# خشک کردن فلفل دلمه‌ای قرمز در جهت تولید پودر پاپریکا با فرآیند کف‌پوشی با استفاده از مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین شیر

**سمیه سنجری[۱] ، نفیسه جهانبخشیان[۲*]، صدیقه سلیمانی فرد[۳]، مریم خاکباز حشمتی[۴]، زهرا بیگ محمدی[۱]**

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

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

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

۴-گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول:njahanbakhshian@yahoo.com

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷، پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

## چکیده

در این پژوهش، برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پودر پاپریکا به روش خشک کردن کف‌پوشی، مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر سه متغیر مستقل غلظت کنسانتره پروتئین شیر و مالتودکسترین به‌عنوان ماده کف‌زا به ترتیب در محدوده غلظت (۰تا۱۰درصد) و شدت توان مایکروویو در محدوده (۴۰۰-۸۰۰)وات، بر برخی ویژگی‌های فیزیکی فوم و پودر شامل رنگ، پایداری، تخلخل، میزان رطوبت، بازده و مورفولوژی تعیین شد. بهینه فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شد. با افزایش مالتودکسترین در فوم، شاخص L*،b* ($P\leq ۰/۰۵$) افزایش یافت. محدوده تغییرات (۲۱/۴۸۲-۱۲/۲۱)L* و (۴/۱۲۴-۱۰/۸۱۹) b*، متغیر بود. افزایش کنسانتره پروتئین شیر به‌صورت خطی باعث افزایش تخلخل فوم شد به‌طوریکه اثر درجه دوم آن کاهش این پارامتر را نشان داد. محدوده تغییرات تخلخل فوم ۰/۰۹۶- ۰/۴۶۹۴درصد شد. با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین شیر در فوم، پایداری و پارامترهای رنگ a*، b* افزایش یافتند. نتایج حاصل از ارزیابی پودر نشان داد که با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین شیر، بازده در سطح ($P\leq ۰/۰۱$) معنادار شد و افزایش را به دنبال داشت. درصورتی‌که که اثر توان کاهش بازده را به دنبال داشت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نمونه بهینه دارای ذرات ریزتر و سطوح صاف، نرم‌تر و پوسته‌پوسته است. بررسی یافته‌ها نشان داد که پودر دارای ۱۰درصد مالتودکسترین و۱۰درصد کنسانتره پروتئین شیر در توان ۴۰۰وات مایکروویو را می‌توان به‌عنوان نمونه بهینه، معرفی نمود.

**واژه‌های کلیدی:** پودر پاپریکا، مایکروویو، کنسانتره پروتئین شیر، مالتودکسترین، فوم مت.

## مقدمه

پاپریکا، میوه خشک و آسیاب شده انواع خاصی از فلفل قرمز و یکی از پرمصرف‌ترین رنگ‌های غذایی برای مصارف آشپزی و صنعتی است. میوه‌های رسیده پاپریکا (فلفل قرمز) به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان سبزیجات و رنگ‌های غذایی استفاده می‌شود که منابع خوبی از رنگدانه‌های کاروتنوئیدی هستند. کاروتنوئیدهای قرمز، عمدتاً کپسانتین و کپسوروبین هستند(۱). پاپریکا به دلیل ظرفیت رنگ‌دهی بالا و در برخی موارد تندی خاص، برای تغییر رنگ و طعم سوپ‌ها، خورش‌ها، سوسیس، پنیر، تنقلات، سس‌ها، پیتزا و محصولات قنادی و... استفاده می‌شود(۲). بر اساس گزارش بوکن هاسک (۲۰۰۱)، تولید جهانی سالانه اولئورزین پاپریکا و پاپریکا به ترتیب تقریباً ۶۰۰۰۰ تن و ۱۴۰۰ تن بود(۷). همچنین در اروپا ادویه‌ها و سبزیجات زیادی رشد می‌کنند که ویژگی خاص آن‌ها به اجزایی بستگی دارد که برخی از آن‌ها ازنظر حرارتی ناپایدار هستند. تجارت با این ادویه‌ها و سبزیجات تولید شده در اروپا برای اقتصاد کشورهای درگیر، اهمیت قابل‌توجهی دارد. تخمین زده می‌شود ۱۰,۶۵۵ تن به ارزش ۱۸.۶ میلیون دلار پاپریکا از مجارستان و مدیترانه به آلمان وارد شود(۳). پاپریکا پس از برداشت، خشک می‌شود و در هفته‌ها یا ماه‌های

بعدی آسیاب می‌شود. برای نگهداری هر محصول گیاهی، باید بلافاصله پس از برداشت به‌درستی فرآوری شود. اگرچه فرآوری ادویه دارای سنت بسیار طولانی است، اما چندین محصول معمولاً در طول فرآوری دچار افت کیفیت مشخصی می‌شوند. پاپریکا دچار واکنش‌های آنزیمی قهوه‌ای شدن و از دست دادن شدید ترکیبات معطر می‌شود. در پاپریکا، ترکیبات تلخ علاوه بر تغییرات رنگ قابل‌توجه ظاهر می‌شوند که ارزش بازار را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. کیفیت پاپریکا آسیاب شده عمدتاً با قدرت چاشنی آن یعنی محتوای کپسایسین رنگ طبیعی آن یعنی محتوای کاروتنوئید، اندازه ذرات و محتوای آب آن تعیین می‌شود. انتخاب شرایط خشک کردن مناسب برای به حداقل رساندن تنش حرارتی، خشک شدن بیش‌ازحد و نگهداری ترکیبات مربوطه (کاروتنوئیدها، ویتامین C، توکوفرول‌ها، کپسایسین) که کیفیت محصول را تعیین می‌کند، ضروری است. از دست دادن رنگ قرمز در اثر اتواکسیداسیون کاروتنوئیدها ایجاد می‌شود. گزارش شده است که پایداری کیفیت پاپریکا در طول ذخیره‌سازی به شرایط خشک شدن بستگی دارد و با افزایش دمای خشک کردن، میزان تخریب کیفیت افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت این محصول، استانداردسازی پروتکل فرآوری ضروری است(۳). کاروتنوئیدها زمانی که در بافت دست‌نخورده گیاه وجود داشته باشند، بسیار پایدار هستند، اما زمانی که فرآوری شوند، جدا شده و در برابر اثرات گرما، نور و تنش بالای اکسیژن، آسیب‌پذیر هستند. ازآنجایی‌که فعالیت آبی[1] در نمونه پاپریکا به روش تولید مورد استفاده بستگی دارد، واضح است که سیستم خشک کردن، ازجمله مراحل پیش فرآیند آن، بر پایداری رنگدانه تأثیر خواهد داشت. تخریب رنگدانه در پاپریکا با تخریب ویتامین‌های C و E، همزمان است و با تخریب کاروتنوئیدهای زرد و قرمز به دلیل اکسید شدن آن‌ها در هوا ادامه می‌یابد. درعین‌حال، اکسیداسیون تحت تأثیر عوامل خارجی است که ممکن است ماهیت فیزیکی (دما، رطوبت، نور و غیره) یا شیمیایی (وجود یون‌های فلزی، آنزیم‌ها، پراکسیدها و غیره) باشد. پاپریکا، خواه مستقیماً به‌عنوان ادویه یا برای استخراج رنگدانه‌ها در حین استخراج اولئورزین استفاده شود، معمولاً قبل از استفاده تحت نوعی پیش‌فرآوری و خشک‌شدن قرار می‌گیرد. به‌همین‌دلیل، ایجاد پروتکل‌های مناسب فرآوری، بسیار مهم است، به‌طوری‌که می‌توان تخریب رنگدانه را به‌حداقل رساند و ذخیره کاروتنوئید را افزایش داد(۲۲). در این راستا هدف از این تحقیق، خشک‌کردن پاپریکا با روش فوم‌مت و مایکروویو و تعیین ویژگی‌های کیفی، ریزساختاری و عملکردی پودر حاصل بود.

## روش کار

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل پودر کنسانتره شیر از شرکت پگاه اصفهان، مالتودکسترین با درجه دکستروز ۲۰درصد از شرکت گل شهد اصفهان، فلفل دلمه‌ای قرمز از بازار محلی شهرستان جیرفت، معرف فولین سیوکالتو متانول، اتانول، تولوئن، کربنات سدیم اسید گالیک و ۲،۲-دی‌فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل خریداری شد. میوه پاپریکا پس از تهیه از بازار محلی، به آزمایشگاه منتقل و قبل از انجام آزمایش‌ها برای جلوگیری از تغییرات فیزیولوژی به پالپ تبدیل شده و در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. نمونه‌ها قبل از فرآیند برای یخ‌زدایی[2] طبیعی به دمای اتاق رسانده شدند و ۲ ساعت در این دما باقی ماندند. جهت بررسی اثر غلظت مالتودکسترین در محدوده (۰-۱۰٪)، کنسانتره پروتئین شیر در محدوده (۰-۱۰٪) و توان مایکروویو در محدوده ۴۰۰ الی ۸۰۰ وات جدول(۱)، در ویژگی‌های فوم و پودر تولیدی از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (نسخه ۱۱)، استفاده شد.

