



Research Paper

The Effect of Resting Time and Mixing Duration on the Physicochemical
and Functional Properties of Paprika Foam and Powder

Somayeh Sanjari¹, Nafiseh Jahanbakhshian^{2*}, Sediqeh Soleimanifard³,
Maryam Khakbaz Heshmati⁴, Zahra Beig Mohammadi¹

¹ Department of Food Science and Technology, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Food Science and Technology, ShK.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

³ Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

⁴ Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 24/04/2025, Accepted: 22/05/2025

Abstract

In recent years, the use of foam-mat drying technology has been considered as a new, economical and effective method for converting liquid food products into stable powders. This method has advantages such as preserving bioactive compounds, color and aroma, especially for heat-sensitive materials such as paprika. Optimization of process parameters plays an important role in achieving the desired quality of the final product. The aim of this study was to investigate the effect of two process variables, including resting time (0 to 20 minutes) and mixing time (1 to 10 minutes), on the properties of foam and powder obtained from drying paprika pulp foam using microwave. The experimental design was based on the response surface methodology and central composite design. Properties such as foam density and stability, efficiency, hygroscopicity, bulk, impact and particle density of the powder were evaluated. The results showed that increasing the mixing time to about 5.5 minutes improved the structure and stability of the foam, but excessive mixing had a negative effect. A rest time of about 10 minutes also helped maintain the quality of the powder. The coefficient of determination (R^2) of the model was obtained to be 0.97. This research can be used in the industrial design of dried powder production lines.

Keywords: Paprika powder, Microwave, Flooring, Drying

Citation: Sanjari S, Jahanbakhshian N, Soleimanifard S, Khakbaz Heshmati M, Beig Mohammadi Z, The Effect of Resting Time and Mixing Duration on the Physicochemical and Functional Properties of Paprika Foam and Powder. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs*, 2025;4(4): 29-48.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1204874>



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

*Corresponding author: Nafiseh Jahanbakhshian, Email: njahanbakhshian@iau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

In the food industry, increasing consumer demand for natural additives and functional ingredients has raised the importance of paprika (*Capsicum annuum*), known for its richness in bioactive compounds such as antioxidants, carotenoids, and vitamins. However, due to its sensitivity to heat and moisture, conventional drying methods often compromise paprika's color, aroma, and nutritional quality. Foam-mat drying a novel technique addresses these limitations by transforming liquid matrices into stable foams, enabling efficient drying at lower temperatures. This approach is especially beneficial for sticky and thermolabile substances that are difficult to dry using traditional methods. Microwave-assisted drying further improves efficiency by providing uniform internal heating, reduced drying time, and energy savings. While the general efficacy of foam-mat drying has been documented for various food matrices, there remains a lack of detailed optimization studies specific to paprika, particularly involving the interplay of key processing parameters such as foam resting time and mixing duration. This study aimed to investigate and optimize the effects of two primary process variables resting time (0 to 20 minutes) and mixing duration (1 to 10 minutes) on the quality attributes of foam and paprika powder prepared by foam-mat drying using microwave energy. The Response Surface Methodology (RSM) and Central Composite Design (CCD) were used to model and optimize the process, targeting improvements in foam stability, density, powder yield, hygroscopicity, and bulk properties.

Methods

In this study, red bell peppers were purchased from the local market in Jiroft, Iran pulped, and stored at -18°C to prevent physiological changes. The foaming agents included milk protein concentrate and maltodextrin, mixed at a 1:1 ratio. Before processing, samples were thawed naturally and equilibrated to room temperature. The effect of rest time (0–20 min) and mixing time (1–10 min) on the properties of the resulting foam and powder was investigated using Response Surface Methodology (RSM), designed via Design Expert v11 software. Foam was prepared using a laboratory mixer, then spread in uniform 5-mm layers and dried using a microwave at 400W. The resulting dry samples were ground and sieved to obtain paprika powder. Foam density, physical stability, bulk and tapped density, true particle density, product yield, and hygroscopicity were measured using standard procedures. Foam density was calculated as weight-to-volume ratio; stability was assessed via drainage over 120 minutes. Powder densities were measured before and after tapping, and true density was determined using toluene displacement. Yield was calculated based on final powder weight, and hygroscopicity was assessed by moisture uptake in a 75% RH desiccator over one week.

Results and Discussion

Foam density ranged from 0.956 to 0.990 g/cm^3 . It increased with longer resting times and shorter mixing durations. The optimal foam density (lower values indicating more aerated structure) was achieved at approximately 5.5 minutes of mixing and 10 minutes of rest. The model fitted with $R^2 = 0.97$ showed high predictive accuracy. Foam stability varied between 58–69%. Excessive mixing (>5.5 min) led to structural collapse due to over-aeration, while shorter mixing improved stability. Optimal stability was found with short rest and mixing times. The regression model

($R^2 = 0.91$) confirmed significant interactions between mixing and resting durations. Yield was inversely related to mixing duration. Excessive aeration reduced mass retention. The yield ranged between 14.02% and 26.66%, with the highest values recorded at 20 min rest and 1 min mixing. However, the model ($R^2 = 0.63$) had limited predictive power, suggesting other unmeasured factors may also influence yield. Hygroscopic index ranged from 83.5% to 84.5%. It increased with longer rest and decreased with extended mixing. This behavior reflects changes in particle structure and surface chemistry affecting moisture affinity. The regression model showed excellent fit with $R^2 = 0.99$. All three density measurements increased with longer mixing durations and shorter resting times, suggesting more compact particle packing and reduced porosity. The observed ranges were as follows: bulk density from 0.31 to 0.43 g/cm³, tapped density from 0.31 to 0.43 g/cm³, and particle density from 0.32 to 0.49 g/cm³. These changes were attributed to smaller, more compact particles formed under intense mixing. The R^2 values for these models exceeded 0.97, confirming strong model validity. Using desirability analysis, the optimal condition was determined to be 0 minutes of rest and 5.5 minutes of mixing, achieving a balance between high yield, foam stability, moderate density, and low hygroscopicity. This condition yielded the most desirable product with acceptable energy use and process time (desirability = 0.55).

Conclusion

This study demonstrates the importance of balancing foam resting time and mixing duration in the microwave-assisted foam-mat drying of paprika. Moderate mixing and minimal resting produced the most stable foam and highest-quality powder in terms of structural integrity, yield, and moisture resistance. The application of RSM modeling allowed precise optimization, supporting its utility in

industrial-scale drying process design. These findings provide valuable insights for the food industry in developing natural, functional, and shelf-stable paprika powder products using sustainable and efficient processing methods.

Keywords: Paprika powder, Microwave, Flooring, Drying

Funding: There was no external funding in this study.

Authors' contribution: All authors contributed equally to the writing and preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.



بررسی تأثیر زمان استراحت و مدت زمان اختلاط بر ویژگی‌های فیزیکی - عملکردی فوم و پودر پاپریکا

سمیه سنجرى^۱، نفیسه جهانبخشیان^{۲*}، صدیقه سلیمانی فرد^۳، مریم خاکباز حشمتی^۴، زهرا بیگ محمدی^۱

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

^۲گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

^۳گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۴گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری خشک کردن فوم به عنوان روشی نوین، اقتصادی و مؤثر برای تبدیل محصولات غذایی مایع به پودرهای پایدار مورد توجه قرار گرفته است. این روش به ویژه برای مواد حساس به حرارت مانند پاپریکا، مزایایی چون حفظ ترکیبات زیست فعال، رنگ و عطر دارد. بهینه سازی پارامترهای فرآیندی نقش مهمی در دستیابی به کیفیت مطلوب محصول نهایی ایفا می کند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر دو متغیر فرآیندی شامل زمان استراحت (۰ تا ۲۰ دقیقه) و مدت زمان اختلاط (۱ تا ۱۰ دقیقه) بر ویژگی‌های فوم و پودر حاصل از خشک کردن فوم پالپ پاپریکا با استفاده از مایکروویو بود. طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام شد. ویژگی‌هایی نظیر دانسیته و پایداری فوم، بازده، هیگروسکوپ، دانسیته توده‌ای، ضربه‌ای و ذره‌ای پودر ارزیابی شد. نتایج نشان داد افزایش مدت اختلاط تا حدود ۵/۵ دقیقه باعث بهبود ساختار و پایداری فوم می شود، ولی اختلاط بیش از حد تأثیر منفی دارد. زمان استراحت حدود ۱۰ دقیقه نیز در حفظ کیفیت پودر مؤثر بود. ضریب تبیین مدل (R^2) برابر با ۰/۹۷ به دست آمد. این پژوهش می تواند در طراحی صنعتی خطوط تولید پودرهای خشک شده به کار رود.

