

تولید و بهینه‌سازی مکمل فیبری فراسودمند بر پایه فرآورده‌های جانبی توسط فناوری اکستروژن

سارا نیاستی^۱، محمدحسین حداد خداپرست^{۲*}، الناز میلانی^۳، آرش کوچکی^۴

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

۲-۴- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* نویسنده مسئول (khodaparast@um.ac.ir)

۳- استادیار، گروه پژوهشی فرآوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی، جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

چکیده

در این پژوهش، امکان استفاده از فناوری اکستروژن در تولید مکمل فیبری فراسودمند از فرآورده‌های جانبی صنایع تبدیلی گوجه‌فرنگی و برنج (تفاله گوجه‌فرنگی و سبوس برنج) بررسی شد. از طرح مرکب مرکزی چرخش‌پذیر به منظور ارزیابی متغیرهای فرایند و فرمولاسیون شامل سرعت چرخش ماریپیچ (۱۶۰-۱۲۰ دور بر دقیقه)، رطوبت (۱۸-۱۲ درصد) و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج (۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵ و ۷۵:۲۵ درصد وزنی-وزنی) استفاده شد و ویژگی‌های عملکردی و فیزیکوشیمیایی شامل شاخص جذب آب، تورم، میزان سختی و فیبر رژیمی محلول فرآورده بافت‌داده‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش همزمان متغیرهای سرعت چرخش ماریپیچ و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج، شاخص جذب آب فرآورده افزایش یافت. افزایش همزمان رطوبت و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج میزان تورم را افزایش داد. سختی بافت مکمل فیبری با افزایش سطوح افزودن تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج افزایش یافت و افزایش سرعت چرخش ماریپیچ سبب افزایش میزان فیبر رژیمی محلول گردید. مطابق نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر، شرایط بهینه فرآوری مکمل فیبری در شرایط تحت بررسی با اهداف افزایش شاخص جذب آب، تورم، میزان فیبر رژیمی محلول و کاهش سختی شامل شاخص جذب آب ۴/۶۴ گرم بر گرم، میزان تورم ۴/۶۱ میلی‌لیتر بر گرم، میزان سختی ۸۹/۰۸ نیوتن، فیبر رژیمی محلول ۱۱/۰۹ درصد، میزان رطوبت خوراک ۱۴/۰۶ درصد، نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج ۲۶/۴۳ درصد و سرعت چرخش ماریپیچ ۱۲۰ دور بر دقیقه، تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی

اکستروژن

تفاله گوجه‌فرنگی

سبوس برنج

فرآورده جانبی

مکمل فیبری

مقدمه

بشری، تمایلات عمومی در جهت تغییر در رژیم غذایی و مصرف مواد غذایی با کالری پایین و اندیس گلیسمی^۱ پایین که دارای اثرات مفید و سلامت‌بخش در بدن هستند، سوق پیدا کرده است (Bachknudsen, 2001). یکی از این تغییرات در رژیم غذایی، جای‌دادن فیبرهای

درحال حاضر، تغییر در شیوه زندگی، عدم تحرک و عادت‌های بد غذایی مخاطرات جدیدی را در سراسر دنیا به‌وجود آورده است. شیوع روزافزون چاقی، دیابت، سرطان، چربی خون، بی‌شک ارتباط مستقیمی با الگوی مصرف مواد غذایی دارد. از این‌رو، با پیشرفت علم و دانش

^۱ Glycemic Index (GI)

گوجه‌فرنگی حاوی ۲۰ درصد پروتئین، ۲۰ درصد چربی، ۵ درصد خاکستر و ۵۳ درصد فیبر رژیمی می‌باشد. پوست گوجه‌فرنگی نیز حاوی ۱۰/۸ درصد پروتئین، ۲۵/۶ درصد خاکستر، ۰/۱۶ درصد ویتامین C و ۳۰ درصد فیبر رژیمی می‌باشد (Davies & Hobson, 1981). تفاله گوجه‌فرنگی علی‌رغم دارا بودن ارزش غذایی مناسب و پتانسیل ایجاد ارزش افزوده، به‌علت عدم دسترسی به فرایند مناسب به‌صورت ضایعات دفع می‌شود.