[1] aw: Water activity

[2] Thawing

جدول۱- طراحی آزمون تیمارها

| تیمار | فاکتور۱ مالتودکسترین (گرم) | فاکتور۲ کنسانتره پروتئین شیر (گرم) | فاکتور۳ توان (وات) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۵ | ۶۰۰ |
| ۲ | ۱۰ | ۰ | ۸۰۰ |
| ۳ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ |
| ۴ | ۱۰ | ۵ | ۶۰۰ |
| ۵ | ۵ | ۰ | ۶۰۰ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۴۰۰ |
| ۷ | ۰ | ۱۰ | ۸۰۰ |
| ۸ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ |
| ۹ | ۵ | ۱۰ | ۶۰۰ |
| ۱۰ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ |
| ۱۱ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ |
| ۱۲ | ۵ | ۵ | ۸۰۰ |
| ۱۳ | ۵ | ۵ | ۴۰۰ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۰ | ۴۰۰ |
| ۱۵ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ |

## خشک کردن پاپریکا با روش فوم‌مت و با استفاده از دستگاه مایکروویو

پالپ پاپریکا با مواد کف‌کننده در غلظت‌های مشخص (۰-۱۰٪) در میکسر آزمایشگاهی مخلوط شد و در ضخامت ۵ میلی‌متر در کف پلیت گسترده شد. فوم حاصل ازنظر ویژگی‌های کیفی بررسی، سپس در دستگاه مایکروویو مطابق با توان تعریف شده (۴۰۰ الی ۸۰۰ وات) خشک گردید. پس از اتمام فرایند خشک‌کردن، نمونه‌های به‌دست‌آمده آسیاب و الک شد و پودر پاپریکا به دست آمد.

## ارزیابی خواص فوم و پودر پاپریکا

### پایداری فوم

حجم آب چکیده شده با قرار دادن ۵۰ میلی‌لیتر فوم در فیلتر بوخنر با قطر ۹۰ میلی‌متر (پوشانده شده با فیلتر 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 فرمول (۱)، تعیین شد (۱۲،۱۴):

$$Stability = \frac{vfoam}{v0foam} \times 100 \quad (۱)$$

که در آن، $vfoam$ حجم فوم به صورت تفاوت بین حجم اولیه فوم و حجم مایع چکیده شده (میلی‌لیتر) و $v0foam$ حجم اولیه فوم (میلی‌لیتر) می‌باشد. برای رسیدن به حجم اولیه ۵۰ میلی‌لیتر از فوم، دانسیته فوم در مقدار ۵۰ میلی‌لیتر ضرب شد و وزن موردنیاز برای رسیدن به حجم ۵۰ میلی‌لیتر توزین شد.

### تخلخل فوم (جزء حجمی هوا)

تخلخل فوم با استفاده از فرمول(۲)، به دست آمد (۱۱):

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_l} \quad (۲)$$

که در آن، $\rho_f$ دانسیته فوم ($g/cm^3$) و $\rho_l$ دانسیته پاپریکا ($g/cm^3$) می‌باشد. دانسیته با اندازه‌گیری وزن در حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر از استوانه مدرج به دست آمد.

## اندازه‌گیری رنگ فوم

فوم تولیدی پاپریکا را برای تصویربرداری در پلیت ریخته و با یک رنگ‌سنج پارامترها رنگ شامل میزان روشنایی یا *L از سیاه (۰) تا سفید (۱۰۰)، میزان قرمزی یا *a از سبز (مقادیر منفی) تا قرمز (مقادیر مثبت)، میزان زردی یا *b از آبی (مقادیر منفی) تا زرد (مقادیر مثبت)، اندازه‌گیری شد (۱۲).

## اندازه‌گیری رطوبت پودر

میزان رطوبت با توزین ۵ گرم پودر پاپریکا و قرار دادن آن در آون با هوای گرم ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. خشک کردن تا زمانی که کاهش وزن به سختی قابل‌توجه بود (در فواصل ۲ ساعته) انجام گرفت. میزان رطوبت بر اساس فرمول(۳)، محاسبه شد(۲۰،۱۱).

$$Moistur\ content\ (\%) = {}^{Wm}/_{Wd} \times 100 \quad (۳)$$

## بازده

بازده محصول به‌عنوان نسبت جرم پودر جامد به‌دست‌آمده در پایان خشک کردن فوم مت به جرم اولیه محاسبه شد(۹).

$$\text{بازده } (\%) = 100 \times (\text{Solids in powder / total solid in foam or feeds solution}) \quad (۴)$$

## تعیین محتوای کل فنول

محتوای فنل کل با استفاده از روش فولین سیوکالتیو تعیین شد. ابتدا محلول‌های استاندارد از اسید گالیک در محلول ۶۰٪ متانول تهیه شد. پودر یا اسید گالیک (استاندارد) در متانول حل شد و به یک لوله آزمایش (۱۰۰ میکرولیتر) و سپس معرف فولین‌سیوکالتیو (۲۰۰ میکرولیتر) اضافه شد. محلول برای مدت کوتاهی ورتکس شد و محلول کربنات‌سدیم (۸۰۰ میکرولیتر، ۷۰۰ میلی‌مولار) پس از ۵ دقیقه، اضافه شد. جذب محلول پس از انکوباسیون به مدت ۲ ساعت در تاریکی در طول‌موج ۷۶۵ نانومتر، خوانده شد. منحنی کالیبراسیون محلول استاندارد در غلظت‌های mg/ml ۰-۱ رسم شد و محتوای فنل کل بر حسب میلی‌گرم اسید گالیک معادل در هر گرم وزن خشک، به دست آمد (۲۴).

## فعالیت آنتی‌اکسیدانی

برای تعیین ظرفیت مهار رادیکال در برابر $ABTS^{+\cdot}$، رادیکال کاتیونی با مخلوط کردن حجم‌های مساوی از محلول ABTS (۷/۴ میلی‌مولار) و پرسولفات پتاسیم (۲/۶ میلی‌مولار) و سپس انکوباسیون در تاریکی در دمای اتاق به مدت ۱۶ ساعت، تولید شد. محلول کاری $ABTS^{+}$ از این محلول ذخیره شده با رقیق شدن با اتانول برای به دست آوردن مقدار جذب در ۷۳۴ نانومتر تولید می‌شود. سنجش با افزودن مایع رویی از نمونه (۱۰۰ میکرولیتر) با غلظت‌های مختلف به محلول کاری $ABTS^{+}$ (۴۰۰ میکرولیتر) انجام شد. سپس مخلوط محلول در دمای اتاق در تاریکی به مدت ۱۰ دقیقه، انکوبه شد. جذب در ۷۳۴ نانومتر به دست آمد و مهار رادیکال آزاد بر حسب درصد بر اساس فرمول (۵)، محاسبه شد (۱۶).

$$RSC(\%) = \left(\frac{\text{Abs control} - \text{Abs sample}}{\text{Abs sample}}\right) \times 100 \quad (۵)$$

## آنالیز ویژگی‌های ریزساختاری و مورفولوژی ذرات پودر

بررسی ویژگی‌های ریزساختاری پودر بهینه پاپریکا به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت. ابتدا نمونه به صورت مجزا با استفاده از نوارچسب‌های دوسویه بر روی صفحه‌های آلومینیومی قرار گرفت. سپس، عمل روکش‌دهی ذرات پودر با استفاده از لایه‌نازکی از طلا انجام گرفت. از نمونه‌ها در مقیاس ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر، در ولتاژ ۲۰ کیلووات و با بزرگنمایی ۶۰۰، عکس‌برداری شد (۸).

## تجزیه‌وتحلیل آماری

در این پژوهش، آنالیز آماری تیمارها بر اساس طراحی آزمون سطح پاسخ، به روش طرح مرکب

مرکزی (CCD) با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۱، آنالیز شد .تمامی نمودارهای مکعبی و سطح پاسخ توسط همین نرم‌افزار، ترسیم گردید.

## نتایج

## بررسی اثر متغیرها بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فوم و پودر تولید شده با روش فوم مت

در مجموع، ۱۵ تیمار فوم با شش تکرار در نقطه مرکزی به‌منظور تعیین خطای خالص و تکرارپذیری همه داده‌ها، بر اساس طرح مرکب مرکزی به دست آمد (جدول۱). مدل‌هایی برای همه پاسخ‌ها بر اساس روش آنوا توسعه یافته‌اند. پارامترهای مختلفی شامل: ارزش مدل، ضریب تبیین، عدم برازش مدل، برازش مدل برای ارزیابی کفایت مدل استفاده شد. نوع مدل و عدم برازش مدل در سطح معناداری ۰/۰۵ ، ارزیابی شد و سپس معادله نهایی برای مدل برازش شده، پیشنهاد شد. P-value کمتر نشان‌دهنده اهمیت بالاتر ضریب متناظر است و P≤ ۰/۰۵ نشان می‌دهد که ضریب متناظر بسیار معنی‌دار است و برای گسترش مدل‌های سطح پاسخ، همه اصطلاحات غیرمعنادار با P>۰/۰۵ حذف شدند و معادلات رگرسیون نهایی توسعه یافتند. مدل‌های ارائه شده از طریق سطح پاسخ برای پاسخ میزان و نسبت رطوبت، تخلخل، پایداری، ویژگی‌های رنگی فوم ، محتوای فنل کل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، بازده و شاخص جریان پذیری، به‌دست‌آمده‌اند.