واژه‌های کلیدی: پودر پاپریکا، مایکروویو، کف پوشی، خشک کردن

استناد: سمیه سنجرى، نفیسه جهانبخشیان، صدیقه سلیمانی فرد، مریم خاکباز حشمتی، زهرا بیگ محمدی، بررسی تأثیر

زمان استراحت و مدت زمان اختلاط بر ویژگی‌های فیزیکی - عملکردی فوم و پودر پاپریکا، کیفیت و ماندگاری تولیدات

کشاورزی و مواد غذایی، (۱۴۰۴)، دوره ۴، شماره ۴، صفحات ۲۹-۴۸.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1204874>



مقدمه

در سال‌های اخیر، روند رو به رشد استفاده از چاشنی‌ها و افزودنی‌های طبیعی در صنایع غذایی، موجب افزایش توجه به محصولاتی مانند پاپریکا شده است. پاپریکا (*Capsicum annum*) به عنوان یکی از منابع غنی ترکیبات زیست‌فعال، از جمله آنتی‌اکسیدان‌ها، کاروتنوئیدها و ویتامین‌ها شناخته می‌شود و کاربرد گسترده‌ای در بهبود رنگ، طعم و ارزش تغذیه‌ای محصولات غذایی دارد (۱). با این حال، ویژگی‌های حساس به گرما و رطوبت این محصول، فرآوری آن را به چالشی مهم در صنایع غذایی تبدیل کرده است. خشک‌کردن یکی از رایج‌ترین روش‌های نگهداری پاپریکا است، اما روش‌های سنتی مانند خشک‌کردن با هوای گرم یا آفتاب، اغلب موجب افت کیفیت، تخریب رنگ و کاهش ترکیبات فعال زیستی می‌شوند (۲). در این میان، خشک‌کردن فوم به عنوان روشی نوین و کارآمد معرفی شده است که با تبدیل پالپ میوه به کف پایدار و سپس خشک‌سازی آن، امکان تولید پودرهایی با کیفیت بالا، راندمان مناسب و حفظ خواص زیستی را فراهم می‌سازد (۳). عواملی همچون زمان اختلاط (هم‌زدن) و زمان استراحت فوم از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ایجاد فومی پایدار و خشک‌کردن مؤثر آن هستند، که می‌توانند ویژگی‌های نهایی پودر تولیدی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند (۴). در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، اثر این دو متغیر بر ویژگی‌های فیزیکی-عملکردی فوم و پودر پاپریکا ارزیابی شده است. این مطالعه نه تنها می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندهای خشک‌سازی کمک کند، بلکه نقش مهمی در توسعه محصولات پودری با کیفیت بالا در صنعت غذا ایفا می‌کند. خشک‌کردن مایکروویو در مقایسه با خشک‌کردن معمولی مزایایی دارد. اثر انرژی مایکروویو به خواص دی‌الکتریک مواد بستگی دارد که می‌تواند توزیع گرما را کنترل کند. زمان فرآیند را کاهش می‌دهد و خواص کیفی محصول را بهبود می‌بخشد (۵). به طور کلی، خشک‌کردن به کمک مایکروویو جایگزین بسیار سریع‌تری برای خشک‌کردن انجمادی بود، خواص بهتری نسبت به خشک‌کردن انجمادی نشان داد، و در طول ذخیره‌سازی دچار تغییرات نامطلوب نشد. علاوه بر این، خشک‌کردن مایکروویو

بالاترین سرعت خشک‌کردن و کمترین زمان خشک‌کردن و مصرف انرژی را در مقایسه با خشک‌کردن با هوای گرم گزارش کرده است (۶). خشک‌کردن با کف‌پوشی روش مناسبی برای خشک‌کردن مواد غذایی حساس به حرارت و چسبنده با درصد قند بالا است که با روش‌های دیگر نمی‌توان آن‌ها را خشک کرد. در این تکنیک، غذا در حضور عوامل کف‌کننده و تثبیت‌کننده‌ها به یک کف پایدار تبدیل می‌شود. فوم در نتیجه انتقال حرارت و جرم باعث افزایش سطح محصول می‌شود و زمان و دمای خشک‌شدن را کاهش می‌دهد (۷). مطالعات قبلی بر روی مواد غذایی مختلف نشان داده‌اند که این متغیرها می‌توانند پارامترهایی مانند دانسیته فوم، پایداری، بازه، و ویژگی‌های رطوبتی و ساختاری پودر را تغییر دهند. با این حال، اطلاعات محدودی در مورد بهینه‌سازی این فرآیند برای پاپریکا وجود دارد. هدف از این مطالعه، بررسی اثر زمان اختلاط و زمان استراحت بر ویژگی‌های کلیدی فوم و پودر پاپریکا می‌باشد (۸). هدف این پژوهش، تولید پودر پاپریکا با استفاده از روش کف‌پوشانی و خشک‌کردن با مایکروویو است. در این روش، دو عامل اصلی یعنی زمان استراحت کف و میزان هم‌زدن آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. تا به امروز، پژوهشی که این رویکرد را با تمرکز خاص بر این دو عامل مورد بررسی قرار دهد، صورت نگرفته است؛ از این رو، این تحقیق از جنبه نوآوری برخوردار است.

روش کار

در این پژوهش، از پودر کنسانتره شیر تهیه‌شده از شرکت پگاه اصفهان و مالتودکسترین با درجه دکستروز ۲۰ درصد از شرکت گل‌شهد اصفهان به عنوان مواد پایه استفاده شد. فلفل دلمه‌ای قرمز از بازار محلی شهرستان جیرفت تهیه گردید. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده شامل معرف فولین-سیوکالتو، متانول، اتانول، تولوئن، کربنات سدیم، اسید گالیک و ۲،۲-دی‌فنیل-۱-پیکریل‌هیدرازیل (DPPH^1) بوده که از منابع معتبر (Merck KgaA) تهیه شدند. میوه پاپریکا پس از خریداری از بازار، به سرعت به آزمایشگاه منتقل و به منظور جلوگیری از بروز تغییرات فیزیولوژیکی، به پالپ تبدیل و در دمای ۱۸- درجه

¹ Diphenyl-1-picrylhydrazyl

(در بازه ۱ تا ۱۰ دقیقه) بر ویژگی‌های فوم و پودر حاصل، از روش سطح پاسخ (RSM) بهره گرفته شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۱ انجام پذیرفت (جدول ۱).

سانتی‌گراد نگهداری شد. پیش از آغاز فرایندهای آزمایشگاهی، نمونه‌ها به صورت طبیعی یخ‌زدایی شده و به مدت دو ساعت در دمای محیط نگه داشته شدند تا به تعادل حرارتی برسند. برای بررسی تأثیر زمان استراحت (در بازه ۰ تا ۲۰ دقیقه) و زمان اختلاط مواد کف‌زا

جدول ۱- طراحی آزمون تیمارها متغیرهای مستقل و وابسته

تیمار	فاکتور ۱ زمان استراحت (دقیقه)	فاکتور ۲ زمان اختلاط (دقیقه)	فاکتور ۳ توان (وات)
۱	۰	۱۰	۴۰۰
۲	۲۰	۱	۴۰۰
۳	۲۰	۵/۵	۴۰۰
۴	۱۰	۵/۵	۴۰۰
۵	۱۰	۱۰	۴۰۰
۶	۲۰	۱۰	۴۰۰
۷	۰	۵/۵	۴۰۰
۸	۱۰	۱	۴۰۰
۹	۱۰	۵/۵	۴۰۰
۱۰	۰	۱	۴۰۰

دست آمد. پودر حاصل جهت انجام آنالیزهای فیزیکوشیمیایی و کیفی مورد استفاده قرار گرفت.

