

بهینه‌سازی متغیرهای فرمولاسیون و شرایط فرایند اکستروژن محصول اسنک حجیم حاوی آرد کنجاله بنه

بهنام فیوضی^۱، محمدجواد وریدی^{۲*}، الناز میلانی^۳، فخری شهیدی^۴، محمدحسین حداد خداپرست^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* نویسنده مسئول (mjvaridi@um.ac.ir)

۳- استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی، سازمان مرکزی جهاددانشگاهی، مشهد، ایران

۴- استاد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۰۴

واژه‌های کلیدی

اکستروژن

بافت‌سنجی

چگالی توده

خصوصیات عملکردی

نسبت انبساط

در این تحقیق، از رویه سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی شرایط اکستروژن استفاده شد. متغیرهای مستقل فرایند شامل آرد کنجاله بنه (PDBC) که به‌طور جزئی چربی‌گیری شده است، PDBC (۳۰-۱۰ درصد)، میزان رطوبت (۱۸-۱۲ درصد)، دمای اکستروژن (۱۸۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت چرخش ماردون اکسترودر (۲۲۰-۱۲۰ دور در دقیقه) بود. تأثیر متغیرهای مستقل بر برخی خصوصیات فیزیکی و عملکردی مورد بررسی قرار گرفت، که شامل چگالی توده، نسبت انبساط، سختی بافت، شاخص جذب آب، شاخص حلالیت در آب و شاخص جذب چربی بودند. نتایج نشان داد که افزایش PDBC خصوصیات فیزیکی و عملکردی اسنک حجیم‌شده را بهبود بخشید. چگالی توده با افزایش PDBC به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. جایگزینی بخشی از آرد ذرت توسط PDBC سبب افزایش مقدار فیبر گردیده و میانگین اندازه سلول‌های هوایی کاهش یافت و حفره‌ها در دیواره سلولی ایجاد شدند. به‌علاوه، با افزایش میزان PDBC سختی بافت نیز افزایش یافت. با افزودن PDBC شاخص جذب آب و شاخص انحلال در آب به‌ترتیب کاهش و افزایش یافتند. شاخص جذب روغن نیز با افزایش PDBC و دمای اکسترودر افزایش یافت. از بین متغیرهای مستقل مورد مطالعه، PDBC معنی‌دارترین تأثیر را بر تمامی پاسخ‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد داشت. شرایط بهینه برای تولید اسنک حاوی PDBC شامل میزان رطوبت ۱۷/۴۵ درصد، PDBC ۲۱/۱۴ درصد، سرعت چرخش ماردون ۱۶۰ دور در دقیقه و درجه حرارت ۱۳۳/۲ درجه سانتی‌گراد بود.

مقدمه

پلیمر و مواد غذایی مطرح است. در طی فرایند اکستروژن مواد غذایی، حرارت و انرژی برشی سبب تغییرات ساختاری، شیمیایی و تغذیه‌ای نظیر ژلاتیناسیون، دناتوراسیون پروتئین، اکسیداسیون لیپید، کاهش ویتامین‌ها، فاکتورهای ضدتغذیه‌ای و فیتوکمیکال‌ها^۲، تشکیل عطر و طعم، افزایش دسترسی به مواد معدنی و فیبرهای رژیمی محلول می‌گردد

اسنک‌ها^۱ به‌عنوان میان‌وعده، به‌دلیل خصوصیات بافتی و نیز دارابودن مواد طعمی و رنگ‌های جذاب سبب افزایش تمایل مصرف‌کنندگان گردیده است (Capriles *et al.*, 2009).

اکستروژن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های قرن بیستم در بین صنایع مختلف از جمله صنایع

² Phytochemicals

¹ Snacks

می‌باشد (Desai et al., 1999; Gopalakrishhna, 2007).

تاکنون مطالعه‌های بسیاری پیرامون تولید محصولات اکستروژده انجام شده است (Larrea et al., 2005; Tahvonon et al., 1998; Ng et al., 1999; Mendonca et al., 2000; Obatolu et al., 2006; Altan et al., 2008a,b; Yagci & Gogus, 2008; Khanal et al., 2009; Omohimi et al., 2017; Hashemi et al., 2014).

هدف از این پژوهش بهینه‌سازی فرایند اکستروژن با استفاده از روش سطح پاسخ و بررسی اثر ویژگی‌های مواد ورودی (نسبت بنه به ذرت و مقدار رطوبت) و شرایط اکستروژن (درجه‌حرارت و سرعت چرخش ماردون) بر ارزیابی ماکروساختار (چگالی توده، نسبت انبساط)، ویژگی‌های عملکردی (شاخص جذب آب، شاخص حلالیت در آب، شاخص جذب روغن) و بافت‌سنجی (سختی) محصول اسنک حجیم‌شده بنه بر پایه ذرت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل بنه و بلغور ذرت بود. بنه تازه گونه آتلانتیکا از استان خراسان رضوی، باغات شهرستان خواف و بلغور ذرت از فروشگاه عرضه محصولات کشاورزی در مشهد تهیه شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

بنه تازه گونه آتلانتیکا بعد از خریداری، بوجاری شد و تا زمان استفاده در سردخانه با دمای زیر صفر (۱۸- درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. سپس بنه توسط دستگاه پرس سرد (مدل Screw Press KK40/F، Universal، Circle Energy، ساخت آلمان) روغن‌گیری و صاف شد. کنجاله حاصل به وسیله آسیاب چکشی (مدل LP-187 Hammer Mill، ساخت آمریکا)، آسیاب و از الک (مش ۴۰) عبور داده شد. آنالیز ترکیبات شیمیایی کنجاله بنه در جدول (۱) ارائه شده است. برای تعیین ترکیب شیمیایی شامل خاکستر، پروتئین خام، چربی خام از روش AOAC (۲۰۰۰) استفاده شد. مقادیر فیبر نامحلول در شوینده خنثی (NDF^{۱۲}) و فیبر نامحلول در شوینده اسیدی (ADF^{۱۳}) به روش Van Soest و همکاران (۱۹۹۱) اندازه‌گیری شد.

(Riaz et al., 2009).

باتوجه به نقش مواد اولیه مصرفی در افزایش ارزش غذایی محصولات اکستروژده و کاهش سوءتغذیه، محققین توجه خود را به تولید فراورده‌هایی با خواص سلامتی‌بخش و استفاده از فراورده‌های فرعی^۳ کارخانه‌های مواد غذایی نظیر تفاله میوه‌ها، سبزیجات، کنجاله دانه‌های روغنی و مغزهای خوراکی به دلیل غنی بودن این ترکیبات از جهت فیبرهای غذایی، آنتی‌اکسیدان‌ها، اسیدهای چرب ضروری، ترکیبات ضد میکروبی، ویتامین‌ها و مواد معدنی و نقش آنها به لحاظ خواص تغذیه‌ای در فرمولاسیون اشاره نموده‌اند (Yagci et al., 2009).

پسته وحشی^۴ متعلق به خانواده آناکاردیاسه^۵ و دارای دوگونه مهم خنجوک^۶ و آتلانتیکا^۷ می‌باشد (Saffarzadeh et al., 1999). پسته وحشی گونه آتلانتیکا که در ایران به نام بنه شناخته می‌شود از ۳ قسمت مغز (۲۵ درصد)، پوسته چوبی سفت (۵۱ درصد) و پوسته خارجی نرم (۲۴ درصد) تشکیل شده است و میزان روغن مغز آن ۶۰ درصد می‌باشد. اسیدهای پالمیتیک^۸ (۱۰/۸ درصد، ۱۶:۰) و استئاریک^۹ (۳ درصد، ۱۸:۰) اسیدهای چرب اشباع اصلی آن بشمار می‌روند و اسیدهای اولئیک^{۱۰} (۴۹ درصد، ۱۸:۱) و لینولئیک^{۱۱} (۳۳ درصد، ۱۸:۲) اسیدهای چرب غیراشباع اصلی هستند. روغن هسته بنه غنی از اسیدلینولئیک و غلظت این اسید در پوسته خارجی کمتر است. اسیداولئیک در برابر تخریب اکسایشی در درجه‌حرارت‌های بالا و نیز درجه‌حرارت‌های معمول نگهداری پایدار است (Warner & Knowlton, 1997). روغن مغز بنه به دلیل مقادیر بالای ترکیبات توکوفرولی (۸۱۸/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و فنلی (۸۱/۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از پایداری اکسایشی بسیار بالایی برخوردار است (Farhoosh & Tavakoli, 2008).

کنجاله مغزها، فراورده‌های جانبی بوده که بعد از استخراج روغن به دست آمده و به‌طور متوسط حاوی ۴۵-۶۰ درصد پروتئین، ۲۲-۳۰ درصد کربوهیدرات، ۷/۵-۳/۸ درصد فیبرخام و ۴-۶ درصد مواد معدنی

³ By-Product

⁴ Wild pistachio

⁵ Anacardiace

⁶ Pistacia khinjuk

⁷ Pistacia atlantica

⁸ Palmitic acids

⁹ Stearic acids

¹⁰ Oleic acids

¹¹ Linoleic acids

¹² Neutral Detergent Fiber

¹³ Acid Detergent Fiber

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی PDBC

| گونه | ماده خشک (درصد) | پروتئین خام (درصد) | چربی خام (درصد) | خاکستر (درصد) | فیبر نامحلول در شوینده اسیدی (درصد) | فیبر نامحلول در شوینده خنثی (درصد) |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| بنه (پسته) وحشی گونه آتلاتیکا) | ۹۵/۰۲ ± ۰/۲۴ | ۲۵/۸۹ ± ۰/۲۶ | ۸/۵۳ ± ۰/۱۷ | ۵/۵۳ ± ۰/۰۶ | ۱۵/۲۸ ± ۰/۳۱ | ۳۹/۴۲ ± ۰/۳۷ |

(WSI^۴)، بودند. سپس ساختار میکروسکوپی توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۵) مدل (LEO1450VP، ساخت آلمان) مورد بررسی قرار گرفت.

ارزیابی ماکروساختار اسنک

چگالی توده

برای اندازه‌گیری چگالی توده از روش جابجایی در ارزن استفاده شد. ابتدا با استفاده از یک استوانه مدرج ۵۰۰ میلی‌لیتری چگالی توده ارزن تعیین شد بدین‌صورت که مقداری ارزن با جرم معین تا یک حجم ثابت در استوانه پر شد. در مرحله بعد ۵ عدد اسنک از هر تیمار ابتدا توزین و سپس در داخل استوانه قرار گرفت. سپس فضای خالی بین اسنک‌ها با ارزن پر شد. جرم ارزن اضافه‌شده به استوانه از طریق رابطه (۱) محاسبه گردید:

رابطه (۱)

جرم ۵ عدد اسنک - جرم استوانه - جرم کل = جرم ارزن

در مرحله بعد حجم ارزن موجود در استوانه و حجم ۵ عدد اسنک با استفاده از رابط‌های (۲) و (۳) تعیین شد:

رابطه (۲)

$$\text{جرم ارزن} = \frac{\text{چگالی توده ارزن}}{\text{حجم ارزن}}$$

رابطه (۳)

حجم ارزن - حجم کل = حجم ۵ عدد اسنک

درنهایت چگالی توده اسنک از تقسیم جرم اسنک بر حجم آن محاسبه شد (Stojceska et al., 2008).

PDBC^۱ با نسبت‌های ۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰ و ۳۰:۷۰ با بلغور ذرت که رطوبت آنها قبلاً توسط ترازوی رطوبت‌سنج مادون‌قرمز دیجیتالی (مدل MB90، Ohaus، ساخت سوئیس) اندازه‌گیری شده بود، مخلوط گردید. رطوبت مخلوط نمونه‌ها بین ۱۸-۱۲ درصد در نظر گرفته شد. پس از حدود ۱۵ دقیقه مخلوط کردن، نمونه به دستگاه اکسترودر جهت تولید اسنک منتقل شد.