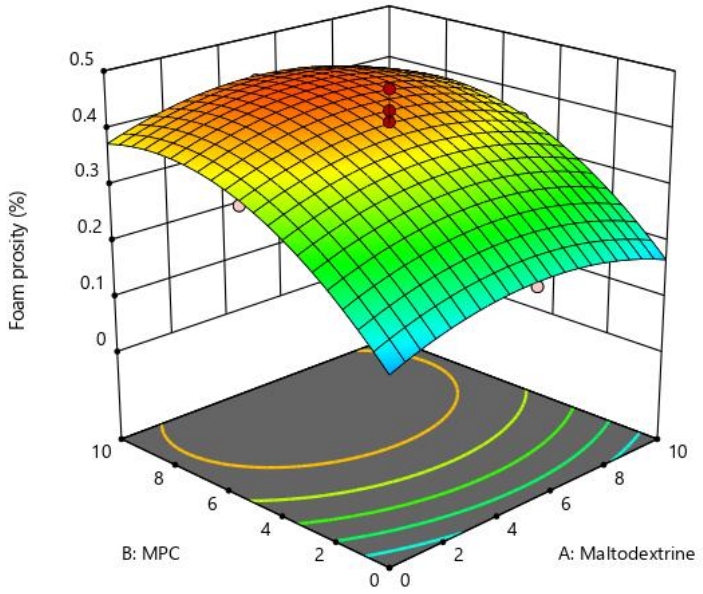
## تخلخل فوم

با توجه به جدول (۲)، محدوده تغییرات این پارامتر از ۰/۴۶۹-۰/۰۹۶متغیر بود. مدل این پاسخ در سطح (P≤۰/۰۵) معنادار شد. نتایج آنووا جدول(۳)، نشان داد که ضریب تبیین مدل۰/۹۵ بود که نشان می‌دهد داده‌های تجربی را می‌توان به‌طور قابل پیش‌بینی با داده‌های مدل برای تخلخل برازش داد. همچنین بر اساس مدل پیشنهادی فرمول (۶)، اثر خطی غلظت کنسانتره پروتئین شیر تأثیر مثبت بر تخلخل فوم داشت. درحالی‌که اثر درجه دوم همین متغیر عکس عمل کرد و کاهش تخلخل فوم را نشان داد شکل(۱).

$$Foam\ Prosity\ as\ (y) = 0.4096 + 0.1059x_2 - 0.0868x_2^2 \quad (۶)$$

جدول۲- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای قوم پاپریکا (مالتودکسترین، کنسانتره پروتئین شیر)، تخلخل فوم

| تیمار | فاکتور۱ مالتودکسترین(گرم) | فاکتور۲ کنسانتره پروتئین شیر (گرم) | فاکتور۳ توان(وات) | تخلخل فوم (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۳۴۴۸ |
| ۲ | ۱۰ | ۰ | ۸۰۰ | ۰/۱۹۷۲ |
| ۳ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۳۹۷۴ |
| ۴ | ۱۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۳۵۱ |
| ۵ | ۵ | ۰ | ۶۰۰ | ۰/۲۰۹ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۴۰۰ | ۰/۰۹۶۰۸ |
| ۷ | ۰ | ۱۰ | ۸۰۰ | ۰/۴۱۵۶ |
| ۸ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۴۳۲۲ |
| ۹ | ۵ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۰/۴۲۰۹ |
| ۱۰ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۴۶۹۴ |
| ۱۱ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۳۶۷۵ |
| ۱۲ | ۵ | ۵ | ۸۰۰ | ۰/۴۳۲۵ |
| ۱۳ | ۵ | ۵ | ۴۰۰ | ۰/۳۴۲۲ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۰ | ۴۰۰ | ۰/۳۲۵۲ |
| ۱۵ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۰/۴۱۲۶ |




شکل ۱- نمودارهای سطح پاسخ که اثرات متقابل متغیرهای فرآیند را بر تخلخل

جدول ۳- تجزیه‌وتحلیل واریانس برای تعیین برازش مدل، ضریب رگرسیون، ضریب تعیین ، و مقدار آزمون مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم پیش‌بینی‌شده برای پاسخ‌ها

| عامل | |
|---|---|
| | تخلخل فوم |
| رهگیری | ۰/۴۰۹۶ |
| اثر خطی | |
| $X_1$ (مالتودکسترین) | ۰/۰۰۳۱ |
| $X_2$ (کنسانتره پروتئین شیر) | ۰/۱۰۵۹* |
| $X_3$ (توان) | ۰/۰۴۵۲ |
| اثر متقابل | |
| $X_1 X_2$ | -۰/۰۰۲۷ |
| $X_1X_3$ | -۰/۰۰۵۹ |
| $X_2X_3$ | ۰/۰۰۰۴ |
| اثر درجه دوم | |
| $X_1^2$ | -۰/۰۵۳۸ |
| $X_2^2$ | -۰/۰۸۶۸* |
| $X_3^2$ | -۰/۰۱۴۴ |
| ضریب همبستگی | ۰/۹۵۷۶ |
| تأثیر پارامتر | ۱۲/۵۳ |
| عدم برازش | ۰/۴۳۰۱ |
| برازش مدل | ۰/۰۰۶۲** |

**معناداری مدل در سطح ۰/۰۱ درصد را نشان می‌دهد.

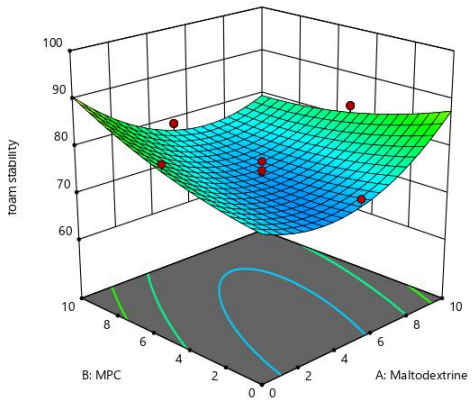
**پایداری فوم**

پایداری فوم‌های مختلف بر اساس جدول پاسخ (۴) ، ۶۹-۹۹ درصد شد. مقدار ضریب تبیین برای مدل ۰/۹۳ بود که نشان می‌دهد داده‌های تجربی را می‌توان به‌طور قابل پیش‌بینی با داده‌های مدل برای پایداری فوم برازش داد. نتایج جدول آنووا (۵)، نشان داد که پایداری فوم تنها تحت تأثیر اثر درجه دوم مالتودکسترین قرار گرفت و در سطح ۰/۰۱ درصد معنادار شد. همان‌طور که در شکل(۲) مشاهده می‌شود تأثیر مالتودکسترین روند افزایشی بر روی پایداری داشته است. مدل پیشنهادی به‌دست‌آمده از جدول آنووا فرمول (۷)، را برای این پارامتر ارائه داد.

$$Foam\ Stability\ as\ (y) = 73.82 + 7.65x_1^2 \quad (۷)$$

جدول۴- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای قوم پاپریکا (مالتودکسترین، کنسانتره پروتئین شیر)، پایداری فوم

| تیمار | فاکتور۱ مالتودکسترین (درصد) | فاکتور۳ توان (وات) | فاکتور۲ کنسانتره پروتئین شیر (درصد) | پایداری فوم (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۶۰۰ | ۵ | ۸۳ |
| ۲ | ۱۰ | ۸۰۰ | ۰ | ۷۵ |
| ۳ | ۵ | ۶۰۰ | ۵ | ۷۱ |
| ۴ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۵ | ۸۳ |
| ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۰ | ۷۶ |
| ۶ | ۰ | ۴۰۰ | ۰ | ۹۹ |
| ۷ | ۰ | ۸۰۰ | ۱۰ | ۹۳ |
| ۸ | ۵ | ۶۰۰ | ۵ | ۶۹ |
| ۹ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۰ | ۷۹ |
| ۱۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۵ | ۷۱ |
| ۱۱ | ۵ | ۶۰۰ | ۵ | ۷۵ |
| ۱۲ | ۵ | ۸۰۰ | ۵ | ۷۱ |
| ۱۳ | ۵ | ۴۰۰ | ۵ | ۸۹ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۴۰۰ | ۱۰ | ۸۳ |
| ۱۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۵ | ۷۷ |




شکل ۲- نمودارهای سطح پاسخ که اثرات متقابل متغیرهای فرآیند را بر پایداری

جدول ۵- تجزیه‌وتحلیل واریانس برای تعیین برازش مدل، ضریب رگرسیون، ضریب تعیین ، و مقدار آزمون مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم پیش‌بینی‌شده برای پاسخ‌ها

| عامل | پایداری فوم |
|---|---|
| رهگیری | ۷۳/۸۲ |
| اثر خطی | |
| $X_1$ (مالتودکسترین) | - |
| $X_2$ (کنسانتره پروتئین شیر) | ۱/۵۰ |
| $X_3$ (توان) | -۹/۰۰* |
| اثر متقابل | |
| $X_1 X_2$ | -۵/۵۰* |
| $X_1X_3$ | ۱/۰۰ |
| $X_2X_3$ | ۸/۵۰ |
| اثر درجه دوم | |
| $X_1^2$ | ۷/۶۵* |
| $X_2^2$ | ۲/۱۵ |
| $X_3^2$ | ۴/۶۵ |
| ضریب همبستگی | ۰/۹۳۷۷ |
| تأثیر پارامتر | ۸/۳۶ |
| عدم برازش | ۲/۲۱ |
| برازش مدل | ۰/۰۱۵۴* |

*معناداری مدل را در سطح ۰/۰۵ درصد نشان می‌دهد.