دانسیته‌ی فوم

دانسیته فوم با اندازه‌گیری نسبت وزن به حجم فوم محاسبه شد. ابتدا حجم پلیت به کمک یک میکرومتر با اندازه‌گیری قطر و ارتفاع آن به دست آمد. سپس، پلیت با فوم سرریز شد و پس از صاف کردن سطح پلیت با کاردک مخصوص در دمای محیط وزن شد. انتقال فوم با احتیاط صورت گرفت تا از تخریب بافت یا به دام افتادن هوا حین پر کردن پلیت جلوگیری شود. دانسیته فوم بر اساس نسبت وزن فوم به حجم فوم محاسبه شد (۹).

$$Foam\ Density = \frac{Weight\ of\ foam}{Voiume\ of\ foam} \quad (1)$$

پایداری فیزیکی فوم

حجم آب چکیده شده با قرار دادن ۵۰ میلی‌لیتر فوم در فیلتر بوختر با قطر ۹۰ میلی‌متر (پوشانده شده با فیلتر

فرایند خشک کردن پاپریکا به روش کف‌پوشی با استفاده از مایکروویو

به منظور تولید پودر پاپریکا به روش کف‌پوشی، ابتدا پالپ پاپریکا با مقادیر مساوی از کنسانتره پروتئین شیر^۱ و مالتودکسترین به نسبت ۱۰:۱۰ مخلوط گردید. فرایند آماده‌سازی شامل اعمال زمان استراحت در بازه ۱ تا ۲۰ دقیقه و زمان اختلاط در بازه ۰ تا ۱۰ دقیقه با استفاده از مخلوط‌کن آزمایشگاهی انجام شد. پس از تشکیل ساختار کف، نمونه‌ها در ظروف آزمایشگاهی مسطح با ضخامت یکنواخت ۵ میلی‌متر گسترش داده شدند. پس از ارزیابی ویژگی‌های کیفی کف ایجادشده، نمونه‌ها تحت فرایند خشک کردن در دستگاه مایکروویو با توان ثابت ۴۰۰ وات قرار گرفتند. در پایان، نمونه‌های خشک‌شده آسیاب و از طریق الک یکنواخت‌سازی شدند و پودر پاپریکای نهایی به

¹ Milk Protein Concentrate

درجه سانتی‌گراد (برابر ۰/۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.

بازده

بازده محصول به عنوان نسبت جرم پودر جامد به دست‌آمده در پایان خشک کردن مایکروویو به جرم اولیه از طریق رابطه (۸)، محاسبه شد (۱۳).

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (8)$$

تعیین هیگروسکوپی

هیگروسکوپی پودر پاپریکا با استفاده از روش کای وگرک (۲۰۰۰) با یکسری تغییرات تعیین شد. یک گرم از پودر پاپریکا در کروسبیل ودریک دسیکاتور پرشده با محلول اشباع کلرید سدیم (رطوبت نسبی ۷۵ درصد) به مدت یک هفته در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شد. بعد از یک هفته پودر وزن و هیگروسکوپی به صورت گرم رطوبت جذب شده در ۱۰۰ گرم ماده خشک مطابق رابطه ۹ بیان شد (۱۴).

$$Hygroscopic = \frac{b+H}{a-H} \times 100 \quad (9)$$

در این رابطه a وزن اولیه و b وزن افزایش وزن نمونه بعد از یک هفته که از اختلاف وزن نهایی و وزن اولیه به دست می‌آید.

بررسی آماری

در این پژوهش، تجزیه و تحلیل آماری تیمارها با بهره‌گیری از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM^1) و با استفاده از طرح مرکب مرکزی انجام گرفت. فرآیند تحلیل داده‌ها به وسیله نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۱ صورت پذیرفت.

کاغذی) و سپس قرار دادن فیلتر روی استوانه مدرج به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای محیط اندازه‌گیری شد و سپس پایداری فیزیکی فوم با استفاده از رابطه (۱)، تعیین شد (۱۰). برای رسیدن به حجم اولیه ۵۰ میلی‌لیتر از فوم، دانسیته فوم در مقدار ۵۰ میلی‌لیتر ضرب شد و وزن مورد نیاز برای رسیدن به حجم ۵۰ میلی‌لیتر توزین شد.

$$stability = \frac{v_{foam}}{v_{0foam}} \times 100 \quad (2)$$

دانسیته توده‌ای و ضربه‌ای پودر

دانسیته توده‌ای پودر (g/cm^3) با اندازه‌گیری حجم اشغال شده توسط ۲ گرم پودر در یک استوانه مدرج ۱۰ میلی‌لیتری بدون ضربه‌زدن به آن محاسبه شد (رابطه ۳ و ۴). دانسیته ضربه‌ای پودر (g/cm^3) با ضربه زدن به استوانه حاوی پودر (۱۰ ضربه در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر) محاسبه شد و حجم نهایی ثبت شد (۱۱).

$$Bulk\ Density(\rho_b) = \frac{Mass\ of\ power(g)}{Volume\ of\ power(cm^3)} \quad (3)$$

$$Top\ Density(\rho_b) = \frac{Mass\ of\ Powder(g)}{Final\ tapped\ volume(cm^3)} \quad (4)$$

دانسیته ذره‌ای (مطلق) پودر

۱ گرم پودر پاپریکا را به یک پیکنومتر ۱۰ میلی‌لیتری منتقل شد و سپس با تولوئن پر شد. دانسیته ذره‌ای از رابطه (۵) محاسبه شد (۱۲).

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (5)$$

که در آن، ρ_p دانسیته ذره‌ای (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، M_s وزن پودر خشک (گرم) و V_s حجم ماده خشک (سانتی‌متر مکعب) است. حجم ماده جامد (حجم پودر) توسط روش جابجایی تولوئن با استفاده از روابط (۶ و ۷) محاسبه شد (۱۲).

$$V = V_f - \frac{M_{sf}}{\rho_s} \quad (6)$$

$$M_{sf} = M_{t+s} - M_f - M \quad (7)$$

V_f حجم ارلن مایر (سانتی‌متر مکعب)، M_{sf} وزن تولوئن اضافه شده برای پر کردن ارلن مایر (گرم)، M_{t+s} وزن ارلن به همراه نمونه و حلال (گرم)، M_f وزن ارلن مایر (گرم)، M وزن نمونه (گرم) و ρ_s دانسیته تولوئن در دمای ۲۰

¹ Response Surface Methodology

نتایج

ارزیابی اثر زمان استراحت و زمان اختلاط

مواد کفزا بر ویژگی‌های فوم پاپریکا

به منظور بررسی تأثیر متغیرهای زمان استراحت و زمان اختلاط مواد کفزا بر خصوصیات فوم پاپریکا، در مجموع ۱۰ تیمار در نقطه مرکزی طراحی گردید. این تیمارها با هدف برآورد خطای خالص و ارزیابی تکرارپذیری داده‌ها، بر اساس طرح مرکب مرکزی^۱ و در چارچوب طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ تنظیم شدند. مقادیر مربوط به متغیرهای مستقل و وابسته به همراه داده‌های تجربی حاصل از پاسخ‌ها در جدول (۲)، ارائه شده است. جهت تحلیل آماری پاسخ‌ها، مدل‌سازی بر اساس تحلیل واریانس ANOVA صورت گرفت (جدول ۳). برای ارزیابی کفایت مدل‌ها، پارامترهایی نظیر آماره F ، ضریب تعیین (R^2)، عدم برازش مدل^۲ و مقدار احتمال^۳ مورد بررسی قرار گرفتند. نوع مدل مناسب و همچنین عدم برازش مدل در سطح معناداری ۰/۰۵ آزمون شد و بر این اساس، معادلات برازش‌یافته برای هر پاسخ پیشنهاد گردید. اصطلاحات غیرمعنادار با مقدار ($p > 0/05$) از مدل حذف شدند و معادلات رگرسیون نهایی، بر مبنای متغیرهای معنادار، توسعه یافتند (معادلات ۱ تا ۷).