به‌منظور فرمولاسیون و تهیه نمونه‌های اسنک از اکسترودر دو ماردرنه موجود در پایلوت اکستروژن پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی جهاد دانشگاهی مشهد (مدل DS56، Jinan Saxin، ساخت چین) استفاده شد. میزان ورودی مواد به اکسترودر ۴ کیلوگرم بر ساعت بود و مشخصات دستگاه عبارتند از طول ماردون: ۹۰ سانتی‌متر، قطر ماردون: ۶ سانتی‌متر، نسبت طول به قطر (L/D) ۱۵، نوع قالب: فولادی و جهت چرخش ماردون، ساعتگرد.

محصول تولیدی به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط (۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد) خنک‌شده و سپس در بسته‌بندی پلاستیکی از جنس پلی‌اتیلن تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شد. به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید اسنک حجیم‌شده، متغیرهای فرمول شامل رطوبت ورودی (۱۸-۱۲ درصد) و سطوح افزودن PDBC (۱۰-۳۰ درصد) و متغیرهای فرایندی شامل سرعت چرخش ماردون مارپیچ (۲۲۰-۱۲۰ دور در دقیقه) و درجه حرارت پخت (۱۸۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) تعیین شدند. متغیرهای وابسته (پاسخ) در RSM شامل سختی بافت، نسبت انبساط، چگالی توده، ویژگی‌های عملکردی شاخص جذب آب (WAI^۲)، شاخص جذب روغن (OAI^۳) و شاخص انحلال در آب

^۱ Partially-Defatted Bene Cake

^۲ Water Absorb Index

^۳ Oil Absorbition Index

^۴ Water Solubility Index

^۵ Scanning Electron Microscopy

نسبت انبساط^۱

از هر تیمار ۱۰ نمونه به‌طور تصادفی انتخاب و سپس با استفاده از میکرومتر دیجیتالی (Mitutoyo)، ساخت ژاپن) قطر هر نمونه اسنک اندازه‌گیری شد. در نهایت میانگین قطر اسنک‌های مربوط به هر تیمار مشخص شد. نسبت انبساط که نشان‌دهنده میزان انبساط نمونه می‌باشد از طریق تقسیم قطر نمونه بر قطر قالب اکسترودر (۳ میلی‌متر) به‌دست آمد (Rayas *et al.*, 1998).

آزمون بافت‌سنجی

برای اندازه‌گیری سختی محصول از دستگاه بافت سنج (TAXT plus، ساخت کانادا) استفاده شد. روند آزمایش براساس سرعت نفوذ پروب استوانه‌ای شکل با قطر ۲ میلی‌متر به داخل هر نمونه اسنک منفرد با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر در ثانیه و اندازه‌گیری حداکثر نیروی لازم (برحسب نیوتن) جهت نفوذ ۸ میلی‌متری (عمق نفوذ) این پروب در بافت محصول بود. از هر تیمار تعداد ۱۰ نمونه اسنک به‌طور تصادفی انتخاب شد تا با استفاده از تکرار بالا امکان خطای اندازه‌گیری کاهش یابد. در نهایت بیشینه نیروی وارد شده برحسب نیوتن توسط دستگاه بافت‌سنج (TX plus، ساخت انگلستان) به‌عنوان سختی اعلام گردید (Stojceska *et al.*, 2008).

ویژگی‌های عملکردی

شاخص جذب آب و حلالیت در آب

شاخص جذب آب از طریق سانتیفریوژ کردن و با استفاده از روش Anderson و همکاران (۱۹۶۹) اندازه‌گیری شد. ۱ گرم از نمونه‌های اسنک، به ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر، درون لوله‌های سانتیفریوژ که از قبل وزن شده‌اند، افزوده گردید؛ آنگاه به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از شیکر هم‌زده‌شده، سپس با استفاده از سانتیفریوژ (Sigma، D37520 Osterode am Harz، ساخت آلمان) به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سانتیفریوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه جداسازی انجام گردید. سپس محلول رویی را به درون پتری‌دیش انتقال داده و ژل باقی‌مانده را وزن

نموده و خصوصیت جذب آب به‌وسیله رابطه (۴) محاسبه شد:

رابطه (۴)

وزن نمونه/وزن ژل باقی‌مانده = شاخص جذب آب

جهت اندازه‌گیری شاخص حلالیت در آب، مایع رویی حاصل از عملیات سانتیفریوژ به درون پتری‌دیش (توزین‌شده از قبل) منتقل سپس به درون آون انتقال یافت و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد. در پایان مقدار ماده خشک باقی‌مانده توزین شد و با استفاده از رابطه (۵) حلالیت در آب محاسبه گردید:

رابطه (۵)

= شاخص حلالیت در آب

وزن نمونه خشک‌شده/وزن ماده خشک حاصل از آون‌گذاری

شاخص جذب روغن

شاخص جذب روغن با مخلوط کردن ۱ گرم نمونه با ۱۰ میلی‌لیتر روغن ذرت (چگالی ۰/۹۲ گرم براساس مترمکعب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) درون یک لوله ۱۵ میلی‌لیتری سانتیفریوژ انجام گردید. سپس نمونه‌ها با ورتکس به مدت ۱ دقیقه به منظور یکنواختی و اختلاط کامل با روغن هم‌زده شدند و پس از آن به مدت ۳۰ دقیقه نگهداری شدند. آنگاه به مدت ۱۵ دقیقه در سانتیفریوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه روغن جدا شده با پیپت خارج شده و به منظور خروج کامل روغن اضافی لوله‌ها به مدت ۲۰ دقیقه به صورت معکوس قرار گرفتند و پس از آن نمونه‌ها مجدداً توزین شدند. ظرفیت جذب آب و روغن به صورت گرم آب یا گرم روغن باندشده به‌وسیله یک گرم از نمونه بر مبنای وزن خشک گزارش گردید (Anderson *et al.*, 1969) (رابطه ۶).

رابطه (۶)

= شاخص جذب روغن

وزن نمونه برحسب گرم/حجم روغن جذب‌شده برحسب میلی‌لیتر

طرح آماری و تجزیه و تحلیل داده‌ها جهت بهینه‌سازی

شرایط تولید اسنک

در این تحقیق از طرح مرکب مرکزی متمرکز شده

^۱ Expansion Ratio

۱۸-۱۲ درصد (وزنی/وزنی) سطوح افزودن PDBC ۳۰-۱۰ درصد (وزنی/وزنی)، سرعت چرخش ماردون ماریچ ۲۲۰-۱۲۰ (دور در دقیقه) و درجه حرارت پخت ۱۸۰-۱۲۰ (درجه سانتی‌گراد) بود. پس از برازش مدل درجه دوم کامل^۲، رابطه به دست آمده در معرض الگوریتم حذف پس‌خور^۳ قرار گرفتند. با استفاده از الگوریتم مذکور، جمله‌های مدل که از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نبودند، حذف شدند و در نتیجه تعداد جمله‌های مدل کاهش داده شد. شکل‌های سه‌بُعدی (منحنی‌های سطح پاسخ) جهت بررسی رابطه میان پاسخ‌ها و متغیرهای مستقل رسم شد. بهینه‌سازی شرایط فرایند و فرمولاسیون با استفاده از داده‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار Design Expert نسخه ۶.۰.۲ انجام گرفت.

(FCCD)^۱ با ۴ متغیر مستقل، ۳ سطح و ۶ تکرار در نقطه مرکزی طرح (به منظور بررسی تکرارپذیری طرح) استفاده گردید، به طوری که مجموع کل تیمارها ۳۰ تیمار شد. متغیرهای مستقل شامل PDBC (درصد)، سرعت چرخش ماردون ماریچ (دور در دقیقه)، رطوبت ورودی (درصد) و درجه حرارت اکستروژن (درجه سانتی‌گراد) بود، همچنین متغیرهای وابسته (پاسخ) اندازه‌گیری شده شامل سختی بافت، نسبت انبساط، چگالی توده و ویژگی‌های عملکردی (شاخص جذب آب، شاخص حلالیت در آب، شاخص جذب روغن) بودند. حد بالا و پایین محدوده در نظر گرفته شده به شکل حقیقی (غیرکدبندی شده) برای PDBC جهت بررسی اثر متغیرهای آزمایش استفاده شد (جدول ۲). مقادیر متغیرهای مستقل مورد ارزیابی در این پژوهش که شامل رطوبت خوراک

جدول ۲ - سطوح افزودن متغیرهای مستقل

| کد و سطح مربوطه | | | نماد ریاضی | متغیر مستقل |
|-----------------|-----|-----|------------|---------------------------------------|
| -۱ | ۰ | +۱ | | |
| ۱۰ | ۲۰ | ۳۰ | A | آرد کنجاله بنه (PDBC) (w/w) درصد |
| ۱۲۰ | ۱۶۰ | ۲۲۰ | C | سرعت چرخش ماردون ماریچ (دور در دقیقه) |
| ۱۲۰ | ۱۴۰ | ۱۸۰ | D | درجه حرارت پخت (سانتی‌گراد) |
| ۱۲ | ۱۵ | ۱۸ | B | رطوبت خوراک ورودی (درصد) |

نتایج و بحث

می‌باشد. عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل میزان پودر کنجاله بنه (A و $P < 0.0001$)، سرعت چرخش ماردون (C و $P < 0.0032$) و درجه حرارت (D و $P < 0.0176$) بودند. مقدار R^2 ، $R^2_{Adjusted}$ و $R^2_{Predicted}$ این مدل به ترتیب ۰/۹۲۶۹، ۰/۹۱۸۵ و ۰/۹۱۴۳ بودند که بالا بودن این مقادیر و تناسب آنها با یکدیگر تأییدکننده قدرت بالای مدل می‌باشد.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مدل خطی برای شاخص انحلال در آب از نظر آماری معنی‌دار بوده ($P < 0.0001$)، درعین حال، آزمون ضعف برازش معنی‌دار نمی‌باشد ($P > 0.05$). این نتایج مناسب بودن مدل برازش یافته در مورد شاخص انحلال در آب را نشان می‌دهد. مقدار بالای $R^2 = 0.9538$ و متناسب بودن مقدار $R^2_{Adjusted} = 0.9485$ و $R^2_{Predicted} = 0.9428$ بیانگر قدرت بالای مدل در پیش‌بینی می‌باشد.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مدل خطی برای نسبت انبساط از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.0001$). به علاوه، آزمون ضعف برازش معنی‌دار نمی‌باشد ($P > 0.05$). این نتایج مناسب بودن مدل برازش یافته در مورد نسبت انبساط را نشان می‌دهد. مقدار بالای $R^2 = 0.9700$ و متناسب بودن مقدار $R^2_{Adjusted}$ و $R^2_{Predicted}$ که به ترتیب برابر ۰/۹۶۵۲ و ۰/۹۶۲۳ هستند، بیانگر قدرت بالای مدل در پیش‌بینی است.

مطابق جدول (۳)، مدل ارائه شده برای چگالی توده از نظر آماری معنی‌دار بوده است ($P < 0.0001$). با توجه به این نتیجه و همچنین معنی‌دار نبودن آزمون ضعف برازش ($P > 0.05$) چنین استنباط می‌شود که مدل خطی، مدل مناسبی در مورد این متغیر وابسته

^۲ Full Quadratic

^۳ Backward Elimination

^۱ Factorial Central Composite Designs

روغن را نشان می‌دهد. مقدار بالای $R^2=0/9640$ و متناسب بودن مقدار $R^2_{Adjusted}=0/9582$ و $R^2_{Predicted}=0/9533$ بیانگر قدرت بالای مدل در پیش‌بینی می‌باشد.

مطابق جدول (۳)، مدل ارائه‌شده برای شاخص سختی از نظر آماری معنی‌دار بوده است ($P<0/0001$). باتوجه‌به این نتیجه و همچنین معنی‌دار نبودن آزمون ضعف برازش ($P>0/05$) چنین استنباط می‌شود که مدل خطی، مدل مناسبی در مورد این متغیر وابسته می‌باشد. عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل میزان پودر کنجالهٔ بنه (A و $P<0/0001$)، سرعت چرخش ماردون (C و $P<0/0001$)، رطوبت ورودی (B و $P<0/0001$) و درجه‌حرارت (D و $P<0/0001$) بودند (جدول ۴). مقدار $R^2=0/9734$ ، $R^2_{Adjusted}=0/9711$ و $R^2_{Predicted}=0/9771$ که بالا بودن این مقادیر و تناسب آنها با یکدیگر تأییدکنندهٔ قدرت بالای مدل می‌باشد.