## پارامتر رنگ فوم

نتایج آنووا (۷)، نشان داد که مقادیر ضریب همبستگی برای پارامترهای رنگی L*,a*,b* به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۶۳ و ۰/۹۱ بود. پارامتر رنگی L* تحت تأثیر اثر خطی مالتودکسترین و اثر درجه دوم کنسانتره پروتئین شیر قرار گرفت که مالتودکسترین افزایش و کنسانتره پروتئین شیر کاهش این پارامتر را نشان داد. جدول آنووا مدل توسعه یافته برای L* را نشان می‌دهد. محدوده تغییرات این پارامتر بر اساس جدول پاسخ (۶)، از۱۲/۲۱-۲۱/۴۸۸متغیر بود. فرمول (۸)، برای مدل به دست آمد. و این مدل در سطح ۰/۰۵ درصد معنادار شد شکل(۳-A). بر اساس جدول تیمارها(۶) ، محدوده تغییرات برای a*، از ۵/۵۶-۹/۳۲ متغیر بود. عامل تأثیرگذار بر این پارامتر رنگی غلظت کنسانتره پروتئین شیر به‌صورت اثر خطی بود که با افزایش این متغیر فوم ما رنگ قرمزتری را نشان داد. آنووا برای این پارامتر فرمول (۹)، را ارائه داد.

$$L * f\ as\ (y) = 18.08 + 2.47x_1 - 2.13x_2^2 \quad (۸)$$

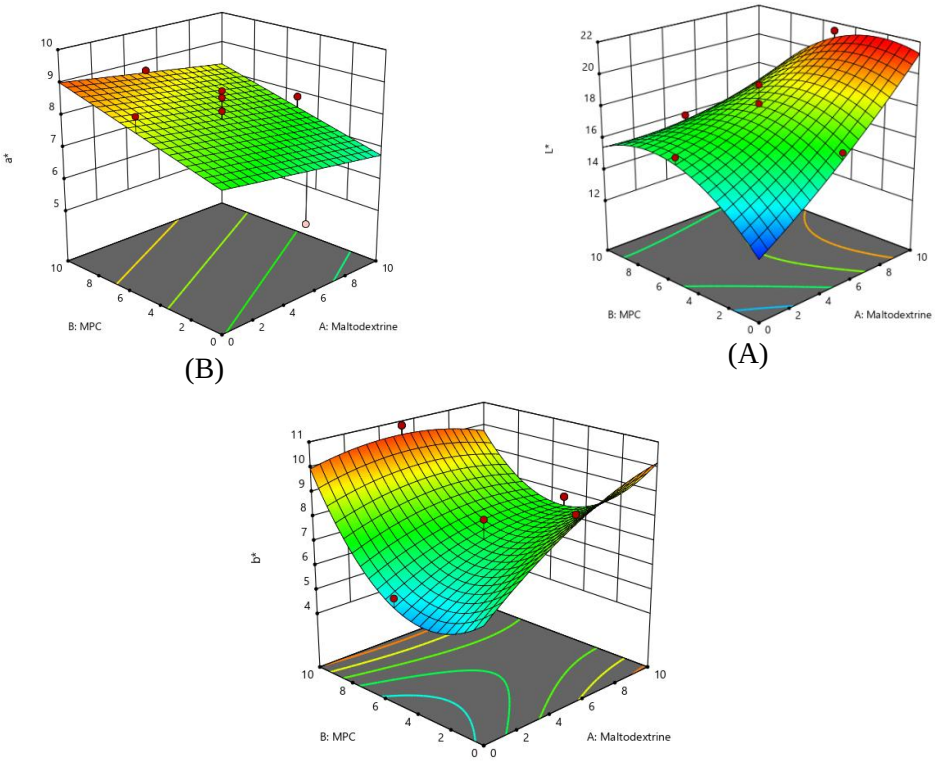
$$a * f\ as\ (y) = 7.89 + 0.7486x_2 \quad (۹)$$

$$b * f\ as\ (y) = 7.10 + 2.53x_2^2 \quad (۱۰)$$

با توجه به شکل(۳-B)، این تغییرات را می‌توان مشاهده کرد. مطابق با جدول (۵)، پارامتر رنگی b* نیز مانند a* تنها تحت تأثیر عامل درجه دوم کنسانتره پروتئین شیر، قرار گرفت و معنادار شد (P≤۰/۰۵). محدوده تغییرات b* بر طبق جدول تیمارها (۶) از ۴/۱۲-۱۰/۸۱ متغیر بود. بیشترین مقدار مربوط به تیمار۹ با ۵درصد مالتودکسترین و ۱۰درصد کنسانتره پروتئین شیر در توان ۶۰۰ مایکروویو بود. با توجه به جدول آنووا مدل پیشنهادی این پارامتر رابطه(۱۰) به دست آمد. شکل(۳-C) بیانگر تغییرات رنگ b* است.

جدول۶- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای قوم پاپریکا (مالتودکسترین، کنسانتره پروتئین شیر)، L*,a*,b*

| تیمار | فاکتور۱ مالتودکسترین (گرم) | فاکتور۲ کنسانتره پروتئین شیر (گرم) | فاکتور۳ توان (وات) | L* (فوم) | a* (فوم) | b* (فوم) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶/۵۵ | ۸/۷۴۲۵ | ۵/۹۵۴ |
| ۲ | ۱۰ | ۰ | ۸۰۰ | ۱۶/۲۸۷ | ۶/۲۲۷ | ۶/۵۴۶ |
| ۳ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۹/۴ | ۸/۷۶۵ | ۶/۴۳۶ |
| ۴ | ۱۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۲۱/۴۸۸ | ۷/۸۷۱ | ۷/۸۱۷۳ |
| ۵ | ۵ | ۰ | ۶۰۰ | ۱۶/۸۳۹ | ۵/۵۶۳ | ۹/۱۹۳ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۴۰۰ | ۱۲/۲۱ | ۹/۳۲۶ | ۵/۵۲۸ |
| ۷ | ۰ | ۱۰ | ۸۰۰ | ۱۳/۱۳ | ۷/۵۷۵ | ۶/۴۹۲۶ |
| ۸ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۷/۶۴۳ | ۸/۱۴۶ | ۷/۹۱۱۳ |
| ۹ | ۵ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۱۵/۵۹ | ۸/۷۱۲۵ | ۱۰/۸۱۹۳ |
| ۱۰ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۸/۲۲۶ | ۷/۱۸۵ | ۷/۰۰۵۶ |
| ۱۱ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶/۵۲۹ | ۶/۶۷۵ | ۶/۴۳۳ |
| ۱۲ | ۵ | ۵ | ۸۰۰ | ۱۵/۰۷ | ۶/۸۶۵ | ۴/۱۲۴ |
| ۱۳ | ۵ | ۵ | ۴۰۰ | ۲۰/۲۱۸ | ۸/۸۹ | ۴/۸۰۳ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۰ | ۴۰۰ | ۱۹/۷۵۱ | ۹/۳۲ | ۴/۷۷۹ |
| ۱۵ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶/۸۲ | ۸/۵۶ | ۶/۱۹۵ |




(B) (A) (C)

شکل۳- نمودارهای سطح پاسخ که اثرات متقابل متغیرهای فرآیند را بر L* (A)، a*(B)، b* (C)

جدول ۷- تجزیه‌وتحلیل واریانس برای تعیین برازش مدل، ضریب رگرسیون، ضریب تعیین ، و مقدار آزمون مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم پیش‌بینی‌شده برای پاسخ‌ها

| عامل | ضریب | | |
|---|---|---|---|
| | L* (فوم) | a* (فوم) | b* (فوم) |
| رهگیری | ۱۸/۰۸ | ۷/۸۹ | ۷/۱۰ |
| اثر خطی | | | |
| $X_1$ (مالتودکسترین) | ۲/۴۷* | -۰/۳۷۰۹ | ۰/۹۳۱۷ |
| $X_2$ (کنسانتره پروتئین شیر) | -۰/۴۴ | ۰/۷۴۸۶* | ۰/۸۱۳۲ |
| $X_3$ (توان) | - | -۱/۱۴** | -۰/۳۳۹۵ |
| اثر متقابل | -۲/۵۷* | | |
| $X_1 X_2$ | -۱/۹۴ | - | -۱/۰۲ |
| $X_1X_3$ | -۱/۵۴ | - | ۱/۰۱ |
| $X_2X_3$ | -۰/۲۰۵۵ | - | ۱/۱۱ |
| اثر درجه دوم | | | |
| $X_1^2$ | ۰/۴۹۵۷ | - | -۰/۵۹۰۵ |
| $X_2^2$ | -۲/۱۳* | - | ۲/۵۳** |
| $X_3^2$ | -۰/۸۷۹۳ | - | -۳/۰۱** |
| ضریب همبستگی | ۰/۹۱۸۱ | ۰/۶۳۱۲ | ۰/۹۲۰۴ |
| تأثیر پارامتر | ۶/۲۲ | ۶/۲۷ | ۶/۴۳ |
| عدم برازش | ۱/۵۲ | ۰/۶۶۶۶ | ۳/۰۵ |
| برازش مدل | ۰/۰۲۹۰* | ۰/۰۰۹۷** | ۰/۰۲۷۲* |

*معناداری مدل را در سطح ۰/۰۵ و ** معناداری مدل را در سطح ۰/۰۱درصد نشان می‌دهد.