دانسیتته فوم

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دانسیته فوم با افزایش زمان استراحت و کاهش زمان اختلاط روند افزایشی داشت. بر اساس داده‌های تجربی، میانگین کلی دانسیته فوم در محدوده ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد (جدول ۲). تحلیل واریانس ANOVA نشان داد که مدل برازش یافته برای پیش‌بینی دانسیته از دقت بالایی برخوردار است به گونه‌ای که ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۷ به دست آمد. این مقدار بیانگر آن است که مدل پیشنهادی قادر است تغییرات دانسیته را به صورت قابل قبولی تبیین و پیش‌بینی نماید (جدول ۳). دانسیته فوم تحت تأثیر اثرهای خطی، متقابل و درجه دوم متغیرهای مستقل قرار گرفت. در این میان، تأثیر معنی‌دار

متغیرها با سطح احتمال $p < 0/05$ تأیید شد، درحالی‌که آزمون عدم برازش مدل برای این پاسخ غیرمعنی‌دار بود؛ این موضوع بیانگر برازش مناسب مدل به داده‌های تجربی است. مدل نهایی برازش‌یافته برای دانسیته فوم در معادله (۱)، ارائه شده است. همچنین، ضریب مثبت مربوط به اثر درجه دوم متغیر X_2^2 (زمان اختلاط) نشان‌دهنده نقش قوی و معنی‌دار این پارامتر بر افزایش دانسیته فوم می‌باشد.

Foam Density: y (معادله ۱)

$$\begin{aligned} &= +0.9745 \\ &+ 0.0150x_1 \\ &+ 0.0006x_2 \\ &- 0.0006x_1x_2 \\ &- 0.0035x_1^2 \\ &+ 0.0029x_2^2 \end{aligned}$$

3. Central Composite Design

2. Lack of Fit

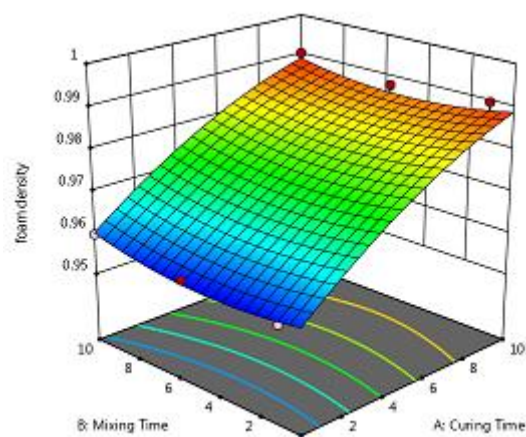
3. P-value

جدول ۲- مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته فوم

تیمار	فاکتور ۱ زمان استراحت (دقیقه)	فاکتور ۲ زمان اختلاط (دقیقه)	دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱	۰	۱۰	۰/۹۵۹۷
۲	۲۰	۱	۰/۹۸۹۳
۳	۲۰	۵/۵	۰/۹۹۰۲
۴	۱۰	۵/۵	۰/۹۸۰۸
۵	۱۰	۱۰	۰/۹۹۰۳
۶	۲۰	۱۰	۰/۹۸۸۸
۷	۰	۵/۵	۰/۹۵۷۲
۸	۱۰	۱	۰/۹۸۸۹
۹	۱۰	۵/۵	۰/۹۸۷۹
۱۰	۰	۱	۰/۹۵۶۲

جدول ۳- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای دانسیته فوم پاپریکا

فاکتور	Coefficient (β) (ضریب رگرسیون (β))
	دانسیته
Intercept	+۰/۹۷۴۵
Linear	
X_1 : Curing time (min)	+۰/۰۱۵۰
X_2 : Mixing time (min)	۰/۰۰۰۶
Interaction	
X_1X_2	-۰/۰۰۰۶
Quadratic	
X_1^2	-۰/۰۰۳۵
X_2^2	۰/۰۰۲۹
R^2	۰/۹۷۶۹
Adj. R^2	۰/۹۸۴۱
F-value (model)	۳۳/۸۹
F-value (lack of fit)	۰/۲۸۳۴
P-value (model)	۰/۰۰۲۳



شکل ۱- نمودار سه بعدی اثرات متغیرهای فرآیند بر دانسیته فوم

بر اساس رابطه ارائه شده از مدل ضریب منفی این متغیر نشان داد که با افزایش این فاکتور پایداری فیزیکی فوم روند کاهشی داشت. نمودار سطحی شکل (۲)، تغییرات پایداری فوم را بر اساس دو متغیر (زمان استراحت و زمان اختلاط) ارائه می‌دهد.

Foam Stability: y (معادله ۲)

$$= +62.15 \\ - 4.28x_1 \\ - 0.3395x_2 \\ + 0.2778x_1x_2 \\ + 1.63x_1^2 + 1.23x_2^2$$

پایداری فوم

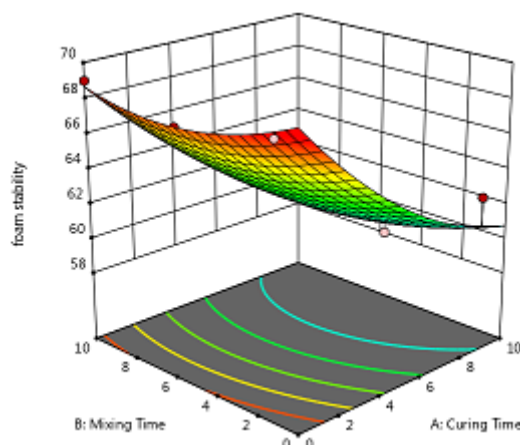
پایداری کف با اندازه‌گیری مایعی که از فوم تخلیه می‌شود، تعیین شد. مطابق جدول (۴)، محدوده تغییرات پایداری فیزیکی فوم از ۵۸-۶۹ درصد متغیر بود. بیشترین پایداری فوم مربوط به تیمار ۱ و ۱۰ با متغیر زمان همزدن ۱ دقیقه و استراحت ۰ دقیقه بود. مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی پایداری فوم معادله (۲)، شد که معناداری این پارامتر را با $PV=0/0264$ نشان می‌دهد ($P \leq 0/05$). تأثیر افزایش زمان اختلاط (هم‌زدن) بر روی پایداری فوم در جدول (۵)، مشاهده می‌شود. پایداری فیزیکی به صورت خطی تحت تأثیر غلظت زمان همزدن قرار گرفت. اما

جدول ۴- مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته پایداری فوم

تیمار	فاکتور ۱ زمان استراحت (دقیقه)	فاکتور ۲ زمان اختلاط (دقیقه)	پایداری (درصد)
۱	۰	۱۰	۶۹
۲	۲۰	۱	۶۳
۳	۲۰	۵/۵	۶۶
۴	۱۰	۵/۵	۵۸
۵	۱۰	۱۰	۶۱
۶	۲۰	۱۰	۶۵
۷	۰	۵/۵	۶۸
۸	۱۰	۱	۶۲
۹	۱۰	۵/۵	۵۹
۱۰	۰	۱	۶۹

جدول ۵- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای پاسخ‌های پایداری فوم