مطابق جدول (۳)، مدل ارائه‌شده برای شاخص جذب آب از نظر آماری معنی‌دار بوده است ($P<0/0001$). باتوجه‌به این نتیجه و همچنین معنی‌دار نبودن آزمون ضعف برازش ($P>0/05$) چنین استنباط می‌شود که مدل خطی، مدل مناسبی در مورد این متغیر وابسته می‌باشد. عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل میزان پودر کنجالهٔ بنه (A و $P<0/0001$)، سرعت چرخش ماردون (C و $P<0/0001$)، رطوبت ورودی (B و $P<0/0001$) و درجه‌حرارت (D و $P<0/0009$) بودند (جدول ۴). مقدار $R^2=0/9760$ ، $R^2_{Adjusted}=0/9721$ و $R^2_{Predicted}=0/9682$ که بالا بودن این مقادیر و تناسب آنها با یکدیگر تأییدکنندهٔ قدرت بالای مدل می‌باشد.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، مدل خطی برای شاخص جذب روغن از نظر آماری معنی‌دار بوده ($P<0/0001$) و همچنین آزمون ضعف برازش معنی‌دار نمی‌باشد ($P>0/05$). این نتایج مناسب بودن مدل برازش‌یافته در مورد شاخص جذب

جدول ۳ - نتایج تجزیهٔ واریانس (ANOVA) پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

| منبع | مجموع مربعات | درجهٔ آزادی | میانگین مربعات | اندیس F | احتمال F |
|----------------------------|------------------------|-------------|-------------------------|---------|----------|
| نسبت انبساط | | | | | |
| مدل | ۲۶/۰۴ | ۴ | ۶/۵۱ | ۲۰۱/۸۷ | ۰/۰۰۰۱ |
| A (آرد کنجالهٔ بنه (PDBC)) | ۲۳/۹۹ | ۱ | ۲۳/۹۹ | ۷۴۴/۰۱ | ۰/۰۰۰۱ |
| B (درصد رطوبت ورودی) | ۰/۱۷ | ۱ | ۰/۱۷ | ۵/۳۴ | ۰/۰۲۹۴ |
| C (سرعت چرخش ماردون) | ۱/۲۷ | ۱ | ۱/۲۷ | ۳۹/۳۷ | ۰/۰۰۰۱ |
| D (درجه‌حرارت) | ۰/۶۰ | ۱ | ۰/۶۰ | ۱۸/۷۶ | ۰/۰۰۰۲ |
| ضعف برازش | ۰/۵۴ | ۲۰ | ۰/۰۲۷ | ۰/۵۲ | ۰/۸۷۶۳ |
| خطا | ۰/۲۶ | ۵ | ۰/۰۵۳ | - | - |
| چگالی توده | | | | | |
| مدل | ۰/۰۲۵ | ۳ | $8/1222 \times 10^{-3}$ | ۱۰۹/۹۶ | ۰/۰۰۰۱ |
| A (آرد کنجالهٔ بنه (PDBC)) | ۰/۰۲۳ | ۱ | ۰/۰۲۳ | ۳۱۲/۹۳ | ۰/۰۰۰۱ |
| C (سرعت چرخش ماردون) | $7/867 \times 10^{-4}$ | ۱ | $7/867 \times 10^{-4}$ | ۱۰/۵۲ | ۰/۰۰۳۲ |
| D (درجه‌حرارت) | $4/805 \times 10^{-4}$ | ۱ | $4/805 \times 10^{-4}$ | ۶/۴۳ | ۰/۰۱۷۶ |
| ضعف برازش | $1/323 \times 10^{-3}$ | ۲۱ | $6/299 \times 10^{-5}$ | ۰/۵۱ | ۰/۸۷۵۲ |
| خطا | $6/213 \times 10^{-4}$ | ۵ | $1/243 \times 10^{-4}$ | - | - |
| شاخص انحلال در آب | | | | | |
| مدل | ۱۸۲۴/۱۸ | ۳ | ۶۰۸/۰۶ | ۱۷۹/۰۷ | ۰/۰۰۰۱ |
| A (آرد کنجالهٔ بنه (PDBC)) | ۱۶۸۵/۸۷ | ۱ | ۱۶۸۵/۸۷ | ۴۹۶/۴۸ | ۰/۰۰۰۱ |
| B (درصد رطوبت ورودی) | ۱۰۶/۵۸ | ۱ | ۱۰۶/۵۸ | ۴۹۶/۴۸ | ۰/۰۰۰۱ |
| D (درجه‌حرارت) | ۳۱/۷۳ | ۱ | ۳۱/۷۳ | ۹/۳۵ | ۰/۰۰۵۱ |
| ضعف برازش | ۷۰/۸۵ | ۲۱ | ۳/۳۷ | ۰/۹۷ | ۰/۵۷۶۴ |
| خطا | ۱۷/۴۴ | ۵ | ۳/۴۹ | - | - |
| شاخص جذب آب | | | | | |
| مدل | ۲۵/۷۷ | ۴ | ۶/۴۴ | ۲۵۳/۷۳ | ۰/۰۰۰۱ |
| A (آرد کنجالهٔ بنه (PDBC)) | ۲۳/۶۶ | ۱ | ۲۳/۶۶ | ۹۳۱/۹۲ | ۰/۰۰۰۱ |

ادامه جدول ۳ - نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) پاسخ‌های اندازه‌گیری شده

| احتمال F | اندیس F | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات | منبع |
|----------------------|---------|----------------|------------|--------------|---------------------------|
| ۰/۰۰۰۱ | ۶۳/۷۵ | ۱/۶۲ | ۱ | ۱/۶۲ | B (درصد رطوبت ورودی) |
| ۰/۰۳۳۸ | ۵/۰۴ | ۰/۱۳ | ۱ | ۰/۱۳ | C (سرعت چرخش ماردون) |
| ۰/۰۰۰۹ | ۱۴/۲۱ | ۰/۳۶ | ۱ | ۰/۳۶ | D (درجه حرارت) |
| ۰/۷۲۳۳ | ۰/۷۳ | ۰/۰۲۴ | ۲۰ | ۰/۴۷ | ضعف برازش |
| - | - | ۰/۰۳۲ | ۵ | ۰/۱۶ | خطا |
| شاخص جذب روغن | | | | | |
| ۰/۰۰۰۱ | ۱۶۷/۱۶ | ۶/۹۹ | ۴ | ۲۷/۹۷ | مدل |
| ۰/۰۰۰۱ | ۵۸۹/۵۶ | ۲۴/۶۶ | ۱ | ۲۴/۶۶ | A (آرد کنجاله بنه (PDBC)) |
| ۰/۰۰۰۱ | ۵۷/۵۰ | ۲/۴۱ | ۱ | ۲/۴۱ | B (درصد رطوبت ورودی) |
| ۰/۰۱۲۷ | ۷/۲۱ | ۰/۳۰ | ۱ | ۰/۳۰ | C (سرعت چرخش ماردون) |
| ۰/۰۰۰۸ | ۱۴/۳۷ | ۰/۶۰ | ۱ | ۰/۶۰ | D (درجه حرارت) |
| ۰/۷۲۹۰ | ۰/۷۲ | ۰/۰۳۹ | ۲۰ | ۰/۷۸ | ضعف برازش |
| - | - | ۰/۰۳۲ | ۵ | ۰/۲۷ | خطا |
| سختی | | | | | |
| ۰/۰۰۰۱ | ۲۶۶/۳۳ | ۵/۴۹ | ۴ | ۲۱/۹۸ | مدل |
| ۰/۰۰۰۱ | ۹۶۸/۱۱ | ۱۹/۹۷ | ۱ | ۱۹/۹۷ | A (آرد کنجاله بنه (PDBC)) |
| ۰/۰۰۷۳ | ۸/۵۳ | ۰/۱۸ | ۱ | ۰/۱۸ | B (درصد رطوبت ورودی) |
| ۰/۰۰۰۱ | ۵۷/۷۳ | ۱/۱۹ | ۱ | ۱/۱۹ | C (سرعت چرخش ماردون) |
| ۰/۰۰۰۱ | ۳۰/۹۵ | ۰/۶۴ | ۱ | ۰/۶۴ | D (درجه حرارت) |
| ۰/۸۶۴۸ | ۰/۵۲ | ۰/۰۱۷ | ۲۰ | ۰/۳۵ | ضعف برازش |
| - | - | ۰/۰۳۳ | ۵ | ۰/۱۷ | خطا |

خواص ویسکوالاستیک مواد مذاب، مکانیسم تشکیل و رشد حباب، خواص نرم‌کنندگی^۱ آب در انتقال از فاز مایع (سیال) به ویسکوالاستیک و سپس حالت شیشه‌ای بستگی دارد (Arhaliass et al., 2003). چگالی توده و نسبت انبساط رابطه معکوسی با هم دارند. به طوری که با افزایش نسبت انبساط در یک محصول اکستروژده شده میزان چگالی توده کاهش می‌یابد (Koksel et al., 2003). پلی‌ساکاریدهای غیرنشاسته‌ای نظیر فیبرها می‌توانند در طی فرایند اکستروژن اتصال قوی‌تری نسبت به پروتئین و نشاسته با آب برقرار کنند و این اتصال می‌تواند با محدود کردن آب در دسترس سبب کاهش میزان انبساط و احتمالاً افزایش چگالی توده گردد (Camire & king, 1991). یافته‌های حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعه Lue و همکاران (۱۹۹۱) روی چگالی توده محصول اکستروژده حاوی تفاله انگور که با افزایش درصد سطوح تفاله مصرفی مقدار فیبر افزایش و بنابراین منجر به پارگی دیواره سلولی قبل از تشکیل حباب گاز گردید، مطابقت دارد.

اثرات متغیرهای فرمولاسیون و شرایط فرایند بر چگالی توده و نسبت انبساط اسنک حاوی PDBC بررسی اثر PDBC

در پژوهش حاضر با افزایش سطح PDBC از ۱۰ تا ۳۰ درصد به فرمولاسیون محصول اکستروژده بر پایه بلغور ذرت نسبت انبساط کاهش و میزان چگالی توده محصول افزایش یافت که به نظر می‌رسد علت آن افزایش مقدار فیبر موجود در PDBC و تأثیر فیبر در ایجاد سوراخ در دیواره و جلوگیری از تشکیل و گسترش سلول هوایی باشد (شکل ۱-الف). افزایش مقدار فیبر در محصولات اکستروژده سبب ایجاد ساختاری متراکم و کاهش اندازه سلول‌های هوایی، افزایش تعداد سوراخ‌ها در دیواره سلولی و بنابراین کاهش میزان انبساط و افزایش دانسیته توده گردید (Altan et al., 2008a).

چگالی توده به‌طور مستقیم با انبساط محصولات اکستروژده ارتباط دارد و پارامتر بسیار مهمی در تولید محصولات حجیم و شکل‌داده شده بشمار می‌رود (Koksel et al., 2003). انبساط و تشکیل بافت محصولات اکستروژده فرایند پیچیده‌ای است که به

^۱ Plasticizer

فشار بخار آب بود (شکل ۱-الف و ۱-ب؛ ۲-الف و ۲-ب).

به‌طور کلی سرعت چرخش ماردون دارای اثر مثبتی بر انبساط بوده، به‌عبارتی افزایش سرعت چرخش ماردون سبب افزایش میزان برش و بنابراین کاهش ویسکوزیته ذوب می‌گردد (Kokini *et al.*, 1992). سرعت چرخش ماردون کم مرتبط با زمان باقی‌ماندن بالای مواد در بدنه اکسترودر بوده، به‌عبارتی مواد غذایی انرژی حرارتی بالایی در محیط با برش کم دریافت می‌کنند. انرژی حرارتی بالا درباره زمان باقی‌ماندن بالای مواد در اکسترودر منجر به ایجاد و تقویت سطح بالای بخار فوق داغ‌شده و بنابراین انبساط خوبی در محصول ایجاد و ساختار متخلخلی تولید و محصول سبک‌تر می‌شود (Bhattacharya, 1997).