## محتوای رطوبت پودر

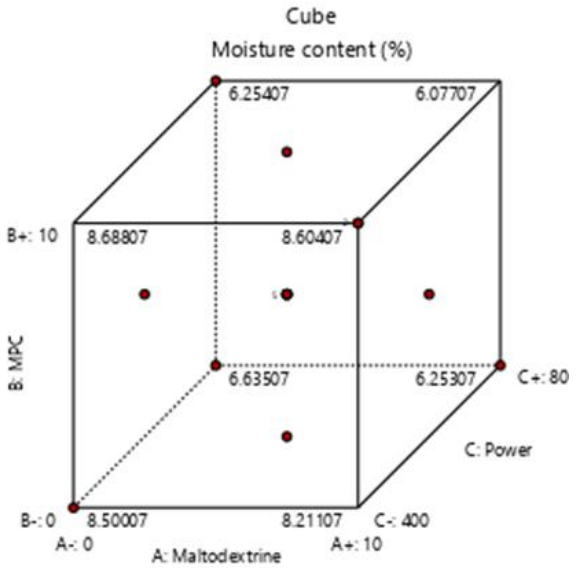
میزان رطوبت نمونه‌های خشک شده با کف در جدول (۸)، ارائه شده است. نتایج آنووا نشان داد که ضریب تبیین مدل ۰/۸۶ بود که نشان می‌دهد داده‌های تجربی را می‌توان به‌طور قابل پیش‌بینی با داده‌های مدل برای میزان رطوبت برازش داد (جدول ۹). محدوده تغییرات این پارامتر از۵/۳۴-۸/۵۸ متغیر بود. مدل این پارامتر معنادار شد ($P\leq ۰/۰۰۱$). رابطه‌ای که این مدل برای محتوای رطوبت ارائه داد فرمول (۱۱) است.

$$Mostuer\ content\ as\ (y) = 5.76 - 1.1x_3 + 1.61x_3^2 \quad (۱۱)$$

با توجه به این فرمول حاصل از آنووا مشاهده می‌شود که اثر خطی توان کاهش محتوای رطوبت و اثر درجه دوم توان روند افزایشی را نشان داد شکل(۴).

جدول ۸- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای پودر پاپریکا (مالتودکسترین، کنسانتره پروتئین شیر)، محتوای رطوبت پودر

| تیمار | فاکتور۱ مالتودکسترین(گرم) | فاکتور۲ کنسانتره پروتئین شیر (گرم) | فاکتور۳ توان(وات) | محتوای رطوبت (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۸۸۹ |
| ۲ | ۱۰ | ۰ | ۸۰۰ | ۶/۲۳۸ |
| ۳ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۹۷۸ |
| ۴ | ۱۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۶۵۶ |
| ۵ | ۵ | ۰ | ۶۰۰ | ۵/۸۴۳ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۴۰۰ | ۸/۴۸۵ |
| ۷ | ۰ | ۱۰ | ۸۰۰ | ۶/۲۳۶ |
| ۸ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۷۲۹ |
| ۹ | ۵ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۵/۸۴۹ |
| ۱۰ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۷۶۴ |
| ۱۱ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۳۴۵ |
| ۱۲ | ۵ | ۵ | ۸۰۰ | ۶/۳۰۳ |
| ۱۳ | ۵ | ۵ | ۴۰۰ | ۸/۴۹۹ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۰ | ۴۰۰ | ۸/۵۸۹ |
| ۱۵ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۵/۸۷۹ |




شکل۴- نمودار مکعبی اثرات متقابل متغیرهای فرآیند را بر محتوای رطوبت

جدول ۹- تجزیه‌وتحلیل واریانس برای تعیین برازش مدل، ضریب رگرسیون، ضریب تعیین ، و مقدار آزمون مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم پیش‌بینی‌شده برای پاسخ‌ها

| ضریب | عامل |
|---|---|
| محتوای رطوبت | |
| ۵/۷۶ | رهگیری |
| | اثر خطی |
| -۰/۱۱۵۶ | مالتودکسترین($X_1$) |
| ۰/۰۰۳۰ | کنسانتره پروتئین شیر($X_2$) |
| -۱/۱۰** | توان($X_3$) |
| | اثر متقابل |
| ۰/۰۵۱۲ | $X_1 X_2$ |
| -۰/۰۲۳۳ | $X_1X_3$ |
| -۰/۱۴۲۳ | $X_2X_3$ |
| | اثر درجه دوم |
| -۰/۰۲۰۸ | $X_1^2$ |
| ۰/۰۵۲۷ | $X_2^2$ |
| ۱/۶۱** | $X_3^2$ |
| ۰/۹۸۶۱ | ضریب همبستگی |
| ۳۹/۵۰ | تأثیر پارامتر |
| ۱۵/۹۴ | عدم برازش |
| ۰/۰۰۰۴** | برازش مدل |

**معناداری مدل را در سطح ۰/۰۱ درصد نشان می‌دهد.

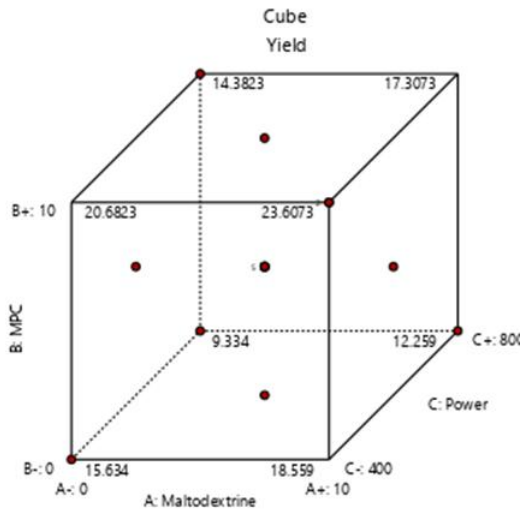
## بازده پودر

مقادیر میانگین کلی راندمان پودر ۲۷-۱۲/۷۴ درصد می‌باشد (جدول۱۰). همان‌طور که در جدول(۷)، مشاهده می‌شود، مدل برازش‌شده، خطی و معنی‌دار بوده و عدم برازش معنادار نیست. نتایج آنووا(۱۱)، نشان داد که ضریب تبیین مدل ۰/۶۹ بود که نشان می‌دهد داده‌های تجربی را می‌توان به‌طور قابل‌پیش‌بینی با داده‌های مدل برازش داد. مدل پیشنهادی برای راندمان پودر در فرمول (۱۲)، نمایش داده شده است. این پارامتر با افزایش کنسانتره پروتئین شیر افزایش و با افزایش توان کاهش یافت. شکل (۵) نمایانگر تغییرات است.

$$Yield\ as\ (y) = 16.47 + 2.52x_2 - 3.15x_3 \qquad ۱۲$$

جدول۱۰- طراحی تیمارها با روش سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل و مقادیر تجربی متغیرهای پاسخ برای پودر پاپریکا (مالتودکسترین، کنسانتره پروتئین شیر)،بازده پودر

| تیمار | فاکتور۱ مالتودکسترین (گرم) | فاکتور۲ کنسانتره پروتئین شیر (گرم) | فاکتور۳ توان (وات) | بازده (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۴/۴۷۵ |
| ۲ | ۱۰ | ۰ | ۸۰۰ | ۱۳/۵ |
| ۳ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۲/۷۴ |
| ۴ | ۱۰ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶/۵ |
| ۵ | ۵ | ۰ | ۶۰۰ | ۱۴/۵۰۵ |
| ۶ | ۰ | ۰ | ۴۰۰ | ۱۷/۲۵ |
| ۷ | ۰ | ۱۰ | ۸۰۰ | ۱۶/۵ |
| ۸ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۷/۹۷۵ |
| ۹ | ۵ | ۱۰ | ۶۰۰ | ۱۶/۹ |
| ۱۰ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶/۵۶ |
| ۱۱ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶/۵۵۵ |
| ۱۲ | ۵ | ۵ | ۸۰۰ | ۱۲/۹۷۵ |
| ۱۳ | ۵ | ۵ | ۴۰۰ | ۱۷/۶۲۵ |
| ۱۴ | ۱۰ | ۱۰ | ۴۰۰ | ۲۷ |
| ۱۵ | ۵ | ۵ | ۶۰۰ | ۱۶ |