فاکتور	Coefficient (β) (ضریب رگرسیون (β))
	Stability
Intercept	۶۲/۱۵
Linear	
X_1 : Curing time (min)	-۴/۲۸
X_2 : Mixing time (min)	-۰/۳۳۹۵
Interaction	
X_1X_2	۰/۲۷۷۸
Quadratic	
X_1^2	۱/۶۳
X_2^2	۱/۲۳
R^2	۰/۹۱۸۹
Adj. R^2	۰/۸۱۷۶
F-value (model)	۹/۰۷
F-value (lack of fit)	۷/۵۶
P-value (model)	۰/۰۲۶۴



شکل ۲- نمودار سه بعدی اثرات متغیرهای فرآیند بر پایداری فوم

ضریب تعیین مدل (R^2) برابر با ۰/۶۳ بوده است. این مقدار نشان می‌دهد که مدل قادر به پیش‌بینی دقیق داده‌های تجربی نیست. معادله پیشنهادی برای پیش‌بینی راندمان پودر در معادله (۳)، ارائه شده است. وجود ضریب منفی برای متغیر زمان اختلاط در این معادله، بیانگر اثر کاهنده این عامل بر راندمان پودر می‌باشد.

$$\text{Yield: } y = +16.04 + 1.78x_1 - 3.11x_2 \quad (\text{معادله ۳})$$

ویژگی‌های پودر بازده

راندمان پودر با افزایش زمان اختلاط کاهش یافت. میانگین کلی راندمان در محدوده ۱۴/۰۲ تا ۲۶/۶۶ درصد گزارش شد (جدول ۶). بر اساس اطلاعات جدول (۷)، مدل برازش شده از نوع خطی بوده و از نظر آماری معنی‌دار ارزیابی شد، درحالی‌که عدم برازش مدل، فاقد معنی‌داری آماری بود. نتایج تحلیل واریانس ANOVA نشان داد که

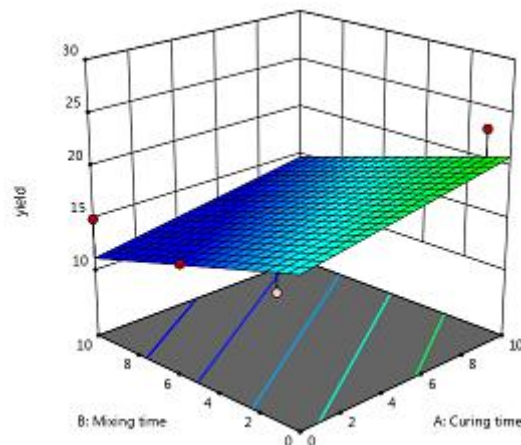
جدول ۶- مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته بازده پودر

تیمار	فاکتور ۱ زمان استراحت (دقیقه)	فاکتور ۲ زمان اختلاط (دقیقه)	بازده (درصد)
۱	۰	۱۰	۱۴/۹۷۶
۲	۲۰	۱	۲۶/۶۶
۳	۲۰	۵/۵	۱۹/۸۵
۴	۱۰	۵/۵	۱۴/۶۵۲
۵	۱۰	۱۰	۱۴/۰۷۸
۶	۲۰	۱۰	۱۸/۷۹
۷	۰	۵/۵	۱۴/۰۲
۸	۱۰	۱	۲۳/۰۱
۹	۱۰	۵/۵	۱۴/۰۵
۱۰	۰	۱	۱۴/۹۹

جدول ۷- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای دانسیته فوم

پایریکا برای پاسخ‌های بازده پودر

فاکتور	Coefficient (β) (ضریب رگرسیون β)
	(%) Yield
Intercept	۱۶/۰۴
Linear	
X_1 : Curing time (min)	۱/۷۸
X_2 : Mixing time (min)	-۳/۱۱
Interaction	
X_1X_2	-
Quadratic	
X_1^2	-
X_2^2	-
R^2	۰/۶۳۰۳
Adj. R^2	۶
F-value (model)	۷/۸۰
F-value (lack of fit)	۵۰/۵۲
P-value (model)	۰/۰۱۶۵



شکل ۳- نمودار سه بعدی اثرات متغیرهای فرآیند بر بازده پودر

قرار گرفت ($p < 0.05$) طبق مدل پیشنهادی ارائه شده در معادله (۴)، ضرایب مثبت مربوط به مؤلفه‌های X_1^2 و X_2^2 بیانگر تأثیر مثبت و معنادار زمان استراحت و زمان اختلاط بر شاخص هیگروسکوپیک هستند.

Hygroscopic Index: y (معادله ۴)

$$\begin{aligned}
 &= +83.61 \\
 &- 0.0041x_1 \\
 &- 0.6761x_2 \\
 &+ 0.0039x_1x_2 \\
 &+ 0.0016x_1^2 \\
 &+ 0.6161x_2^2
 \end{aligned}$$

هیگروسکوپ

شاخص هیگروسکوپیک با افزایش زمان استراحت و کاهش زمان اختلاط، روند افزایشی از خود نشان داد. میانگین کلی این شاخص در بازه ۸۳/۵۱ تا ۸۴/۵۴ درصد قرار داشت (جدول ۸). بر اساس نتایج تحلیل واریانس ANOVA، ضریب تعیین مدل (R^2) برابر با ۰/۹۶ گزارش شد که نشان‌دهنده توان بالای مدل در برازش مناسب داده‌های تجربی و پیش‌بینی شاخص هیگروسکوپیک می‌باشد (جدول ۹). این شاخص به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثرات خطی، متقابل و درجه دوم متغیرهای مستقل

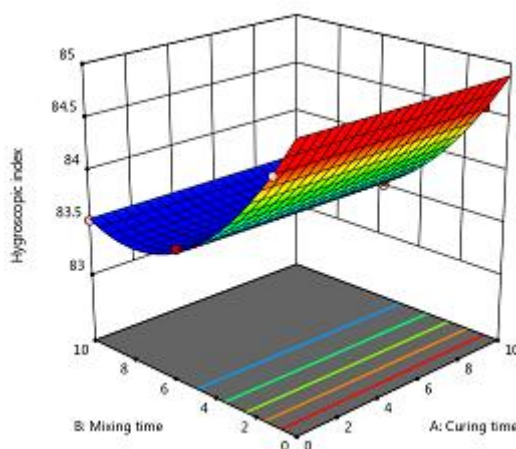
جدول ۸- مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته شاخص هیگروسکوپیک پودر

تیمار	فاکتور ۱ زمان استراحت (دقیقه)	فاکتور ۲ زمان اختلاط (دقیقه)	هیگروسکوپ (درصد)
۱	۰	۱۰	۸۳/۵۳
۲	۲۰	۱	۸۳/۵۳۹۴
۳	۲۰	۵/۵	۸۳/۵۳۷۱
۴	۱۰	۵/۵	۸۳/۵۴۹۸
۵	۱۰	۱۰	۸۳/۵۵۹۶
۶	۲۰	۱۰	۸۳/۵۶۲۶
۷	۰	۵/۵	۸۳/۵۸۰۱
۸	۱۰	۱	۸۴/۵۴۲۶
۹	۱۰	۵/۵	۸۳/۵۱۱۹
۱۰	۰	۱	۸۴/۵۳۴۷

جدول ۹- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای پاسخ‌های

شاخص هیگروسکوپی پودر

فاکتور	Coefficient (β) (ضریب رگرسیون $((\beta))$)
	Hygroscopic
Intercept	۸۳/۶۱
Linear	
X1: Curing time (min)	-۰/۰۰۴۱
X2: Mixing time (min)	-۰/۶۷۶۱
Interaction	
X1X2	۰/۰۰۳۹
Quadratic	
X12	۰/۰۰۱۶
X22	۰/۶۱۶۱
R2	۰/۹۹۸۶
Adj. R2	۰/۹۹۷۰
F-value (model)	۵۹۱/۱۶
F-value (lack of fit)	۰/۹۶۳۸
P-value (model)	<۰/۰۰۰۱