به‌طور کلی سرعت چرخش ماردون و درجه حرارت اثر متفاوتی بر نسبت انبساط و چگالی توده محصولات اکسترودر شده دارند و اثرات این دو متغیر وابسته به یکدیگرند. افزایش درجه حرارت سبب افزایش درجه فوق داغ آب در اکسترودر و رشد و تشکیل حباب و کاهش در ویسکوزیته مواد مذاب گردیده و چگالی توده محصول اکسترودر شده کاهش می‌یابد (Ding *et al.*, 2006).

اثر کاهشی درجه حرارت روی چگالی توده محصولات اکسترودر شده ممکن است ناشی از اثر ترکیبی درجه حرارت بالا و مقدار نسبتاً بالای فیبرهای نامحلول بوده که احتمالاً سبب افزایش فشار داخلی اکسترودر و کاهش ویسکوزیته مواد مذاب و الاستیسیته و پلاستیسیته خمیر می‌گردد. افزایش نیروی برشی در اکسترودر سبب افزایش میزان پف کردن محصولات اکسترودر شده می‌شود، بنابراین کاهش چگالی توده محصولات را به همراه خواهد داشت (Hsieh *et al.*, 1989). چگالی توده در سرعت چرخش ماردون بالا کاهش می‌یابد. علت این امر احتمالاً مربوط به تشدید اثر حرارت روی مواد مذاب داخل اکسترودر به دلیل کاهش زمان تماس مواد مذاب با حرارت در اکسترودر و افزایش میزان ژلاتیناسیون و متخلخل می‌گردد (Li *et al.*, 2005).

در تحقیقی مشابه توسط Chang و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی اثر آرد جاتوبا^۲ در فرمولاسیون محصول اکسترودر شده بر پایه نشاسته کاساوا پرداخته و نتایج نشان داد که میزان انبساط فرآورده اکسترودر شده کاهش یافته و علت آن را افزایش میزان فیبر آرد جانوبا و کاهش میزان نشاسته و تأثیر آن بر افزایش ویسکوزیته مواد مذاب و محدودیت انبساط اعلام نمودند.

Sun و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی محصولات اکسترودر شده حاوی آرد سویای چربی‌گیری شده پرداخته و نتایج نشان داد با افزایش درصد سطوح آرد سویای چربی‌گیری شده از ۱۰ به ۳۰ درصد به دلیل افزایش میزان فیبر اندازه سلول‌های هوایی کاهش و از طرفی تعداد حفره‌ها در سلول هوایی افزایش یافته که منجر به تراکم بافت و افزایش چگالی توده گردید.

بررسی تأثیر رطوبت

در پژوهش حاضر، با افزایش میزان رطوبت، نسبت انبساط کاهش یافت (شکل ۱-ج). افزایش میزان رطوبت سبب کاهش الاستیسیته خمیر از طریق نرم کردن مواد مذاب و کاهش درجه حرارت می‌شود؛ زیرا افزایش رطوبت سبب کاهش اصطکاک بین خمیر و ماردون و جدار داخلی اکسترودر می‌شود و در نتیجه نسبت انبساط را کاهش می‌دهد. همچنین کاهش میزان رطوبت سبب افزایش میزان برش می‌شود که این امر به نوبه خود موجب افزایش نسبت انبساط می‌شود، زیرا نسبت انبساط تابعی از میزان برش می‌باشد (Altan & Maskan, 2011).

بررسی تأثیر درجه حرارت و سرعت چرخش ماردون

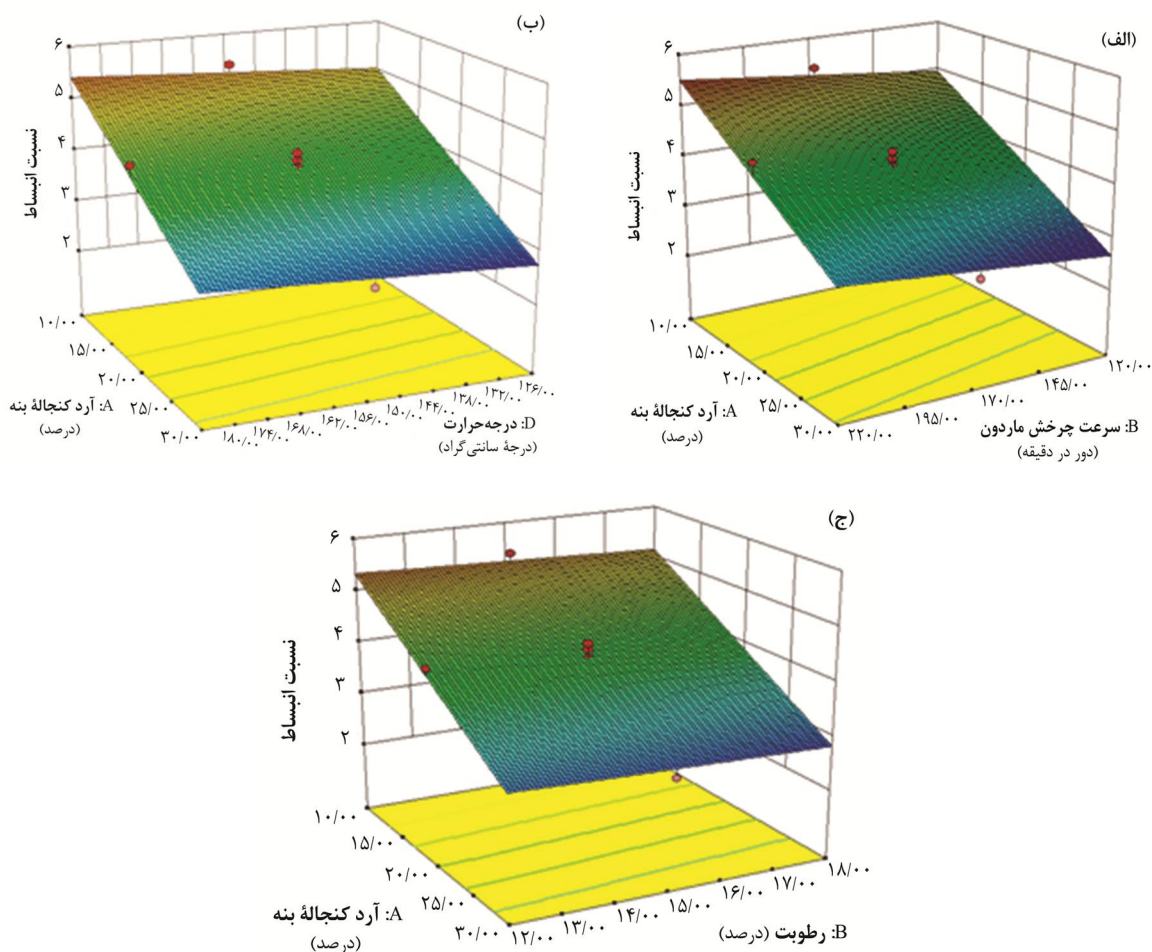
در پژوهش حاضر با افزایش سرعت چرخش ماردون از ۱۲۰ به ۲۲۰ دور در دقیقه و با افزایش دما از ۱۲۰ به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در تولید محصول اکسترودر شده بر پایه بلغور ذرت و حاوی PDBC به ترتیب سبب کاهش میزان چگالی توده و افزایش نسبت انبساط گردید و علت احتمالی مربوط به نقش برشی ماردون در کاهش ویسکوزیته مواد مذاب و دما در افزایش

² Janoba

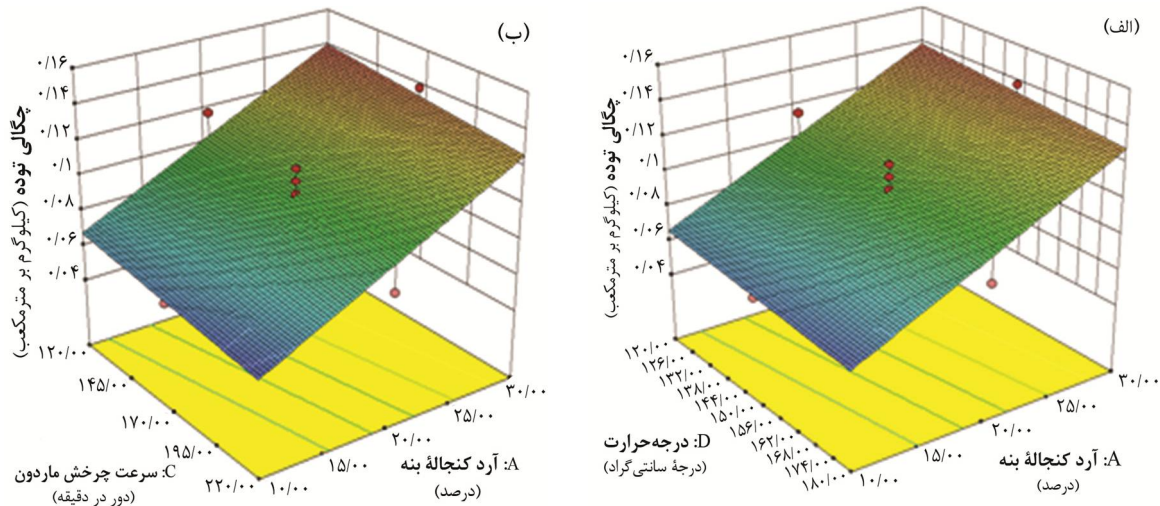
درجه حرارت‌های بالاتر ویسکوزیته مواد مذاب کاهش یافته و رشد حباب تسهیل شده اما به دلیل نازک شدن دیواره، حباب تحمل فشار بخار داخلی را نداشته و تخریب می‌شود.

نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعه Seker (۲۰۰۵) روی دانسیته توده محصول اکستروژده حاوی پروتئین سویا و همچنین تحقیقی مشابه توسط Jin و همکاران (۱۹۹۵) و Yagci و Gogus (۲۰۰۸) روی دانسیته توده محصول اکستروژده حاوی فیبر سویا و برنج که همراه با افزایش دما و سرعت چرخش ماردون میزان دانسیته توده کاهش و نسبت انبساط افزایش یافته است، مطابقت دارد.

افزایش درجه حرارت سبب افزایش دمای بخار آب در اکسترودر و تسریع در تشکیل حباب و از طرفی کاهش ویسکوزیته مواد مذاب و دانسیته توده محصول می‌گردد (Ding et al., 2006). افزایش درجه حرارت در اکسترودر طی فرایند اکستروژن سبب نازک‌تر شدن ضخامت دیواره سلولی و افزایش نسبت انبساط محصول می‌گردد (Lazou et al., 2010). افزایش میزان انبساط در مورد افزایش دما مربوط به درجه ژلاتیناسیون بوده درحالی‌که کاهش انبساط در دمای بالاتر ناشی از تجزیه مولکولی نشاسته می‌باشد (Chinnaswamy et al., 1988). از جمله دلایل کاهش انبساط در درجه حرارت بالاتر، تخریب سریع‌تر حباب بعد از انبساط اولیه در خروجی اکسترودر می‌باشد. در



شکل ۱ - نمودار سطح پاسخ نسبت انبساط؛ الف - تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - سرعت چرخش ماردون، ب - تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - درجه حرارت، ج - تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - رطوبت



شکل ۲ - نمودار سطح پاسخ چگالی توده؛ الف- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - درجه حرارت، ب- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - سرعت چرخش ماردون

پلی ساکاریدهای محلول آزاد شده از اجزاء نشاسته بعد از اکستروژن و تولید ترکیباتی با وزن مولکولی کم می باشد (Stojceska *et al.*, 2008). در فرایند ژلاتیناسیون، نشاسته دارای ظرفیت نگهداری آب بیشتری نسبت به بخش فیبری نظیر سلولز و همی سلولز بوده و جایگزینی بخشی از فرآورده های جانبی کشاورزی حاوی فیبر در فرمولاسیون سبب کاهش نسبی مقدار نشاسته و رقابت در جذب آب گردیده و از طرفی ترکیبات فیبری موجود طی فرایند اکستروژن به ترکیباتی با وزن مولکولی کم تبدیل شده و در نتیجه میزان شاخص انحلال در آب افزایش و شاخص جذب آب کاهش می یابد (Altan *et al.*, 2008a).