شکل ۵- نمودار مکعبی اثرات متقابل متغیرهای فرآیند را بر بازده

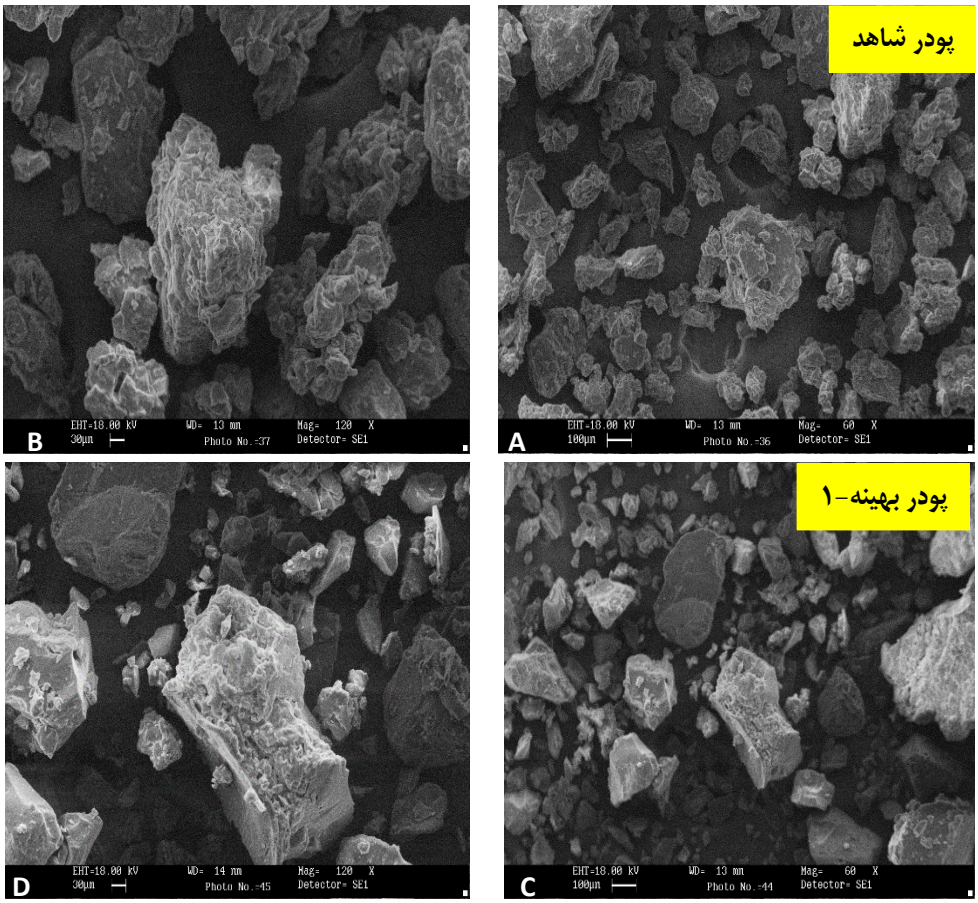
جدول ۱۱- تجزیه‌وتحلیل واریانس برای تعیین برازش مدل، ضریب رگرسیون، ضریب تعیین و مقدار آزمون مدل‌های چندجمله‌ای مرتبه دوم پیش‌بینی‌شده برای پاسخ‌ها

| ضریب | عامل |
|---|---|
| بازده | |
| ۱۶/۴۷ | رهگیری |
| | اثر خطی |
| ۱/۴۶ | $X_1$ (مالتودکسترین) |
| ۲/۵۲* | $X_2$ (کنسانتره پروتئین شیر) |
| -۳/۱۵** | $X_3$ (توان) |
| | اثر متقابل |
| - | $X_1 X_2$ |
| - | $X_1X_3$ |
| - | $X_2X_3$ |
| | اثر درجه دوم |
| - | $X_1^2$ |
| - | $X_2^2$ |
| - | $X_3^2$ |
| ۰/۶۹۸۶ | ضریب همبستگی |
| ۸/۵۰ | تأثیر پارامتر |
| ۱/۲۳ | عدم برازش |
| ۰/۰۰۳۳** | برازش مدل |

**معناداری مدل را در سطح ۰/۰۱ درصد نشان می‌دهد.

## تصویربرداری ریزساختار (میکروسکوپ الکترونی روبشی)

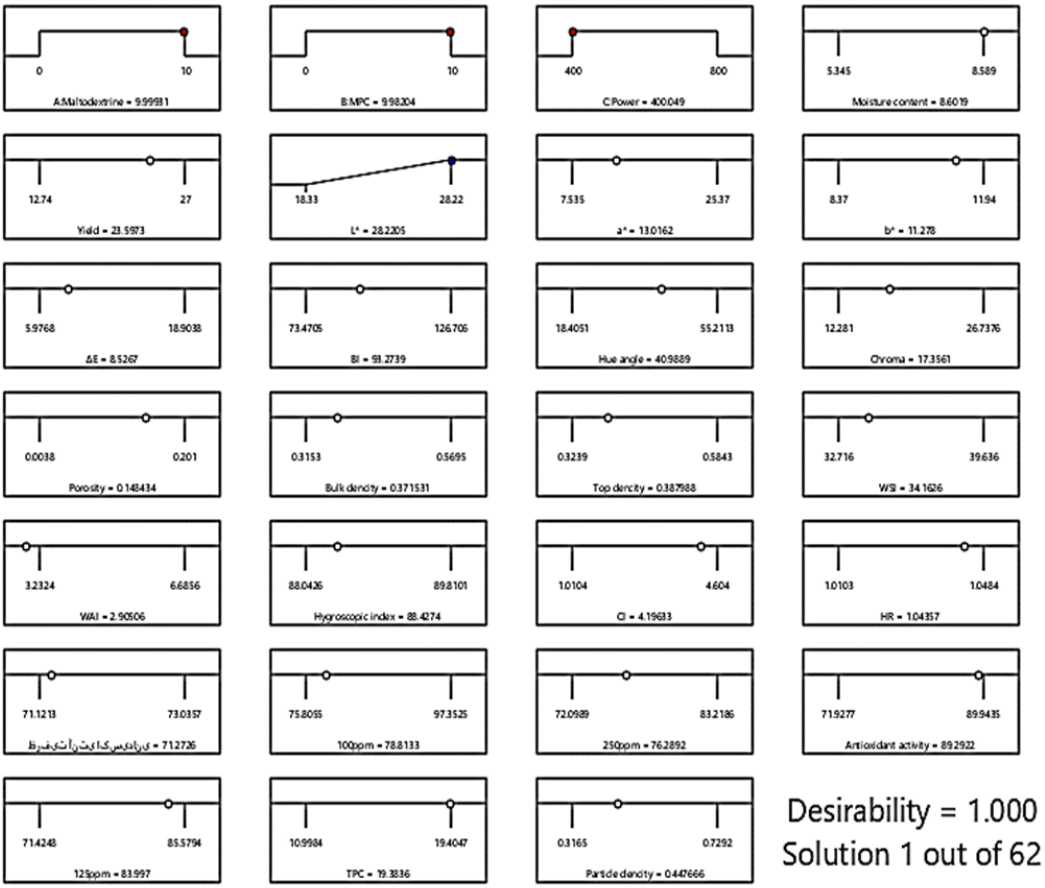
در تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای بهینه و شاهد، زبری سطحی و عدم یکنواختی برای همه نمونه‌ها وجود داشت (شکل ۵). نمونه‌های بهینه یک ساختار متخلخل و نامنظم نشان دادند. نمونه‌ها دارای حفره‌هایی در ساختار خود هستند که احتمالاً از فضاهای باقی‌مانده توسط حباب‌های هوای موجود در فوم‌های پاپریکا به‌دست‌آمده است که به تخلخل پودرهای پاپریکا کمک می‌کند. ساختار متخلخل فوم‌ها ارتباط مستقیمی با انتقال بیشتر حرارت و جرم دارد. تخلخل کمتر نمونه بهینه به دلیل وسعت کولاپس و ادغام حباب‌های مجاور است که باعث تخلخل کمتر و یکنواختی توزیع اندازه منافذ پودر می‌شود. همچنین تصاویر نشان داد که نمونه شاهد یکنواخت‌تر و دارای تخلخل کمتری می‌باشد. شرایط خشک کردن به‌شدت بر ساختار فوم‌مت تأثیر می‌گذارد به‌طوری‌که ساختار متخلخل در بین نمونه‌های خشک شده متفاوت است.




شکل۶- مورفولوژی پودر پاپریکا خشک شده با کف تولید شده در خشک‌کن همرفتی هوای گرم (A و B)خشک کردن کف مایکروویو (C و D)، هر میکروگراف پودرها را تحت میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۱۰۰ و ۳۰ میکرومتر نشان می‌دهد.