شکل ۴- نمودار سه‌بعدی اثرات متغیرهای فرآیند بر هیگروسکوپی پودر

برای این ویژگی‌ها معنی‌دار بوده و عدم برازش مربوط به این پاسخ‌ها بی‌معنی است. نتایج ANOVA نشان داد که R^2 مدل برای این پاسخ‌ها به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۸ بود که نشان می‌دهد داده‌های تجربی را می‌توان به‌طور قابل پیش‌بینی با داده‌های مدل برازش داد. این پاسخ‌ها تحت اثرات خطی، متقابل و درجه دوم متغیرهای مستقل هستند (جدول ۱۱). مدل پیشنهادی برای این پاسخ‌ها در معادلات (۵-۷)، نمایش داده شده است. ضریب مثبت برای

دانسیته توده، ضربه و ذره

نمودارهای سه‌بعدی سطح پاسخ برای دانسیته توده، ضربه و ذره در شکل (۵)، ارائه شده است. هر سه پاسخ با کاهش زمان استراحت و با افزایش زمان اختلاط افزایش یافت. مقادیر محدوده تغییرات کلی این پارامترها به ترتیب g/cm^3 ۰/۳۱-۰/۴۳، g/cm^3 ۰/۳۱-۰/۴۳ و g/cm^3 ۰/۳۱-۰/۴۹ می‌باشد (جدول ۱۰). مدل‌های برازش شده

X_1^2 تأثیر قوی زمان استراحت را بر پاسخهای دانسیته
 ضربه و ذره تأیید می‌کند.

Top Density: $y = +0.4190$ (معادله ۶)
 $+ 0.0005x_1$
 $+ 0.0667x_2$
 $+ 0.0002x_1x_2$
 $+ 0.0006x_1^2$
 $- 0.0690x_2^2$

Bulk Density: $y = +0.4153$ (معادله ۵)
 $+ 0.0042x_1$
 $+ 0.0693x_2$
 $+ 0.0008x_1x_2$
 $- 0.0007x_1^2$
 $- 0.0734x_2^2$

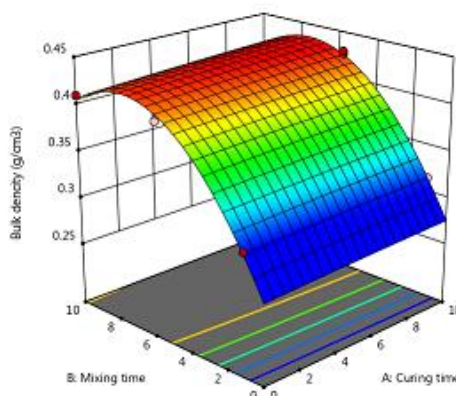
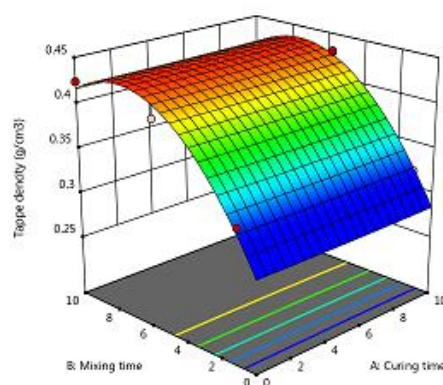
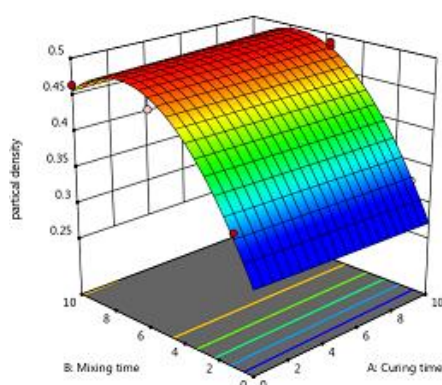
Particle Density: y (معادله ۷)
 $= +0.4717$
 $+ 0.0006x_1$
 $+ 0.0928x_2$
 $+ 0.0052x_1x_2$
 $+ 0.0002x_1^2$
 $- 0.1025x_2^2$

جدول ۱۰- مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته دانسیته توده، ضربه، ذره پودر

تیمار	فاکتور ۱ زمان استراحت (دقیقه)	فاکتور ۲ زمان اختلاط (دقیقه)	دانسیته توده (g/cm ³)	دانسیته ضربه (g/cm ³)	دانسیته ذره (g/cm ³)
۱	۰	۱۰	۰/۴۱۰۱	۰/۴۲۴۲	۰/۴۶۳۹
۲	۲۰	۱	۰/۳۱۵۳	۰/۳۲۳۹	۰/۳۱۹۷
۳	۲۰	۵/۵	۰/۴۳۱۷	۰/۴۳۹۸	۰/۴۹۱۲
۴	۱۰	۵/۵	۰/۴۲۸۸	۰/۴۳۰۳	۰/۴۸۸۴
۵	۱۰	۱۰	۰/۴۱۱۸	۰/۴۱۴۲	۰/۴۶۳۸
۶	۲۰	۱۰	۰/۴۱۹۸	۰/۴۲۰۵	۰/۴۷۷۷
۷	۰	۵/۵	۰/۴۰۹۵	۰/۴۱۰۳	۰/۴۶۳۴
۸	۱۰	۱	۰/۳۱۵۸	۰/۳۱۹۲	۰/۳۲۳۳
۹	۱۰	۵/۵	۰/۴۲۵۵	۰/۴۲۸۹	۰/۴۸۳۳
۱۰	۰	۱	۰/۳۱۱۲	۰/۳۲۹۱	۰/۳۴۳۷

جدول ۱۱- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای پاسخ‌های شاخص دانسیته توده‌ای ضربه و ذره پودر

فاکتور	Coefficient (β) (ضریب رگرسیون $((\beta))$		
	Bulk density (g/cm ³)	Top Density (g/cm ³)	Particle Density
Intercept	+۰/۴۱۵۳	+۰/۴۱۹۰	+۰/۴۷۱۷
Linear			
X ₁ : Curing time (min)	۰/۰۰۴۲	+۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶
X ₂ : Mixing time (min)	۰/۰۶۹۳	+۰/۰۶۶۷	۰/۰۹۲۸
Interaction			
X ₁ X ₂	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۵۲
Quadratic			
X ₁ ²	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲
X ₂ ²	-۰/۰۷۳۴	-۰/۰۶۹۰	-۰/۱۰۲۵
R ²	۰/۹۹۴۹	۰/۹۷۸۲	۰/۹۸۸۷
Adj. R ²	۰/۹۸۸۶	۰/۹۵۱۰	۰/۹۷۴۷
F-value (model)	۱۵۷/۱۰	۳۵/۹۲	۷۰/۰۲۳
F-value (lack of fit)	۷/۰۸	۱۶۰/۰۵	۱۳/۱۳
P-value (model)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۵