نتایج این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعه Colonna و همکاران (۱۹۸۹) روی شاخص جذب آب در محصول اکستروژن شده برنج حاوی آرد کنجاله روغن گیری شده بادام زمینی که در آن با افزودن درصد آن میزان شاخص جذب آب به دلیل کاهش دسترسی به مولکول های آب و نفوذ آن میزان تجزیه مولکول نشاسته کاهش یافته و بر ژلاتیناسیون نشاسته در اکستروژن تأثیر گذاشته و سبب کاهش جذب آب و افزایش شاخص انحلال در آب گردید، مطابقت دارد. در پژوهشی مشابه توسط Gujska و Khan (۱۹۹۱)

اثرات متغیرهای فرمولاسیون و شرایط فرایند بر شاخص جذب آب و شاخص انحلال در آب اسنک

حاوی PDBC

بررسی اثر PDBC

در تحقیق حاضر با افزایش درصد PDBC شاخص جذب آب کاهش یافت (شکل ۳) و علت احتمالی آن مربوط به وجود ترکیبات فیبری نامحلول، عدم دسترسی گروه های آب دوستی به مولکول های آب و همچنین کاهش نسبی در مقدار نشاسته ناشی از افزودن درصد PDBC در فرمول بوده است. از طرفی شاخص انحلال در آب با افزایش درصد PDBC، طی فرایند اکستروژن در اثر نیروی برشی اعمال شده بخشی از ترکیبات فیبری نامحلول به ترکیباتی با وزن مولکولی کم افزایش یافت (شکل ۴). شاخص جذب آب به دسترسی گروه های آب دوست و برقراری پیوند با مولکول های آب ارتباط دارد و ظرفیت درشت مولکول ها را در تشکیل ژل مشخص می نماید (Gomez & Aguilera, 1983). شاخص جذب آب معرف میزان ژلاتیناسیون است. درجه حرارت و رطوبت ورودی در اکستروژن بیشترین اثر را بر میزان این شاخص در محصولات اکستروژن شده دارند (Ding *et al.*, 2006). شاخص انحلال قدرت یا میزان تورم گرانول ها و تجزیه مولکولی بوده و بیانگر میزان

در این پژوهش، افزایش دما احتمالاً سبب افزایش درجهٔ ژلاتیناسیون نشاسته شده است که این امر منجر به افزایش میزان نشاستهٔ محلول گردید و در نتیجه شاخص انحلال در آب افزایش یافت (شکل ۴-ب). علاوه بر این، می‌توان افزایش شاخص انحلال در آب را به افزایش میزان نشاستهٔ دکسترینیزه شده^۲ طی اکستروژن نسبت داد (Altan & Maskan, 2011).

نتایج حاصل از این تحقیق با یافتهٔ تحقیق Badrie و Mellows (۱۹۹۱) روی محصول اکستروژده بر پایهٔ ذرت حاوی کاساوا مطابقت دارد که در آن با افزایش سرعت چرخش ماردون از ۴۲۵ تا ۵۲۵ دور در دقیقه میزان شاخص جذب آب کاهش یافت و علت آن را به افزایش میزان برش و تغییر در ساختار مولکولی مخلوط خمیری در اکسترودر و کاهش زمان تماس مواد با دما در اکسترودر اعلام نمودند.

بررسی اثر رطوبت

باتوجه به نتایج به دست آمده زمانی که سطح زیادی از PDBC در فرمولاسیون به کار گرفته شد، شاخص جذب آب تحت تأثیر مقدار میزان رطوبت قرار نگرفت اما سطوح پایین تر آن، سبب افزایش شاخص جذب آب محصول گردید که علت احتمالی مربوط به نقش آب به عنوان یک نرم کننده^۳ بوده است که سبب کاهش تجزیهٔ پلیمر نشاسته و در نتیجه موجب دسترسی بیشتر گروه‌های آب دوست به مولکول‌های آب شده است (شکل ۳-الف). Yagci و Gogus (۲۰۰۸)، Hagenimana و همکاران (۲۰۰۶) و Ding و همکاران (۲۰۰۶) نتایج مشابهی را در خصوص اثر آرد به دست آمده از کنجاله‌های مختلف بر شاخص جذب آب را گزارش کردند.

روی محصول اکستروژده حاوی ذرت و آرد لوبیا پینتو^۱ نیز مشخص شد. با افزودن میزان پوسته، به دلیل فیبر نامحلول بالا در آن و همچنین کاسته شدن از میزان نشاستهٔ اولیه در فرمولاسیون، از میزان جذب آب و ژلاتیناسیون کاسته شده و بخشی از ترکیبات فیبری موجود نامحلول به ترکیباتی با وزن مولکولی کم شکسته شده و در نتیجه میزان شاخص جذب آب کاهش و شاخص انحلال افزایش یافت. در پژوهشی مشابه توسط Singh و همکاران (۲۰۰۷) روی محصول اکستروژده بر پایهٔ برنج و حاوی بلغورنخود با افزودن سطوح بلغورنخود مصرفی میزان شاخص جذب آب کاهش و شاخص انحلال در آب افزایش یافت و علت آن را کاهش میزان نشاسته و افزایش میزان سبوس موجود در بلغورنخود در فرمولاسیون دانستند.

بررسی اثر درجه حرارت و سرعت چرخش ماردون

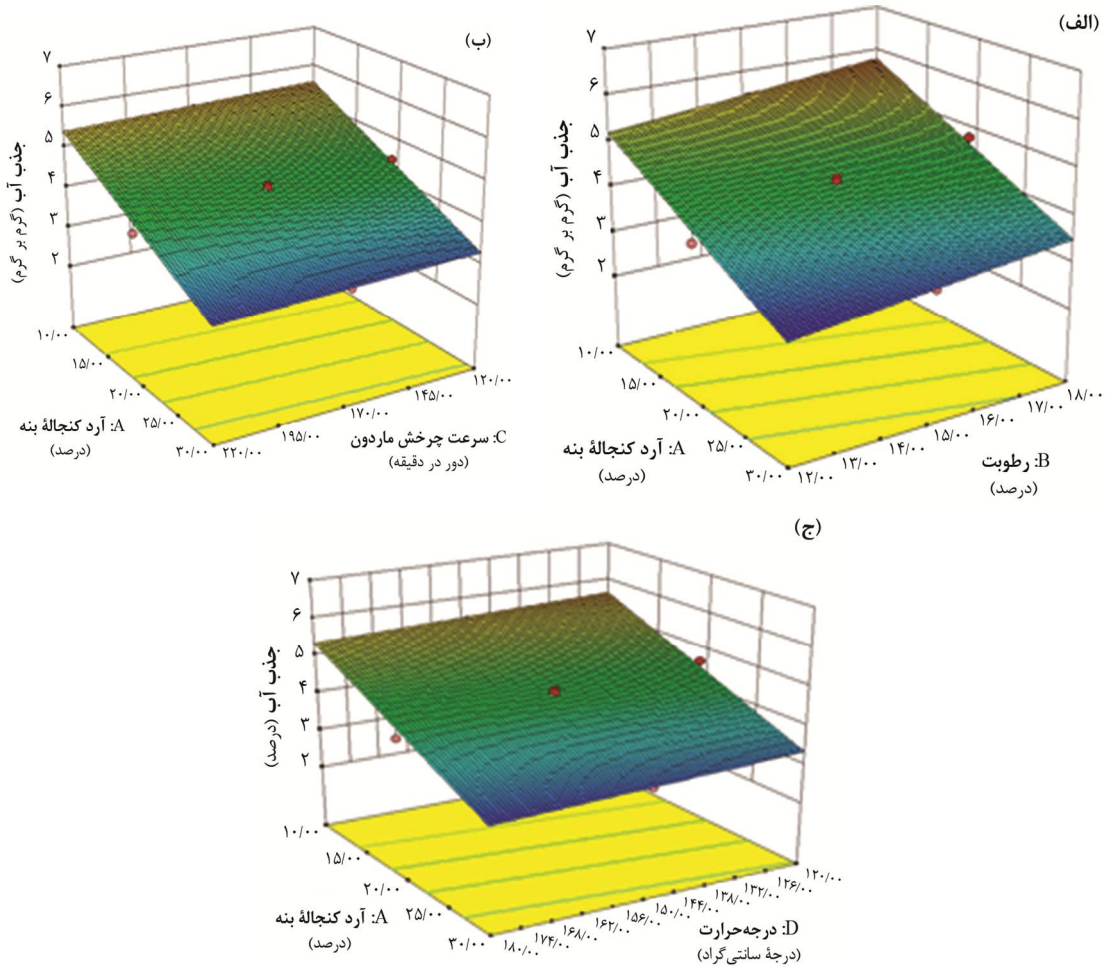
در پژوهش حاضر با افزایش دما، شاخص جذب آب کاهش یافت (شکل ۳-ج). علت این امر احتمالاً تجزیهٔ نشاسته بوده است. در تحقیقی مشابه، Hashimoto و Grossmann (۲۰۰۳) اعلام کردند با افزایش درجه حرارت از ۱۵۰ به ۱۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد شاخص جذب آب محصول اکستروژده حاوی نشاستهٔ کاساوا و سبوس آن کاهش یافت که علت آن را به اثر تخریبی درجه حرارت‌های بالا در تجزیهٔ مولکول‌های نشاسته نسبت دادند.

در تحقیق حاضر شاخص جذب آب در محصول اکستروژده با افزایش سرعت چرخش ماردون از ۱۲۰ به ۲۲۰ دور در دقیقه، کاهش یافت (شکل ۴-ب). علت آن احتمالاً مربوط به تغییر در ساختار کنجالهٔ بنه ناشی از اثر سرعت چرخش ماردون و صدمه به زنجیرهٔ پلیمری و از طرفی کاهش دسترسی گروه‌های هیدروفیلی به مولکول‌های آب و کاهش زمان تماس مواد موجود در اکسترودر جهت ژلاتیناسیون بود (Gomez & Aguilera, 1983; Guha et al., 1997).

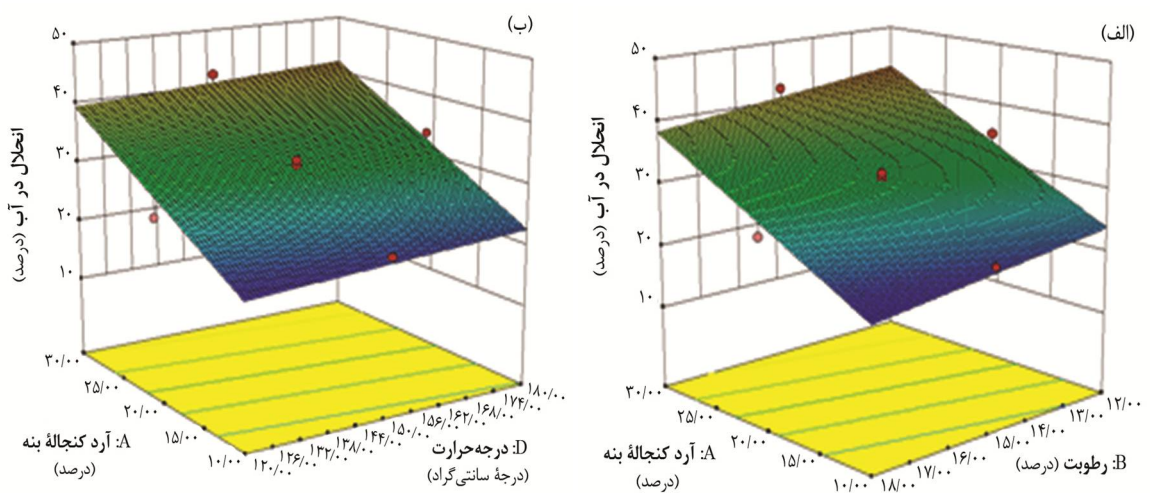
² Dexterinized

³ Plasticizer

¹ Pinto Beans



شکل ۳ - نمودار سطح پاسخ شاخص جذب آب؛ الف- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - رطوبت، ب- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - سرعت چرخش ماردون، ج- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - درجه حرارت



شکل ۴ - نمودار سطح پاسخ شاخص انحلال در آب؛ الف- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - رطوبت، ب- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - درجه حرارت

افزایش میزان رطوبت ورودی قطر سلول‌های هوایی بدون افزایش ضخامت دیواره سلولی کاهش یافته و به دلیل تراکم سلولی نسبت انبساط سلولی کاهش و میزان سختی بافت افزایش یافته، مطابقت دارد.