## معرفی بهینه

تابع مطلوبیت به‌طور گسترده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تعیین ترکیبی از متغیرها برای بهینه‌سازی پاسخ‌های متعدد و ارائه مطلوب‌ترین پاسخ‌ها استفاده می‌شود. برای به‌دست‌آمده حداکثر مطلوبیت، هدف موردنظر برای غلظت‌های متغیر در محدوده تعیین شد. بر اساس کمترین رطوبت، پایداری، و بیشترین روشنایی رنگ نمونه بهینه با میزان مطلوبیت ۱ یا ۱۰۰٪ برای خشک‌کردن فوم پاپریکا معرفی شد. با تفاسیر بیان‌شده تیمار (۱۴) ، به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب شد. آزمون‌های انطباق با همان شرایط تجربی برای بررسی صحت همبستگی‌های مدل ریاضی انجام شد. شرایط بهینه فوق به صورت تجربی برای تأیید کفایت مدل‌ها تأیید شد. نقطه بهینه پودر با ۱۰ درصد مالتودکسترین، ۱۰ درصد کنسانتره پروتئین شیر و توان مایکروویو ۴۰۰ وات جهت رسیدن به ویژگی‌های کیفی موردنظر پیشنهاد گردید(شکل ۷).




شکل ۷- پارامترهای بهینه برای متغیرها و مقادیر پیش‌بینی پاسخ‌ها

## بحث

در بحث تخلخل فوم، جزء حجمی هوا با دانسیته فوم رابطه عکس دارد، مقدار بالای هوای ورودی به فوم حین همزدن، باعث دانسیته کمتر شده و دانسیته کم، یعنی جزء حجمی هوای بالاتر در فوم و انبساط بیشتر فوم(۱۴). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان کرد که با افزایش عامل کف‌زا به دلیل اینکه در حین تولید فوم هوای بیشتری در بین مولکول‌های پروتئین به دام میافتد ساختار فوم منسجم‌تر می‌شود که منجر به افزایش تخلخل ظاهری فوم می‌شود. این تحقیق با مطالعه عزیزپور و همکاران مطابقت دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقادیر بیشتر عامل کف کننده به حفظ ساختار کف در طول فرآیند با افزایش پایداری کف کمک می‌کند. درنتیجه، تخلخل توده افزایش می‌یابد(۱و۳). در خصوص پایداری فوم، کف‌پذیری عمدتاً تحت تأثیر اندازه مولکولی و ساختار پروتئین قرار می‌گیرد به‌طوری‌که پروتئین‌های کوچک و انعطاف‌پذیر به‌دلیل کاهش زودهنگام و سریع کشش سطحی، ظرفیت کف‌زایی بالایی دارند(۲۰)، به دست آوردن ساختار پایدار فوم هدف اصلی خشک کردن فوم مت است: اطمینان از پایداری فیزیکی به‌منظور دستیابی به سرعت خشک شدن بالاتر و تولید آسان‌تر مواد خشک شده الزامی است. اگر فوم بی‌ثبات شود یا مایع بیش‌ازحد آزاد شود، زمان خشک شدن افزایش می‌یابد و کیفیت محصول کاهش می‌یابد. پایداری فوم تحت تأثیر دانسیته، ضخامت و نفوذپذیری رابط ماده کف کننده سیال است. عوامل مهم دیگر، توزیع اندازه حباب‌های هوا و کشش سطحی است. با این حال، ماهیت و غلظت عامل مورد استفاده، صفات اصلی مؤثر بر این ویژگی است(۱۴). کنسانتره پروتئین شیر در فاز آبی حرکت می‌کند و به‌طور خود به خود توسط سطح مشترک گاز- مایع جذب می‌شود، جایی که فیلم ویسکوالاستیک متعاقباً تشکیل می‌شود. نتیجه جذب

پروتئین، کاهش کشش سطحی است که ظرفیت کف کردن و توانایی محصور کردن و حفظ هوای به دام افتاده را بهبود می‌بخشد(۲۵). همچنین افزایش غلظت پروتئین باعث افزایش لایه ضخامت سطحی می‌شود که به پوشاندن و تثبیت حباب‌ها کمک می‌کند. تشکیل حباب‌های متخلخل می‌تواند سطح در معرض هوا را افزایش دهد و درنتیجه سرعت خشک شدن را افزایش دهد(۱۶). رنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در مواد است. تأثیر زیادی در میزان مطلوبیت و قیمت نهایی آن دارد. عوامل زیادی بر رنگ محصولات نهایی تأثیر می‌گذارند، مانند تنوع میوه، رسیده بودن آن، و تأثیر روش‌های خشک کردن(۲۴). راجکومار و همکاران (۲۰۰۷) مقادیر رنگی پالپ انبه فومت تیمار شده با آلبومین و متیل‌سلولز را به ترتیب ۵۹/۴، ۱۴/۲ و ۵۵/۳ گزارش کردند و کاهش کمی در رنگ پالپ به دلیل ادغام آلبومن و متیل سلولز وجود داشت و مقدار $b^*$ در مقایسه با پالپ بدون فوم کاهش یافت(۲۱). میزان رطوبت پودر رابطه مستقیمی با پایداری آن دارد. محتوای رطوبت یک غذا به شدت با پایداری آن مرتبط است، با این حال کاهش فعالیت آبی از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند، سرعت واکنش‌های آنزیمی را کاهش می‌دهد و قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی را به تأخیر می‌اندازد(۱۴). رطوبت تعیین‌کنندهٔ جریان‌پذیری، چسبناکی و پایداری پودر به دلیل تأثیر آن بر روی رفتار انتقال شیشه‌ای و کریستالیزاسیون می‌باشد (۴). محتوای رطوبت نشان‌دهنده ترکیب آب در یک سیستم غذایی است، درحالی‌که فعالیت آبی، فعالیت آب آزاد که مسئول هر گونه واکنش بیوشیمیایی است و شاخصی برای تعیین ماندگاری پودر تولید شده است را در یک سیستم غذایی اندازه‌گیری می‌کند و عمدتاً به در دسترس بودن آب برای استفاده در واکنش‌های شیمیایی و رشد میکروبی مربوط می‌شود. علاوه بر این، آب به‌عنوان یک نرم‌کننده عمل می‌کند و با افزایش رطوبت، دمای انتقال شیشه‌ای و نقطه چسبندگی پودر را کاهش می‌دهد(۲۴). بنابراین، رطوبت کمتر پودر می‌تواند نشان‌دهنده دسترسی کمتر آب برای مشارکت در واکنش‌های شیمیایی و رشد میکروبی باشد، بنابراین محصول نهایی می‌تواند چسبندگی کمتری داشته باشد که نشان‌دهنده ظرفیت آبرسانی خوب است و به‌نوبه خود سطح موجود را گسترش می‌دهد (۱۲). استفاده از فومت قبل از خشک‌کردن می‌تواند به تولید پودرهایی با رطوبت کم کمک کند. در طول دوره‌های نگهداری طولانی، میزان رطوبت محصول تا حدی افزایش می‌یابد (۱۲). نگ و همکاران (۲۰۱۸)، نشان دادند نمونه کنترل بالاترین میزان رطوبت را دارد و خشک شدن آن در مقایسه با سایر نمونه‌ها ۲ ساعت بیشتر طول کشید(۱۶). بنابراین، چغندر خام در مقایسه با چغندر اضافه‌شده با عوامل کف‌کننده و مالتودکسترین، به زمان بیشتری برای خشک شدن نیاز داشت. این روند مشابه با آزمایش‌های انجام شده توسط راجکومار و همکاران بود که در آن کاهش رطوبت در فوم انبه نسبت به تفاله انبه بدون فوم بیشتر بود (۲۱). در مطالعه دهقانیا و همکاران (۲۰۱۸)، رطوبت پودر با افزایش غلظت اووالبومین ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت(۱۲). در خصوص بازده، در صنایع تبدیل موادغذایی و تولید پودر از محلول‌های متفاوت، مهم‌ترین شاخص کاربردی و صنعتی، راندمان تولید پودر از محلول می‌باشد.با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که هر چه درصد مواد جامد(عوامل فومساز) بیشتر و دمای بالاتر باشد بازده نیز افزایش می‌یابد. در مطالعات دیگر افزایش دمای هوای ورودی برای کنسانتره سه نوع میوه متفاوت منجر به افزایش راندمان تولید پودر شده است(۱۵)، این موضوع در مطالعات سایر محققین نیز، نشان داده شده است(۱۳). ریزساختار ذرات عامل مهمی است که پایداری و جریان‌پذیری پودر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل، اندازه و توزیع اندازه ذرات نقش مهمی در فراوری، جابه‌جایی و ماندگاری پودرهای غذایی ایفا می‌کنند و به شدت تحت تأثیر فرایند خشک کردن، شرایط و نوع پودر قرار می‌گیرند. سطح ذره بسته به فرایندهای ساخت پودر می‌تواند چروکیده، چین‌خورده، ترک‌خورده و دندانه‌دار باشد (۴). از طریق ارزیابی ریزساختار غذا، می‌توان جزئیات هر جزء (آب، نشاسته، کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، قندها، پروتئین‌ها، لیپیدها و نمک‌ها) را در سطح میکروسکوپی و اتصالات آن‌ها در

داخل سلول در سطح مولکولی ارزیابی کرد. وقتی یک غذا تحت تیمار یا فرآیندهای مختلف قرار می‌گیرد، ریزساختار آن می‌تواند برای توسعه محصولات جدید حفظ یا از بین برود (۱۴). بررسی ریزساختار می‌تواند به درک تغییرات محصول در طول فرآوری کمک کند و همچنین ممکن است درک مکانیسم‌ها و تغییرات در عوامل کیفیت را بهبود بخشد. پایداری مکانیکی و حرارتی فوم برای خشک‌کردن فوم‌مت ضروری است. فوم‌های پایدار ساختار متخلخل خود را حفظ می‌کنند که به بهبود خواص بازسازی محصول خشک شده فوم‌مت کمک می‌کند، در حالی که فوم‌های ناپایدار به سختی خشک می‌شوند و رنگ، بافت، طعم و ارزش غذایی ضعیفی دارند (۲۴).