شکل ۵- نمودار سه‌بعدی اثرات متغیرهای فرآیند بر دانسیته توده، ضربه و ذره پودر

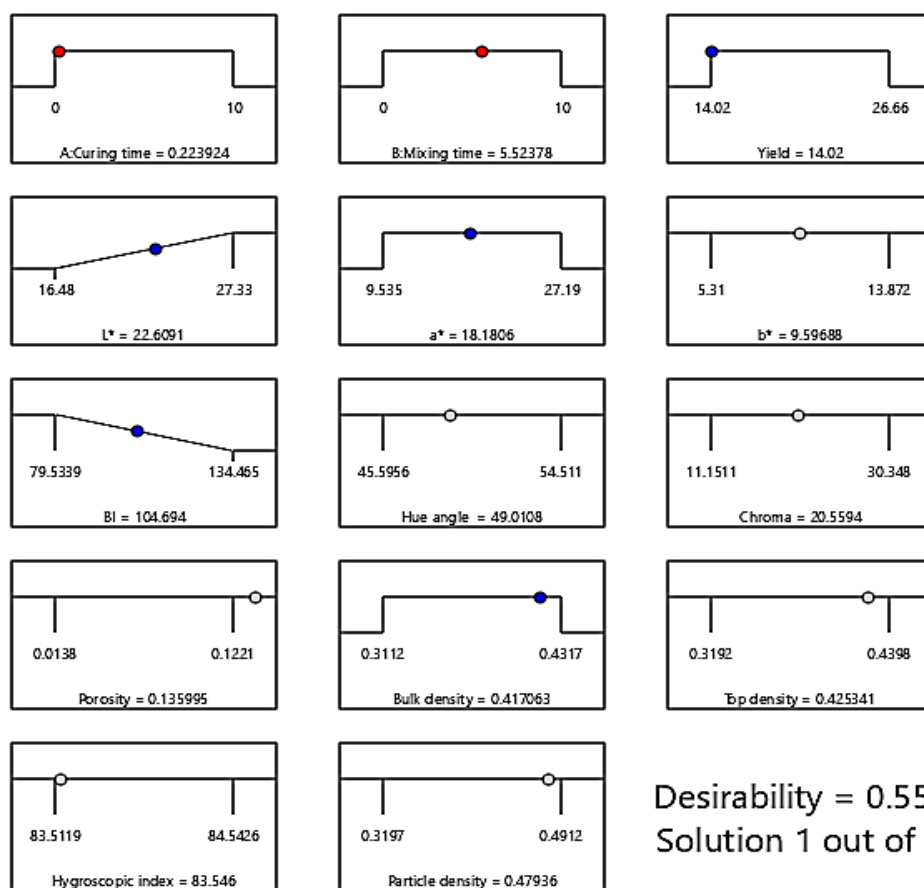
تعیین نمونه بهینه

بر اساس کمترین مصرف انرژی، زمان فرایند، هیگروسکوپی و دانسیته توده، نمونه بهینه با میزان مطلوبیت ۰/۵۵ یا ۵۵٪ برای خشک کردن فوم پاپریکا معرفی شد. نقطه بهینه پودر با ۰ دقیقه زمان استراحت و

۵/۵ دقیقه زمان اختلاط جهت رسیدن به ویژگی‌های کیفی موردنظر پیشنهاد گردید (تیمار ۷). نتایج آزمون آزمایشی نمونه بهینه در شکل (۶) و جدول (۱۲)، ارائه شده است.

جدول ۱۲- سطوح بهینه متغیرهای تعیین شده توسط نرم افزار همراه با مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده فاکتورهای هدف

Particle Density	Hygroscopic	Top Density	Bulk Density	Porosity	Chroma	Hue	BI	b*	a*	L*	yield	زمان اختلاط (دقیقه)	زمان استراحت (دقیقه)	سطح بهینه
۰/۴۶	۸۳/۵۸	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۱۱	۱۹/۷۴	۴۸/۸۰	۱۰۴/۱۵	۹/۲۵	۱۷/۴۴	۲۲/۵۴	۱۴/۰۲	۰/۵	۰	
۰/۴۷	۸۳/۵۴	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۱۳	۲۰/۵۵	۴۹/۰۱	۱۰۴/۶۹	۹/۵۹	۱۸/۱۸	۲۲/۶۰	۱۴/۰۲			



شکل ۶- پودر بهینه (فاز دوم)

بحث

با توجه به اهمیت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فوم در بهینه‌سازی فرآیند خشک‌سازی و کیفیت نهایی پودر، تحلیل دقیق اثر متغیرهای فرمولاسیون همچون زمان اختلاط و زمان استراحت، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از طراحی سطح پاسخ، اثرات تعاملی این پارامترها بر دانسیته، پایداری و بازده پودر نهایی مورد بررسی قرار گرفت. دانسیته فوم پیش از مرحله خشک‌سازی، به عنوان یکی از پارامترهای اساسی در فرآیند فرمولاسیون کف‌پوش، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ریزساختار، حفظ پایداری فوم و ارتقاء ویژگی‌های کیفی پودر نهایی ایفا می‌کند (۱۵). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش زمان اختلاط تا حدود ۵/۵ دقیقه، دانسیته فوم به‌طور معناداری کاهش یافت، که این امر ناشی از ورود مؤثرتر هوا به مخلوط و ایجاد ساختاری حجیم‌تر و سبک‌تر بود. با این حال، در زمان‌های طولانی‌تر (۱۰ دقیقه)، به دلیل تخریب شبکه فومی در اثر هوادهی بیش‌ازحد، تراکم فوم مجدداً افزایش یافت که نشان‌دهنده کاهش کارایی ساختار فومی می‌باشد. از سوی دیگر، بررسی تأثیر زمان استراحت فوم پس از اختلاط نیز نشان داد که نمونه‌هایی با زمان استراحت در بازه ۰ تا ۱۰ دقیقه، دانسیته پایین‌تر و در نتیجه ساختار فومی مطلوب‌تری داشتند. این پدیده احتمالاً ناشی از فرصت کافی برای تثبیت و بازآرایی ساختار مولکولی، به‌ویژه پروتئین‌ها، در غیاب تنش‌های مکانیکی است. در مقابل، استراحت بیش‌ازحد (بیش از ۱۰ دقیقه)، منجر به ته‌نشینی فازهای سنگین و افزایش دانسیته فوم گردید (۱۶). در مجموع، نتایج بیانگر آن است که برهم‌کنش بین زمان اختلاط و زمان استراحت، تأثیر چشمگیری بر میزان دانسیته فوم داشته و از این طریق، بر کیفیت ساختار فوم و عملکرد نهایی در خشک‌سازی و تبدیل به پودر اثرگذار است. پایداری فوم یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند کف‌پوشانی، پایداری فوم ایجادشده پیش از خشک‌کردن است. در این پژوهش، پایداری فوم به‌صورت درصد باقی‌مانده حجم کف پس از گذشت زمان معین (به‌طور نمونه ۳۰ دقیقه) از تشکیل آن محاسبه شد. نتایج نشان داد که افزایش زمان اختلاط تا یک حد مشخص (به‌طور نمونه ۵ دقیقه) منجر به افزایش

پایداری فوم شد، اما در زمان‌های بیش‌تر (۸ دقیقه) به دلیل تخریب ساختار کف ناشی از هوادهی بیش‌ازحد، پایداری کاهش یافت. همچنین، زمان استراحت فوم پس از اختلاط نیز تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری داشت. نمونه‌هایی که ۱۰ تا ۱۵ دقیقه استراحت داده شدند، به‌طور میانگین پایداری بالاتری نسبت به نمونه‌های فاقد استراحت یا دارای استراحت طولانی (بیش از ۲۰ دقیقه) داشتند. این امر احتمالاً به دلیل فرصت کافی برای بازآرایی ساختار پروتئینی فوم در شرایط بدون تنش بوده است، درحالی‌که استراحت بیش‌ازحد منجر به ته‌نشینی و کاهش ساختار کف شده است. به‌طور کلی، تعامل بین زمان اختلاط و زمان استراحت نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ ساختار فیزیکی کف تا پیش از فرآیند خشک‌کردن دارد، و تأثیر مستقیم آن بر بازده نهایی پودر و کیفیت محصول نهایی کاملاً مشهود است (۱۷). بازده پودر خشک شده از فوم چغندر لبوبی تهیه شده با MD و MPC تحت دو متغیر زمان همزدن و زمان استراحت در شکل (۳)، ارائه شده است. عملکرد نشان داد مدل پیش‌بینی‌شده از جدول ANOVA، برای این پارامتر معادله (۳) است. این پارامتر با $P_V = 0.0342$ در سطح اختلاف ۰/۰۵ درصد معنادار شد. محدوده تغییرات ارائه شده برای بازده در جدول تیمارها از ۱۴/۰۴ تا ۱۹/۵ درصد متغیر بود. عامل تأثیرگذار بر روی بازده اثر تعاملی دو متغیر زمان استراحت و زمان همزدن شد. همان‌طور که در رابطه مشخص است ضریب منفی متغیر نشان می‌دهد که این متغیرها تأثیر منفی بر روی بازده گذاشته است. در نمودار سطحی نیز مشاهده می‌شود که متغیر زمان همزدن از ۱-۸ دقیقه روند کاهشی و سپس افزایشی را نشان داده و همچنین زمان استراحت نیز تا ۱۰ دقیقه تأثیر چندانی بر بازده نداشته است و از دقیقه ۱۰-۲۰ حداکثر تأثیر را گذاشت. از این بحث می‌توان نتیجه گرفت که عوامل فوم ساز به دلیل ماهیت پروتئینی میل به تشکیل پیوندهای قوی دارند وجود گروه‌های آمفیلیک و آبگریز در پروتئین اگر تحت تأثیر زمان طولانی استراحت و همزدن قرار بگیرند فوم با سطح بیشتری گسترش پیدا می‌کند به علت به وجود آمدن حباب‌های زیادی که در بافت پروتئین محبوس می‌شود، تخلخل فوم را افزایش می‌دهند و پودر سبک‌تری تولید می‌شود (۱۸). شاخص هیگروسکوپي پودر، نشان‌دهنده تمایل جذب رطوبت از