بررسی اثر درجه حرارت و سرعت چرخش ماردون در پژوهش حاضر نیز با افزایش درجه حرارت اکستروژن از ۱۲۰ به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد میزان سختی بافت کاهش یافته که نتیجه احتمالی مربوط به کاهش ویسکوزیته مواد مذاب و افزایش میزان انبساط سلولی ناشی از افزایش فشار بخار آب در خروجی اکستروژن به همراه کاهش ضخامت دیواره سلولی و تولید سلول‌های هوایی بزرگ‌تر می‌باشد (شکل ۵-ج).

افزایش درجه حرارت طی فرایند اکستروژن سبب کاهش ویسکوزیته مواد مذاب و افزایش فشار بخار آب جهت ایجاد حباب در تولید محصول منبسط شده و همچنین کاهش ضخامت دیواره حباب هوایی و از طرفی کاهش میزان سختی بافت می‌گردد (Ding *et al.*, 2006; Yuliani *et al.*, 2006; Altan *et al.*, 2008a).

در پژوهش حاضر نیز با افزایش سرعت چرخش ماردون از ۱۲۰ به ۲۲۰ دور در دقیقه میزان سختی بافت محصول اکستروژده شده بر پایه PDBC کاهش یافت (شکل ۵-ب) که علت احتمالی این پدیده مربوط به اثر سرعت چرخش ماردون در افزایش انرژی مکانیکی مخصوص و میزان برش حاصله و نقش آن در افزایش میزان انبساط و کاهش سختی بافت بود (Zarzycki *et al.*, 2010). افزایش سرعت چرخش ماردون سبب افزایش انرژی مکانیکی مخصوص می‌شود که اثر مثبت روی میزان انبساط دارد؛ بنابراین، سختی بافت کاهش می‌یابد (Wu *et al.*, 2007). نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج Altan و همکاران (۲۰۰۸) و Wu و همکاران (۲۰۰۷) که به ترتیب به بررسی اثر سرعت چرخش ماردون روی بافت محصول اکستروژده شده حاوی آردجو و آرد بذركتان پرداخته بودند، مطابقت داشت.

اثرات متغیرهای فرمولاسیون و شرایط فرایند بر خصوصیات بافتی (سختی) اسنک حاوی PDBC بررسی اثر PDBC

در پژوهش حاضر نیز با افزودن سطوح PDBC به دلیل افزایش میزان فیبر نامحلول و تأثیر آن بر ضخامت دیواره سلولی، سختی بافت افزایش یافت که با نتایج پژوهش‌های دیگر مطابقت دارد (شکل ۵).

بافت یکی از مهم‌ترین خصوصیات حسی محصولات اکستروژده شده در توسعه محصولات اسنک بشمار می‌رود. از سختی، تردی^۱ و شکنندگی^۲ جهت ارزیابی خصوصیات بافتی محصولات اکستروژده شده تولید شده استفاده می‌شود. افزودن هر نوع فراورده جانبی به فرمولاسیون محصولات اکستروژده شده سبب تغییرات بافتی محصولات می‌گردد (Altan *et al.*, 2008a).

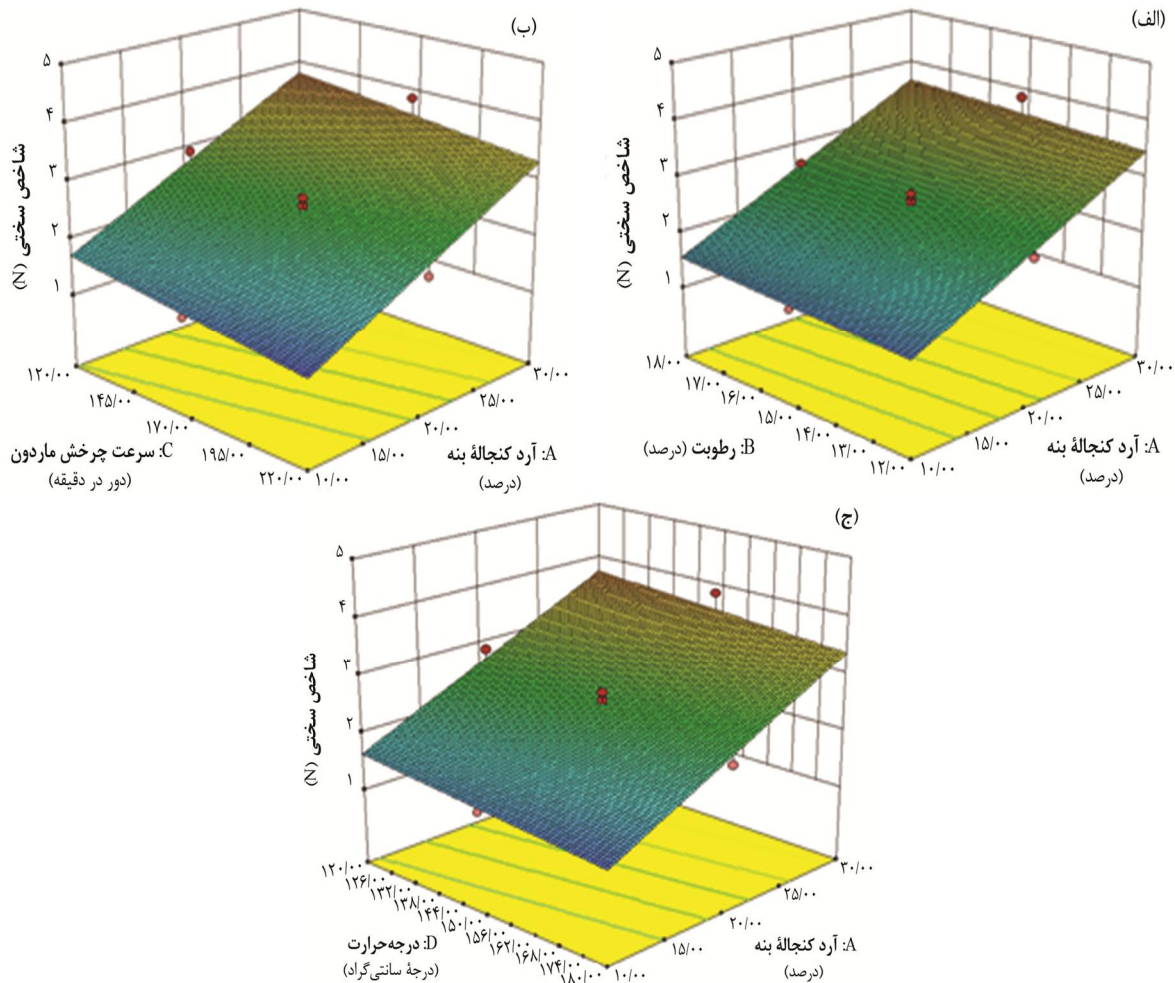
مواد غنی از فیبر افزوده شده به فرمولاسیون محصولات اکستروژده شده سبب کاهش اندازه سلول هوایی و تشکیل دیواره ضخیم می‌گردند. محصولات اکستروژده شده حاوی فیبر دارای یکنواختی کمتر و پارگی بیشتر سلول‌های هوایی در مقایسه با محصولات اکستروژده شده حاوی نشاسته ذرت می‌باشند (Camire & King, 1991; Onwulata *et al.*, 2000; Yanniotis *et al.*, 2007). فیبرهای درشت مولکول سبب تأخیر در تشکیل و توسعه سلول‌های هوایی شده و قبل از اینکه سلول‌های هوایی به ماکزیمم انبساط برسند، تخریب می‌شوند (Robin *et al.*, 2011b).

بررسی اثر رطوبت

در پژوهش حاضر نیز با افزایش سطوح رطوبت در فرمولاسیون محصول اکستروژده شده حاوی PDBC میزان سختی بافت روند صعودی داشت که علت احتمالی آن کاهش نسبت انبساط شعاعی و تخلخل بافتی و از طرفی افزایش تراکم سلول‌های هوایی کوچک می‌باشد (شکل ۵-الف). نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیق Ding و همکاران (۲۰۰۵) روی محصول اکستروژده شده حاوی آردبرنج و همچنین Stojceska و همکاران (۲۰۰۸) روی محصول اکستروژده شده حاوی کدو قرمز که در آن با

¹ Crispness

² Brittleness



شکل ۵ - نمودار سطح پاسخ شاخص سختی؛ الف - تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - رطوبت، ب - تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - سرعت چرخش ماردون، ج - تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - درجه حرارت

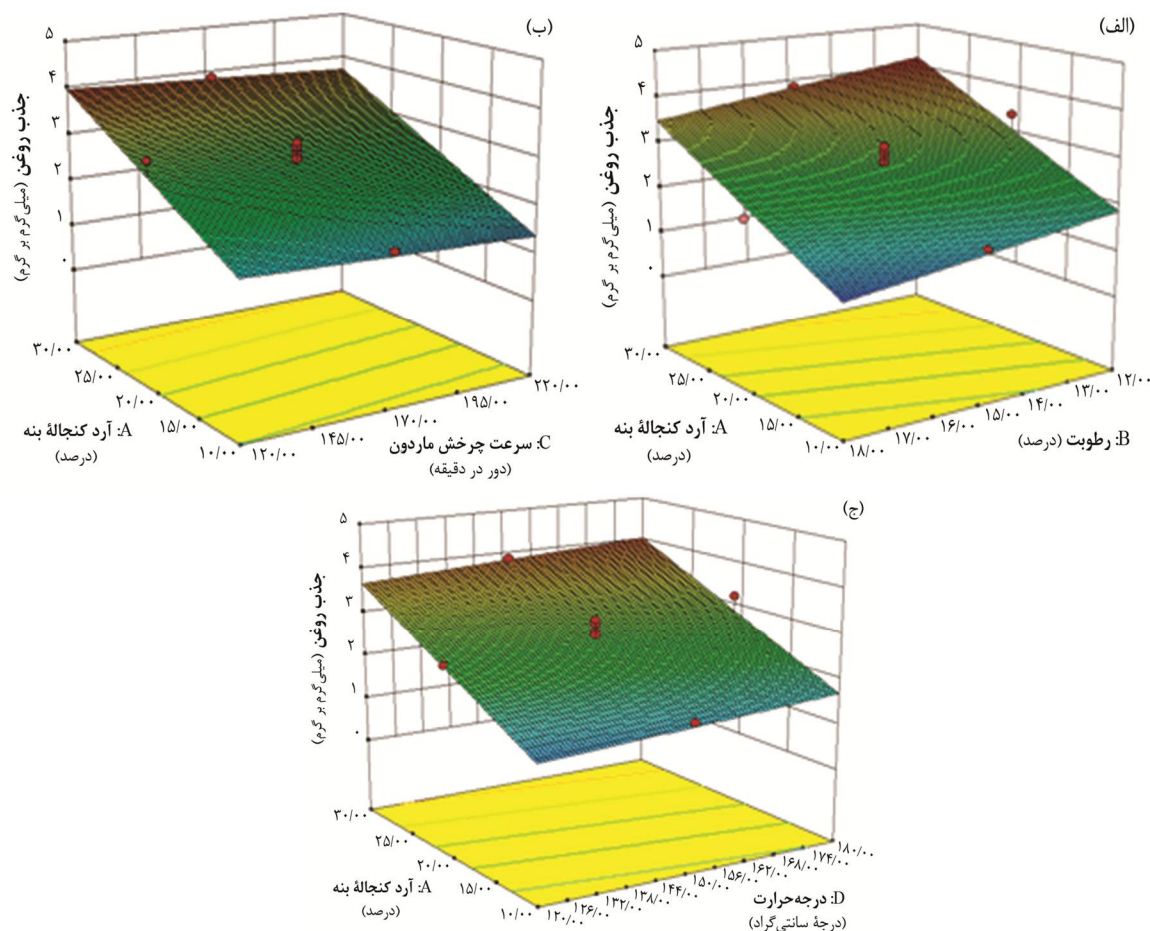
به طور کلی شاخص جذب روغن به عنوان شاخص حضور گروه‌های آب‌گریز و توانایی آنها در حفظ روغن در ساختار محصولات اکستروژده مطرح می‌باشد. در فرایند اکستروژن گرانول‌های نشاسته تحت تأثیر ژلاتیناسیون و تغییر توازن گروه‌های آب‌دوست و آب‌گریز قرار گرفته و تغییراتی در میزان جذب روغن آنها ایجاد می‌گردد (Vernaza et al., 2009).

