثر فشار، B) اثر قطر قالب و C) اثر زمان آسایش تنش بر درصد فشردگی قرص کدو سبز

Fig. (9). A) The effect of pressure, B) the effect of die diameter and C) the effect of stress relaxation time on the compression percentage of zucchini tablets



شکل (۱۰). نتایج بهینه‌یابی آماری با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای تهیه قرص کدو سبز
Fig.(10). Statistical optimization results using Design Expert software for preparing zucchini tablets

Stress Analysis and Optimization of Compression of Food Materials Using FEM and RSM (Case Study: Zucchini)

Reza Rahimzadeh¹, Reza Amiri Chayjan^{1*}, Ali Ghasemi²

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

2. Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

*Corresponding author: amirireza@basu.ac.ir

Introduction: Zucchini (*Cucurbita pepo* L.) is one of the most widely consumed vegetables globally, cultivated extensively in temperate regions including Europe, America, and Asia. Despite its high nutritional value, zucchini is highly perishable due to its soft tissue and high moisture content (approximately 95%), leading to significant postharvest losses estimated between 20-50% of total production. Converting zucchini into dried powder and subsequently compressing it into tablets represents an effective strategy for reducing waste, improving shelf-life, facilitating transportation, and enhancing product value. Zucchini powder is widely used in the food industry as a natural additive in soups, sauces, snacks, cakes, and biscuits due to its high nutritional value, natural green color, and mild flavor. Additionally, it is considered a natural dietary supplement in functional food products. The physical and mechanical properties of powder, including density, compressibility, and tablet strength, play crucial roles in final product quality. In recent years, numerical simulation, particularly the Finite Element Method (FEM), has emerged as a powerful tool for analyzing and optimizing compaction processes in food and pharmaceutical industries. FEM enables prediction of stress distribution, deformation behavior, and optimal process conditions without extensive experimental trials. Previous studies have demonstrated the application of FEM in food and pharmaceutical processing; Wang et al. (2021) used FEM for numerical modeling of pharmaceutical powder tableting, Partheniadis et al. (2022) provided a comprehensive review of FEM applications in pharmaceutical tableting, Li et al. (2025) reviewed recent advancements in numerical simulation during tablet compaction, and Ma et al. (2023) employed response surface methodology for optimization of effervescent tablet production from fruit powder. However, limited research has been conducted on numerical modeling of vegetable powder compaction, especially for zucchini, with few studies simultaneously investigating the effects of operational parameters on mechanical properties and energy consumption. Therefore, this research aims to simulate the zucchini powder compaction process using FEM, investigate the effects of hydraulic pressure, die diameter, and stress relaxation time on tablet mechanical and physical properties, and perform multi-response optimization using Response Surface Methodology (RSM).

Materials and Methods: Fresh zucchini was obtained from a local market, washed, and sliced into 3 mm pieces. Moisture content was determined by oven-drying at 105°C for 24 hours. Samples were dried in a continuous hot-air dryer (previously fabricated in Department of Biosystems Engineering, Bu-Ali Sina University) at 50, 60, and 70°C with air velocities of 1.5, 2.5, and 3.5 m/s until reaching 12% moisture content (dry basis). The final moisture content of 12% (dry basis) was selected based on previous studies, as at this moisture level, the resulting powder has suitable flowability, high compressibility, and adequate microbial stability (Aziz et al., 2018; Rashidi et al., 2021). The dried material was milled and sieved through a No. 14 mesh (1.41 mm). Tablets were produced using a hydraulic press at speeds of 6 mm/s under nominal pressures of 5, 7, and 9 MPa, die diameters of 10, 18, and 26 mm, and stress relaxation times of 3, 13, and 23 seconds. Mechanical properties including density, penetration resistance, diametral tensile strength, compression percentage (CP), and specific energy consumption (SEC) were measured. The viscoelastic behavior of zucchini powder was modeled using the generalized Maxwell model with Prony series parameters. FEM simulations were performed in Abaqus 2024 using a 2D axisymmetric model with explicit dynamic solver. RSM with a second-order polynomial model was employed for statistical optimization using Design-Expert software. The independent variables were pressure (X_1), die diameter (X_2), and stress relaxation time (X_3), while density, penetration resistance, tension along diameter, CP, and SEC served as responses.

Results and Discussion Von Mises stress was selected as an equivalent stress criterion to identify critical regions with cracking and lamination risk (Wang et al., 2021; Partheniadis et al., 2022). FEM simulations revealed that increasing compaction pressure from 5 to 9 MPa significantly enhanced Von Mises stress intensity at the tablet center, from 175 to 189.7 MPa for 10 mm diameter tablets, while increasing die diameter from 10 to 26 mm reduced

central stress from 189.7 to 168.8 MPa and shifted stress distribution toward the edges, increasing cracking risk. Numerical results showed that at constant 10 mm diameter, increasing pressure from 5 to 9 MPa increased maximum axial stress ($\sigma_{\max}$) from 189 to 193 MPa, average axial stress (σ_{ave}) from 93 to 106 MPa, and compression percentage (CP) from 9.87% to 16.67%. Conversely, increasing die diameter from 10 to 26 mm at constant 9 MPa pressure reduced $\sigma_{\max}$ from 193 to 153 MPa, σ_{ave} from 106 to 37 MPa, and CP from 16.67% to 5.13%. Efficiency ratio analysis showed that $\sigma_{\text{ave}}/\text{CP}$ decreased from 9.43 to 6.36 with increasing pressure, indicating improved compaction efficiency at higher pressures. SEC/CP ratio for 10 mm diameter increased from 439 to 468, while for 26 mm diameter remained lower (214-225), demonstrating lower energy consumption per compaction unit in larger diameters. ANOVA results for RSM models showed excellent fit for all responses ($R^2 > 0.91$, $P < 0.01$). Pressure and die diameter were identified as the most influential factors. Interaction effects AB (pressure $\times$ diameter) and BC (diameter $\times$ relaxation time) significantly affected penetration resistance ($P < 0.0001$ and $P = 0.0005$, respectively). Model validation with experimental data revealed mean errors of 2.61% for σ_{ave} and 6.08% for CP, confirming sufficient prediction accuracy. Statistical optimization using desirability function identified optimal conditions at 9 MPa pressure, 15.12 mm die diameter, and 6.35 s stress relaxation time with 0.73 desirability. Predicted values under optimal conditions were: density 1320 kg/m³, penetration resistance 630.48 N, tension along diameter 16.63 MPa, CP 12.87%, and SEC 1917.05 J/cm³.

Conclusions: This study successfully simulated and optimized the tableting process of zucchini powder using FEM and RSM. Increasing compaction pressure enhanced stress, density, and compression percentage but increased energy consumption. Increasing die diameter reduced stress and compaction efficiency. The $\sigma_{\text{ave}}/\text{CP}$ and SEC/CP ratios proved effective as new indices for evaluating mechanical and energy efficiency. RSM models demonstrated excellent predictive accuracy ($R^2 > 0.91$). Optimal conditions (9 MPa, 15.12 mm, 6.35 s) with 0.73 desirability yielded maximum density and strength with reduced energy consumption. The close alignment between numerical simulation and statistical optimization confirms that combining FEM and RSM provides an effective approach for designing plant powder compaction processes. Future research should investigate the effects of powder moisture content, compaction speed, and lubricant type on final tablet properties.

Keywords: *Compaction, Finite element method, Response surface methodology, Zucchini tablet*