نتیجه‌گیری

در پایان، با ارزیابی معیارهایی نظیر بازده فرآیند، پایداری فوم، چگالی ظاهری پودر و ویژگی‌های رطوبت‌پذیری، شرایط بهینه فرآیند شامل صفر دقیقه زمان استراحت و ۵/۵ دقیقه زمان اختلاط مشخص گردید. تحلیل اثر متغیرهای زمان اختلاط و زمان استراحت در فرآیند خشک‌کردن فوم پاپریکا نشان داد که بهینه‌سازی این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر بهبود کیفیت فوم، افزایش بازده فرآیند و ارتقای خواص فیزیکی-شیمیایی پودر نهایی دارد. انتخاب ترکیبی از زمان اختلاط مناسب و زمان استراحت کوتاه، به تولید فومی پایدارتر و پودری با ویژگی‌های مطلوبی از جمله چگالی پایین، هیگروسکوپی محدود و بازده مناسب منجر شد. این یافته‌ها بر اهمیت طراحی دقیق فرآیند تأکید داشته و کارآمدی روش خشک‌کردن فوم را در تولید صنعتی پودرهای حساس به حرارت تأیید می‌نمایند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و همکاری‌های صمیمانه تمامی افرادی که به‌گونه‌ای در انجام این پژوهش ایفای نقش نموده‌اند، ابراز می‌دارند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

محیط است، با افزایش زمان استراحت افزایش یافت. این موضوع می‌تواند به افزایش تماس مولکول‌های فعال با محیط در اثر تغییرات ساختاری طی استراحت نسبت داده شود. کاهش هیگروسکوپی در زمان‌های اختلاط بالاتر نیز احتمالاً به دلیل تغییر در ساختار سطحی ذرات پودر و کاهش نواحی قطبی قابل جذب رطوبت بوده است (۱۹). در مورد دانسیته‌های توده‌ای، ضربه‌ای و ذره‌ای، روند مشابهی با سایر پارامترها مشاهده شد. با کاهش زمان استراحت و افزایش زمان اختلاط، دانسیته‌ها افزایش یافتند که می‌تواند به فشرده‌تر شدن ساختار پودر در اثر اختلاط مؤثر نسبت داده شود. ضرایب تعیین بسیار بالا ($R^2 \approx 0.97-0.99$) در این بخش نشان‌دهنده کفایت مناسب مدل‌ها در پیش‌بینی این پاسخ‌ها بود. به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که زمان استراحت و زمان هم‌زدن باعث افزایش هوای موجود در فوم شده که به دنبال آن افزایش سطح و حجم اتفاق می‌افتد بنابراین دانسیته ظاهری کاهش پیدا می‌کند (۲۰). با افزایش محتوای پروتئین نهایی پودرهای MPC، چگالی ظاهری به دلیل افزایش سطوح هوای بینابینی و مسدود کاهش یافت (۲۲). همچنین محققان نشان دادند که غلظت MD (۴۰٪) به دلیل کاهش اندازه ذرات باعث افزایش جرم و چگالی ضربه‌ای می‌شود، به‌طوری‌که در چگالی ضربه‌ای، برخورد ذرات کوچک‌تر باعث اشغال فضای بین ذرات بزرگ‌تر می‌شود (۲۱).

References

1. Sanatombi K, Rajkumari S. Effect of processing on quality of pepper: A review. Food Reviews International. 2020;36(6):626-43.
2. Park JY, Yang JH, Lee MA, Jeong S, Yoo S. Effects of different drying methods on physicochemical properties, volatile profile, and sensory characteristics of kimchi powder. Food science and biotechnology. 2019;28(3):711-20.
3. Valdivia-Nájjar CG, Moreno-Vilet L. Novel Methods of Food Preservation. In Quantitative Methods and Analytical Techniques in Food Microbiology 2022, pp. 189-212). Apple Academic Press.
4. Thuy NM, Tien VQ, Tuyen NN, Giau TN, Minh VQ, Tai NV. Optimization of mulberry extract foam-mat drying process parameters. Molecules. 2022;27(23):8570.
5. Nguyen TP, Songsermpong S. Microwave processing technology for food safety and quality: A review. Agriculture and Natural Resources. 2022;56(1):57-72.

6. Chen BL, Lin GS, Amani M, Yan WM. Microwave-assisted freeze drying of pineapple: Kinetic, product quality, and energy consumption. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 41:102682.
7. Kumar G, Kumar N, Prabhakar PK, Kishore A. Foam-mat drying: Recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(26):8275-91.
8. Cakmak H, Ozyurt VH. Effect of foam-mat drying on bioactive, powder and thermal properties of carrot juice powders. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2023;95(3): e20220554.
9. Salahi MR, Mohebbi M, Taghizadeh M. Foam-mat drying of cantaloupe (*Cucumis Melo*): Optimization of foaming parameters and investigating drying characteristics. *Journal of food processing and preservation*. 2015;39(6):1798-808.
10. Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B, Ghaffari H. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. *Powder technology*. 2018a; 328:470-84.
11. Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B, Ghaffari H. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. *Powder technology*. 2018; 328:470-84.
12. Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B, Ghaffari H. A multivariable approach for intensification of foam-mat drying process: Empirical and three-dimensional numerical analyses. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2019; 135:22-41.
13. Caparino OA, Tang J, Nindo CI, Sablani SS, Powers JR, Fellman JK. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of food engineering*. 2012;111(1):135-48.
14. Darniadi S, Ifie I, Luna P, Ho P, Murray BS. Foam-mat freeze-drying of blueberry juice by using trehalose- β -lactoglobulin and trehalose-bovine serum albumin as matrices. *Food and Bioprocess Technology*. 2020; 13:988-97.
15. Moura TP, Aquino AC, Rodrigues S, Afonso MR. Hygroscopic behavior of bacuri powders. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2024;59: e03503.
16. Moll P, Grossmann L, Kutzli I, Weiss J. Influence of energy density and viscosity on foam stability—A study with pea protein (*Pisum Sativum* L.). *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2020;41(12):1789-96
17. Crowley SV, Gazi I, Kelly AL, Huppertz T, O'Mahony JA. Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. *Journal of Food Engineering*. 2014; 135:31-8.
18. Joardder MU, Kumar C, Karim MA. Multiphase transfer model for intermittent microwave-convective drying of food: Considering shrinkage and pore evolution. *International Journal of Multiphase Flow*. 2017; 95:101-19.
19. Khashayary S, Aarabi A. Evaluation of physico-mechanical and antifungal properties of gluten-based film incorporated with vanillin, salicylic acid, and montmorillonite (Cloisite 15A). *Food and Bioprocess Technology*. 2021;14(4):665-78.
20. Crowley SV, Gazi I, Kelly AL, Huppertz T, O'Mahony JA. Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. *Journal of Food Engineering*. 2014; 135:31-8.
21. Seerangurayar T, Manickavasagan A, Al-Ismaili AM, Al-Mulla YA. Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. *Journal of Food Engineering*. 2017; 215:33-43.