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پالپ پاپریکا تحت تأثیر مالتودکسترین وکنسانتره پروتئین شیر به روش کف پوشی با استفاده از مایکروویو خشک شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و مورفولوژی پودر پاپریکا به‌طور چشمگیری تحت تأثیر متغیرهای مورد بررسی قرار گرفتند. به‌طوریکه با افزایش کنسانتره پروتئین شیر شاخص های رنگ فوم(b*, a*) و تخلخل فوم به میزان قابل توجهی افزایش یافتند. در فرایند خشک کردن با بالا رفتن قدرت مایکروویو پارامترهای بازده، محتوای فنل، ظرفیت آنتی اکسیدانی و محتوای رطوبت روند افزایشی داشتند. از تفاسیر می توان نتیجه گرفت که کنسانتره پروتئین شیر با ماهیت پروتئینی که دارد در هم زدن و تشکیل ساختار فوم بسیار موثر بوده و با ایجاد کشش سطحی مانع از خروخ هوا از فوم شده و پایداری و تخلخل فوم افزایش پیدا کرد و این ویژگی باعث شد که پودر سبک‌تر با حجم بیشتر تولید شود. استفاده از مایکروویو کاهش سرعت خشک کردن را بدنبال دارد که در محصول تولیدی ساختاری یکنواخت و پوسته پوسته با سطوح نرمتر ایجاد می‌کند. اثرات این پدیده را می توان در افزایش حلالیت پودر و تخلخل آن مشاهده کرد. با توجه به بررسی های صورت گرفته و بهینه سازی پارامترها، بهترین عملکرد در ۱۰ ٪ مالتودکسترین و ۱۰٪ کنسانتره پروتئین شیر و توان ۴۰۰ وات مایکروویو حاصل شد.

## تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافعی ندارند.

## References


1. Abbasi E, Azizpour M. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. LWT-Food Science and Technology. 2016;68:105-10.
2. Alami M, Shirmohammadi, M, Maghsoudloo Y, Khomeyri M. Influence of Spray Drying Process Conditions on the Physical, Functional Properties and Production Yield of Acid Whey Powders Journal of Innovation in Food Science and Technology. 2022;14(2), 93-108. [In persian]
3. Azizpour M, Mohebbi M, Khodaparast MH. Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. Innovative food science & emerging technologies. 2016;34:122-6.
4. Bahriye G, Dadashi S, Dehghannya J, Ghaffari H. Study of the foam thickness effect on the effective moisture diffusion coefficient and drying kinetics of red beetroot by foam-mat method and evaluation the qualitative and functional characteristics of product. Journal of food science and technology (Iran). 2020;16(96):53-64. [In persian]
5. Benković M, Pižeta M, Tušek AJ, Jurina T, Kljusurić JG, Valinger D. Optimization of the foam mat drying process for production of cocoa powder enriched with peppermint extract. Lwt. 2019;115:108440.
6. Brar AS, Kaur P, Kaur G, Subramanian J, Kumar D, Singh A. Optimization of process parameters for foam-mat drying of peaches. International journal of fruit science. 2020;20(3):S1495-518.
7. Buckenhuskes HJ. Actual requirements on paprika powder for the food industry. In9th Meeting on Genetics and Breeding of Capsicum and Eggplant, Antalya, Turkey 2001 Apr 9.pp 197–201.

8. Chaux-Gutiérrez AM, Pérez-Monterroza EJ, Telis VR, Mauro MA. The physical and morphological characteristics of mango powder (*Mangifera indica* L. cv Tommy Atkins) produced by foam mat drying. Food biophysics. 2017 Mar;12:69-77.
9. 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.
10. Kadam DM, Rai DR, Patil RT, Wilson RA, Kaur S, Kumar R. Quality of fresh and stored foam mat dried Mandarin powder. International journal of food science & technology. 2011;46(4):793-9.
11. Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B, Ghaffari H. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. International Journal of Thermal Sciences. 2019; 135:30-43.
12 Dehghannya J, Pourahmad M, Ghanbarzadeh B, Ghaffari H. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. Journal of Food Engineering. 2018;238:164-77.
13. Elshiemy S, Soliman I, Abdelaleem M, Elbassiony K. Antioxidant and antibacterial activity of gamma irradiated red Beet (*Beta vulgaris* L.) Leaves and Roots. Journal of Nuclear Technology in applied science. 2019;7:33-50.
14. Franco TS, Perussello CA, Ellendersen LN, Masson ML. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. LWT-Food Science and Technology. 2016;66:503-13.
15. Matsufuji H, Nakamura H, Chino M, Takeda M. Antioxidant activity of capsanthin and the fatty acid esters in paprika (*Capsicum annuum*). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 1998;46(9):3468-72.
16. Ng ML, Sulaiman R. Development of beetroot (Beta vulgaris) powder using foam mat drying. Lwt. 2018;88:80-6.
17. Özcan MM, Al Juhaimi F, Ahmed IA, Uslu N, Babiker EE, Ghafoor K. Effect of microwave and oven drying processes on antioxidant activity, total phenol and phenolic compounds of kiwi and pepino fruits. Journal of food science and technology. 2020;57:233-42.
18. Ozcelik M, Ambros S, Heigl A, Dachmann E, Kulozik U. Impact of hydrocolloid addition and microwave processing condition on drying behavior of foamed raspberry puree. Journal of Food Engineering. 2019;240:83-91.
19. Peighambardoust SH, Sarabandi KH. Effect of spray drying conditions on physicochemical, functional properties and production yield of malt extract powder. Journal of Food Research. 2017;27(2):75-90 [In persian].
20. Qadri OS, Srivastava AK. Microwave-assisted foam mat drying of guava pulp: Drying kinetics and effect on quality attributes. Journal of food process engineering. 2017 Feb;40(1):e12295.
21. Rajkumar P, Kailappan R, Viswanathan RG, Raghavan GS. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. Journal of Food Engineering. 2007;79(4):1452-9.
22. Sangamithra A, Sivakumar V, Kannan K, John SG. Foam-mat drying of muskmelon. International journal of food engineering. 2015;11(1):127-37.
24. Shaari NA, Sulaiman R, Rahman RA, Bakar J. Production of pineapple fruit (Ananas comosus) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. Journal of Food processing and Preservation. 2018 Feb;42(2):e13467.
25. Topuz A, Feng H, Kushad M. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. LWT-Food Science and Technology. 2009;42(10):1667-73.
26. Chandrasekar V, Gabriela JS, Kannan K, Sangamithra A. Effect of foaming agent concentration and drying temperature on physiochemical and antimicrobial properties of foam mat dried powder. Asian Journal of Dairy and Food Research. 2015;34(1):39-43.

# Drying of red bell pepper to produce paprika powder by coating process using maltodextrin and milk protein concentrate

**Somayeh Sanjari[1], Nafiseh Jahanbakhshian[2]*, Sediqeh Soleimanifard[3], Maryam Khakbaz Heshmati[4], Zahra Beig Mohammadi[1]**

1- Department of Food Science and Technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, 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, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author: njahanbakhshian@yahoo.com

Received: 17/11/2024, Accepted: 22/12/2024

## Abstract

In this research, some physicochemical characteristics of paprika powder were investigated by floor drying method. The effect of three independent variables of concentration of milk protein concentrate and maltodextrin as foaming agent in the concentration range (0-10%) and microwave power intensity in the range of (400-800) watts on some physical characteristics of foam and powder including color, stability, porosity, moisture content, yield and morphology were determined. Optimum process was determined using response surface method. With the increase of maltodextrin in the foam, the index L*, b* ($P \leq 0.05$) increased. The range of changes was (21.12-21.482) L* and (10.4-819.124) b*. Increasing the milk protein concentration linearly increased the porosity of the foam so that its quadratic effect showed the decrease of this parameter. The range of foam porosity changes was 0.096-0.4694%. By increasing the concentration of milk protein concentrate in the foam, stability and color parameters a*, b* increased. The results of the evaluation of the powder showed that with the increase in the concentration of milk protein concentrate, the yield was significant at the level ($P \leq 0.01$) and followed the increase. In the event that the effect of power is to reduce the yield. Scanning electron microscope images show that the optimal sample has finer particles and smooth, softer and scaly surfaces. Examining the results showed that the powder with 10% maltodextrin and 10% milk protein concentrate in 400W microwave power can be introduced as the optimal sample.

**Keywords:** Paprika powder, Microwave, Milk protein concentrate, Maltodextrin, Foam mat