اثرات متغیرهای فرمولاسیون و شرایط فرایند بر شاخص جذب روغن^۱ اسنک حاوی PDBC

بررسی اثر PDBC

در پژوهش حاضر، با افزایش سطوح PDBC، به دلیل افزایش میزان فیبر، میزان جذب روغن افزایش یافت (شکل ۶) و نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج Poshadri و Deshpande (۲۰۱۱) که به بررسی مشخصات فیزیکی و حسی محصول اکستروژده حاوی آرد ارزن پرداختند، مطابقت دارد. این محققین اعلام نمودند که با افزایش سطوح آرد ارزن مصرفی به دلیل افزایش میزان فیبر موجود و از طرفی روغن کمتر در ساختار داخلی آرد مصرفی میزان جذب روغن در محصول اکستروژده تولیدی افزایش یافت.

^۱ Oil Absorption Index



شکل ۶ - نمودار سطح پاسخ شاخص جذب روغن؛ الف- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - رطوبت، ب- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - سرعت چرخش ماردون، ج- تأثیر درصد آرد کنجاله بنه (PDBC) - درجه حرارت

شاخص جذب روغن روی محصول اکستروودشده حاوی پودر عصاره جو و آردنخود، لوبیا و آردبرنج پرداخته بودند، مطابقت داشت. آنها علت کاهش شاخص جذب روغن را به نقش رطوبت بالا در کاهش میزان ژلاتیناسیون نشاسته و تولید سلول‌های هوایی کوچک نسبت دادند.

بررسی اثر درجه حرارت و سرعت چرخش ماردون
در تحقیق حاضر با افزایش سرعت چرخش ماردون از ۱۲۰ به ۲۲۰ دور در دقیقه میزان شاخص جذب روغن به میزان اندکی کاهش یافت (شکل ۶-ب) که این امر ناشی از تغییرات شدید در ساختار مولکول‌های نشاسته و خواص آب‌گریزی آنها می‌باشد (Hashemi *et al.*, 2017). نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج Omohimi و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد که به بررسی اثر پارامترهای فرایندی اکستروژن بر

بررسی اثر رطوبت

در تحقیق حاضر با افزایش درصد رطوبت ورودی در اکسترودر از ۱۲ به ۱۸ درصد میزان شاخص جذب روغن کاهش یافت (شکل ۶-الف) و دلیل احتمالی این پدیده مربوط به اثر افزایش درصد رطوبت بر کاهش ویسکوزیته مواد مذاب و ژلاتیناسیون نشاسته می‌باشد. این امر به نوبه خود موجب کاهش میزان انبساط و تخلخل بافتی و در نتیجه کاهش شاخص جذب روغن می‌شود (Lazou & Krokida, 2010). افزایش میزان رطوبت در فرمولاسیون محصولات اکستروودشده سبب کاهش میزان ژلاتیناسیون نشاسته و کاهش اندازه سلول‌های هوایی شده و در نتیجه میزان جذب روغن در محصول اکستروودشده کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج بررسی Khan و Gujska (۱۹۹۰) و Kadan و همکاران (۲۰۰۳) و Stojceska و همکاران (۲۰۰۸) که به ترتیب به بررسی اثر رطوبت بر

اکستروژن شده حاوی ذرت و عدس پرداختند.

بهینه‌سازی

تکنیک بهینه‌سازی عددی به منظور بهینه‌کردن متغیرهای فرایند به کار برده شد. در این تحقیق، هدف از بهینه‌سازی تولید اسنک حجیم شده به حداقل رساندن میزان چگالی توده و سختی اسنک و حداکثر کردن نسبت انبساط بود. همچنین شاخص جذب آب، شاخص انحلال در آب و شاخص جذب روغن داخل محدوده مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌ها و اهداف بهینه‌سازی برای هر یک از متغیرها و پاسخ‌های فرایند در جدول (۴)، ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی نیز در جدول (۵) نشان داده شده است.

ویژگی‌های کیفی آنالوگ گوشت حاصل از آردلوبیای موکونا پرداختند.

در پژوهش حاضر با افزایش دما از ۱۲۰ به ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد شاخص جذب روغن افزایش یافت (شکل ۶-ج). افزایش درجه حرارت طی فرایند اکستروژن سبب افزایش درجه پخت محصولات و در نتیجه تشکیل مولکول‌های کوچک ناشی از دکستریزاسیون^۱ نشاسته گردیده و این مولکول‌های کوچک می‌تواند سبب افزایش شاخص جذب روغن گردد (Drago et al., 2007). نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج بررسی Lazou و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد که به بررسی تأثیر درجه حرارت اکستروژن روی درجه پخت و تشکیل مولکول‌های کوچک‌تر ناشی از دکستریزاسیون نشاسته محصول

جدول ۴- شاخص‌ها و اهداف بهینه‌سازی تولید اسنک بهینه

| متغیرها- پاسخها | هدف | حدود پایین | حدود بالا |
|-------------------------------------|-------------|------------|-----------|
| آرد کنجاله بنه (PDBC) (۱۰۰ گرم/گرم) | داخل محدوده | ۱۰ | ۳۰ |
| رطوبت ورودی (درصد) | داخل محدوده | ۱۲ | ۱۸ |
| سرعت چرخش ماردون (دور در دقیقه) | داخل محدوده | ۱۲۰ | ۲۲۰ |
| درجه حرارت (سانتی‌گراد) | داخل محدوده | ۱۲۰ | ۱۸۰ |
| چگالی توده (کیلوگرم بر مترمکعب) | حداقل | ۰/۰۵ | ۰/۱۴۲ |
| نسبت انبساط | حداکثر | ۲/۶ | ۵/۷۲ |
| سختی (N) | حداقل | ۱/۰۴ | ۴/۰۷ |
| شاخص جذب آب | داخل محدوده | ۲/۹۱۲ | ۶/۱۲ |
| شاخص انحلال در آب | داخل محدوده | ۱۹/۶ | ۴۶/۵ |
| شاخص جذب روغن | داخل محدوده | ۰/۷۹ | ۴/۲۴ |

جدول ۵ - نتایج به دست آمده برای بهینه‌سازی تولید اسنک حجیم شده

| متغیر مستقل | مقدار | پاسخ | مقدار |
|-------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| آرد کنجاله بنه (PDBC) (۱۰۰ گرم/گرم) | ۲۰/۱۴ | چگالی توده (کیلوگرم بر مترمکعب) | ۰/۱۰۲ |
| رطوبت ورودی (درصد) | ۱۷/۴۵ | نسبت انبساط | ۳/۸۳۳ |
| سرعت چرخش ماردون (دور در دقیقه) | ۱۶۰/۶۰ | سختی | ۲/۷۵۷ |
| درجه حرارت (سانتی‌گراد) | ۱۳۳/۲۴ | شاخص جذب آب | ۴/۶۷۷ |
| | | شاخص انحلال در آب | ۲۸/۴۶۷ |
| | | شاخص جذب روغن | ۲/۳۱۵ |

در جدول (۶)، ارائه شده‌اند. نزدیک بودن مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها، نشان می‌دهد که مدل‌های به دست آمده مناسب و قابل قبول می‌باشند.

آزمون صحت مدل^۲

جهت بررسی کفایت^۳ مدل‌های به دست آمده برای پیش‌بینی هر یک از پاسخ‌ها در شرایط بهینه تولید اسنک حجیم شده، آزمون صحت انجام گردید. مقادیر به دست آمده برای هر یک از پاسخ‌ها (میانگین ۳ تکرار)

^۱ Dextrinization

^۲ Validation test

^۳ Adequacy

جدول ۶- مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی پاسخ‌ها در شرایط بهینه تولید اسنک حجیم‌شده

| مقدار واقعی (آزمایش) | مقدار پیش‌بینی‌شده (مدل) | پاسخ |
|----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| ۰/۰۹۸±۰/۰۰۸ | ۰/۱۰۲ | چگالی توده (کیلوگرم بر مترمکعب) |
| ۳/۴۹±۰/۱۲ | ۳/۸۳۳ | نسبت انبساط |
| ۲/۶۲±۰/۰۳ | ۲/۷۵۷ | سختی |
| ۴/۲۳±۰/۰۸ | ۴/۶۷۷ | شاخص جذب آب |
| ۲۶/۸±۰/۶ | ۲۸/۴۶۷ | شاخص انحلال در آب |
| ۲/۱۸±۰/۰۱ | ۲/۳۱۵ | شاخص جذب روغن |

نتیجه‌گیری

(۲۱/۱۴ درصد)، رطوبت ورودی (۱۷/۴۵ درصد)، سرعت چرخش ماردون (۱۶۰ دور در دقیقه) و دما (۱۳۳/۲ درجه سانتی‌گراد) به‌عنوان تیمار بهینه انتخاب شد.

ایده افزودن PDBC به محصول اکستروژن‌شده بر پایه ذرت به دلیل نیاز به بهینه‌سازی خواص فیزیکی و عملکردی محصولات تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. در بین متغیرهای مستقل انتخابی، سطح PDBC

منابع

- Altan, A., & Maskan, M. (2011). *Development of extruded foods by utilizing food industry by-products*. *Advances in Food Extrusion Technology*. (pp. 121-160). CRC Press, Boca Raton, FL
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2008b). Twin-screw extrusion of barley-grape pomace blends: extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions. *Journal of Food Engineering*, 89(1), 24-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.025>
- Altan, A., McCarthy, K.L., & Maskan, M. (2008a). Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(9), 1648-1659. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.3262>
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F., & Griffin, E.L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14, 4-12.
- Arhaliass, A., Bouvier, J. M., & Legrand, J. (2003). Melt growth and shrinkage at the exit of the die in the extrusion-cooking process. *Journal of Food Engineering*, 60(2), 185-192. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00039-6)
- Association of official analytical chemists (AOAC). (2005). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 18th ed. Gaithersburg.
- Badrie, N., & Mellows, W.A. 1991. Effect of extrusion variables on cassava extrudates. *Journal of Food Science*, 56(5), 1334-1337. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb04766.x>
- Bhattacharya, S. (1997). Twin-screw extrusion of rice-green gram blend: extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering*, 32(1), 83-99. doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00004-6)
- Camire, M.E., & Flint, S.L. (1991). Thermal processing effects on dietary fiber composition and hydration capacity in corn meal, oat meal and potato peels. *Cereal Chemistry*, 68(6), 645-647.
- Camire, M.E., & King, C.C. (1991). Protein and fiber supplementation effects on extruded cornmeal snack quality. *Journal of Food Science*, 56(3), 760-763. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb05376.x>
- Capriles, V.D., Soares, R.A.M., Pinto e Silva, M.E.M., & Arêas, J.A.G. (2009). Effect of fructans-based fat replacer on chemical composition, starch digestibility and sensory acceptability of corn snacks. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(10), 1895-1901. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01915.x>
- Chang, Y.K., Silva, M.R., Gutkoski, L.C., Sebio, L., & Da Silva, M.A.A.P. (1998). Development of extruded snacks using jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart) flour and cassava starch blends. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78(1), 59-66. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199809\)78:1<59::AID-JSFA87>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199809)78:1<59::AID-JSFA87>3.0.CO;2-%23)
- Chinnaswamy, R., & Hanna, M.A. (1988). Optimum extrusion-cooking conditions for maximum expansion of corn starch. *Journal of Food Science*. 53(3), 834-836. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb08965.x>
- Colonna, P., Tayeb, J. & Mercier, F. (1989). *Extrusion cooking of starch and starchy products*. In Eds. Mercier, C., Linko, P., & Harper, J.M. St. Paul, Extrusion cooking. (pp. 247-319): MN: American Association of Cereal Chemists Inc.
- Desai, B.B., Kotecha, P.M., & Salunkhe, D.K. (1999a). *Composition and nutritional quality*. In: Introduction science and technology of groundnut: biology, production, processing and utilization. (pp.185-199): Nayaprokashpubl, New Delhi, India.
- Deshpande, H.W., & Poshadri, A. (2011). Physical and sensory characteristics of extruded snacks prepared from foxtail millet based composite flours. *International Food Research Journal*, 18(2), 751-756.

- Ding, Q.B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G., & Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 73(2), 142-148. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.013>
- Drago, S., Velasco-Gonzalez, O., Torres, R., Gonzalez, R. & Valencia, M. (2007). Effect of the extrusion on functional properties and mineral dialyzability from phaseolus vulgaris bean flour. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(2), 43-48. doi: <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0033-5>
- Farhoosh, R., & Tavakoli, J. (2008). Chemical composition and oxidative stability of kernel oils from two current subspecies of *pistacia atlantica* in Iran. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85, 723-729. doi: <https://doi.org/10.1007/s11746-008-1258-2>
- Gomez, M.H., & Aguilera, J.M. (1983). Changes in the starch fraction during extrusion-cooking of corn. *Journal of Food Science*, 48(2), 378-381. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb10747.x>
- Gopalakrishna, A.G. (2007). Edible oilseed, oil and meal need for quality control. *Beverage Food World*, 34(1), 42-44.
- Guha, M., Ali, S.Z., & Bhattacharya, S. (1997). Twin-screw extrusion of rice flour without a die: effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. *Journal of Food Engineering*, 32(3), 251-267. doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00028-9)
- Gujjska, E., & Khan, K. (1990). Effect of temperature on properties of extrudates from high starch fractions of navy, pinto and garbanzo beans. *Journal of Food Science*, 55(2), 466-469. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06788.x>
- Gujjska, E., & Khan, K. (1991). Functional properties of extrudates from high starch fractions of navy and pinto beans and corn meal blended with legume high protein fractions. *Journal of Food Science*, 56(2), 431-435. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb05297.x>
- Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 38-46. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.09.003>
- Hashemi, N., Mortazavi, S.A., Milani, E., & Tabatabai Yazdi, F. (2017). Microstructural and textural properties of puffed snack prepared from partially defatted almond powder and corn flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13210. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.13210>
- Hashimoto, J.M., & Grossmann, M.V.E. (2003). Effects of extrusion conditions on quality of cassava bran/cassava starch extrudates. *International Journal of Food Science & Technology*, 38(5), 511-517. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2003.00700.x>
- Hsieh, F., Mulvaney, S. J., Huff, H. E., Lue, S., & Brent Jr, J. (1989). Effect of dietary fiber and screw speed on some extrusion processing and product variables. *LWT-Food science and technology*, 53(1), 561-570.
- Jin, Z., Hsieh, F., & Huff, H.E. (1995). Effects of soy fiber, salt, sugar and screw speed on physical properties and microstructure of corn meal extrudate. *Journal of Cereal Science*, 22(2), 185-194. doi: [https://doi.org/10.1016/0733-5210\(95\)90049-7](https://doi.org/10.1016/0733-5210(95)90049-7)
- Kadan, R.S., Bryant, R.J., & Pepperman, A.B. (2003). Functional properties of extruded rice flour. *Journal of Food Science*, 68(5), 1669-1672. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb12311.x>
- Khanal, R.C., Howard, L.R., Brownmiller, C.R., & Prior, R.L. (2009). Influence of extrusion processing on procyanidin composition and total anthocyanin contents of blueberry pomace. *Journal of Food Science*, 74(2), H52-H58. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01063.x>
- Kokini, J.L., Chang, C.N. & Lai, L.S. (1992). *The role of rheological properties on extrudate expansion*. Eds. J.L., Kokini, C.-T., Ho and M.V. Karwe. In Food extrusion science and technology. (pp. 631-653): New York, Marcel Dekker Inc.
- Koksel, H., Ryu, G.H., Ozboy-Ozbas, O., Basman, A., & Ng, P.K.W. (2003). Development of a bulgur-like product using extrusion cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(7), 630-636. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.1358>
- Larrea, M.A., Chang, Y.K., & Martinez-Bustos, F. (2005). Some functional properties of extruded orange pulp and its effect on the quality of cookies. *LWT-Food Science and Technology*, 38(3), 213-220. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.05.014>
- Lazou, A., & Krokida, M. (2010a). Functional properties of corn and corn-lentil extrudates. *Food Research International*, 43(2), 609-616. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.017>
- Lazou, A., & Krokida, M. (2010b). Structural and textural characterization of corn-lentil extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 392-408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.024>
- Li, S.Q., Zhang, H.Q., Tony Jin, Z., & Hsieh, F.H. (2005). Textural modification of soya bean/corn extrudates as affected by moisture content, screw speed and soya bean concentration. *International Journal of Food Science & Technology*, 40(7), 731-741. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00993.x>
- Lue, S., Hsieh, F., & Huff, H.E. (1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chemistry*, 68(3), 227-234.
- Mendonca, S., Grossmann, M.V.E., & Verhé, R. (2000). Corn bran as a fibre source in expanded snacks. *LWT-Food Science and Technology*, 33(1), 2-8. doi: <https://doi.org/10.1006/fstl.1999.0601>

- Ng, A., Lecain, S., Parker, M.L., Smith, A.C., & Waldron, K.W. (1999). Modification of cell-wall polymers of onion waste: III. effect of extrusion-cooking on cell-wall material of outer fleshy tissues. *Carbohydrate Polymers*, 39(4), 341-349. doi: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00025-9)
- Obatolu Veronica, A., Omuetti Olusola, O., & Adebawale, E.A. (2006). Qualities of extruded puffed snacks from maize/soybean mixture. *Journal of Food Process Engineering*, 29(2), 149-161. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2006.00054.x>
- Omohimi, C.I., Sobukola, O.P., Sarafadeen, K.O., & Sanni, L.O. (2014). Effect of thermo-extrusion process parameters on selected quality attributes of meat analogue from mucuna bean seed flour. *Nigerian Food Journal*, 32(1), 21-30. doi: [https://doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30092-8](https://doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30092-8)
- Onwulata, C.I., Konstance, R.P., Strange, E.D., Smith, P.W., & Holsinger, V.H. (2000). High-fiber snacks extruded from triticale and wheat formulations. *Cereal Foods World*, 45(10), 470-473.
- Rayas- Duarte, P., Majewsk, K., & Doetkott, C. (1998). Effect of extrusion process parameters on the quality of buck wheat flour mixes. *Cereal Chemistry*, 75, 338- 345. doi: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.3.338>
- Riaz, M.N., Asif, M., & Ali, R. (2009). Stability of vitamins during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(4), 361-368. doi: <https://doi.org/10.1080/10408390802067290>
- Robin, F., Dubois, C., Curti, D., Schuchmann, H.P., & Palzer, S. (2011b). Effect of wheat bran on the mechanical properties of extruded starchy foams. *Food Research International*, 44(9), 2880-2888. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.041>
- Saffarzadeh, A., Vincze, L., & Csapo, J. (1999). Determination of the chemical composition of acorn (*quercusbrantii*), pistacia atlantica and pistacia khinjuk seeds as non-conventional feedstuffs. *Acta Agraria Kaposvariensis*, 3, 59-69.
- Seker, M. (2005). Selected properties of native or modified maize starch/soy protein mixtures extruded at varying screw speed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(7), 1161-1165. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2086>
- Singh, B., Sekhon, K.S., & Singh, N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. *Food Chemistry*, 100(1), 198-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.042>
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., & İbanog˘lu, S. (2008). The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology. *Journal of Cereal Science*, 47(3), 469-479. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.05.016>
- Sun, Y., & Muthukumarappan, K. (2002). Changes in functionality of soy-based extrudates during single-screw extrusion processing. *International Journal of Food Properties*, 5(2), 379-389. doi: <https://doi.org/10.1081/JFP-120005793>
- Tahvonen, R., Hietanen, A., Sankelo, T., Kortenieniemi, V.M., Laakso, P., & Kallio, H. (1998). Black currant seeds as a nutrient source in breakfast cereals produced by extrusion cooking. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A*, 206(5), 360-363. Doi: <https://doi.org/10.1007/s002170050273>
- Van Soest, P.J., Robertson, J.B., & Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vernaza, M.G., Chang, Y.K. & Steel, C.J. (2009). Desenvolvimento de cereal matinal funcional orgânico enriquecido com farelo de maracujá: avaliação de propriedades tecnológicas. *Brazilian Journal of Food Technology*, 12, 145-154.
- Warner, K., & Knowlton, S. (1997). Frying quality and oxidative stability of high oleic corn oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(10), 1317-1322. doi: <https://doi.org/10.1007/s11746-997-0063-7>
- Wu, W., Huff, H.E., & Hsieh, F. (2007). Processing and properties of extruded flaxseed-corn puff. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31(2), 211-226. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2007.00105.x>
- Yagci, S., & Gogus, F. (2008). Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-by-products. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 122-132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.018>
- Yagci, S., & Gogus, F. (2009). Development of extruded snack from food by-products: a response surface analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 32(4), 565-586. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00232.x>
- Yanniotis, S., Petraki, A., & Soumpasi, E. (2007). Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *Journal Food Engineering*, 80, 594-599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.018>
- Yuliani, S., Torley, P.J., D'Arcy, B., Nicholson, T., & Bhandari, B. (2006). Effect of extrusion parameters on flavour retention, functional and physical properties of mixtures of starch and D-limonene encapsulated in milk protein. *International Journal Food Science Technology*, 41, 83-94. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01409.x>
- Zarzycki, P., Rzedzicki, Z., & Blaszcak, W. (2010). Application of oat whole-meal and protein components as modifiers of extrudates microstructure. *International Agrophysics*, 24(4), 397-406.

Optimization of Formulation Variables and Conditions of the Extrusion Process Large Snack Products Containing Bene cake- Flour

Behnam Fiuzy¹, Mohammad Javad Varidi^{2*}, Elnaz Milani³, Fakhri Shahidi⁴,
Mohammad Hossein Haddad Khodaparast⁴

- 1- PhD Student of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- 2- Associate Professor of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- * Corresponding author (mjvaridi@um.ac.ir)
- 3- Assistant Professor of Iranian Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran
- 4- Professor of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

In this study, response surface methodology (RSM) was used to optimize extrusion conditions, including semi-defatted Bene cake (PDBC) content(10-30%), moisture content (12-18%), temperature (120-180 °C), and screw speed (120-220 rpm). The effects of the independent variables were investigated on some physical and functional properties including bulk density(BD), expansion rate, hardness, water absorption index (WAI),water solubility index (WSI), oil absorption index (OAI). Our result revealed that the addition of PDBC improved the functional and physical properties of extruded Bene snack (EBS).BD was remarkably increased by increasing PDBC. The addition of PDBC to cornmeal increased the fiber content contrary to the starch content. It also brought about a reduction in the average size of the cells and creation of holes on the cell wall. Hardness was also increased by adding PDBC. WAI of EBS was remarkably decreased by adding PDBC. WSI of EBS increased as PDBC increased. OAI of EBS increased by increasing PDBC and extrusion temperature. Among the independent variables, bene content had the largest effect on all of the responses. 21.14% PDBC, 17.45% moisture content, 160 rpm screw speed and 133.2 °C were found to be the optimal conditions for PDBC production.

Keywords: Bulk Density, Expansion Ratio, Extrusion, Functional Properties, Texture Analysis