سبوس دانه‌های غلاتی نظیر برنج، نیز یکی دیگر از منابع مهم تأمین‌کننده فیبر غذایی می‌باشد که معمولاً در ضایعات کارخانه‌های فراوری دانه‌ها وارد می‌شود. سبوس برنج به‌عنوان یک فراورده جانبی طی فرایند شالیکوبی به‌دست می‌آید و درحال حاضر در خوشبینانه‌ترین حالت عمدتاً به‌مصرف خوراک دام رسیده یا دور ریخته می‌شود. در صورتی که می‌تواند به‌عنوان یک ترکیب فراسودمند در مواد غذایی مورداستفاده قرار گیرد. سبوس برنج که از چندین جزء شامل پرکارپ^۶، لایه آلرون^۷، جنین^۸ و قسمتی از آندوسپرم^۹ نشاسته‌ای تشکیل شده، در حدود ۱۰ درصد از دانه برنج را تشکیل می‌دهد (Ghandi & Sogi, 2007). از نظر تغذیه‌ای سبوس برنج غنی از موادی نظیر پروتئین (۱۶-۱۲ درصد)، چربی (۲۲-۱۶ درصد) و فیبرخام (۱۲-۸ درصد) بوده و همچنین منبع غنی، از ویتامین‌ها و مواد معدنی (۷ درصد) نظیر تیامین، نیاسین، آلومینیوم، کلر، آهن، منیزیم، فسفر، پتاسیم، سیلیسیوم، سدیم و روی به‌حساب می‌آید (Patel Manilal, 2005). سبوس برنج حاوی ۲۹-۲۴ درصد فیبر رژیمی (فیبر رژیمی محلول ۴-۲ درصد و فیبر رژیمی نامحلول ۵/۲۴-۲۰ درصد) می‌باشد. با این وجود، از آنجاکه سبوس برنج حاوی چندین فاکتور ضدتغذیه‌ای از قبیل انواع آنزیم و فیتات است افزودن آن به فراورده‌های غذایی دارای مقبولیت کمی است (Charunuch et al., 2014). از عمده‌ترین روش‌های تثبیت و فراوری سبوس برنج با هدف غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها و کاهش میزان اسیدفیتیک انجام عملیات حرارتی است. در سال‌های اخیر فناوری اکستروژن

رژیمی به‌عنوان یکی از اجزای مواد غذایی فراسودمند می‌باشد. حضور فیبرهای رژیمی در رژیم غذایی اثرات مثبتی بر سلامت دارد به‌طوری‌که سبب کاهش بیماری‌های قلبی - عروقی، گوارشی، کلسترول خون، دیابت و سرطان روده در افراد می‌گردد (Yangilar, 2013). این ترکیبات علاوه بر اثرات مفیدی که بر سلامتی دارند، به‌دلیل ویژگی‌های تکنولوژیکی مناسب نظیر جذب آب، جذب روغن و افزایش لزجت، در صنایع غذایی نیز کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (Dhingra, 2012). فیبرها به‌عنوان جایگزین چربی در فراورده‌های گوشتی (Mansour & Khalil, 1997)، غنی‌کننده نان و فراورده‌های پخت (Hematian Sourki et al., 2013)، کنترل‌کننده کریستالیزاسیون در بستنی (Regand & Goff, 2003) و فراورده‌های لبنی استفاده می‌شوند (Soukoulis et al., 2009). آب‌میوه، مربا (Grigelmo-Miguel et al., 1999) و سوپ (Lyly et al., 2004) از دیگر فراورده‌های غنی‌شده با فیبر رژیمی هستند. میزان فیبر توصیه‌شده توسط سازمان غذا و داروی آمریکا^۱ (۲۰۰۵) جهت مصرف روزانه ۲۵ تا ۳۸ گرم در روز می‌باشد و فراورده‌هایی که تحت عنوان (غنی‌شده با فیبر) و (میزان فیبر بالا) برچسب‌زنی، به‌ترتیب باید حاوی ۲/۵ و ۵ گرم فیبر در هر وعده باشند (FDA, 2005). درحال حاضر تنوع زیادی برای مواد اولیه‌ای که فیبرهای خوراکی از آنها به‌دست می‌آید، وجود دارد. در این زمینه، فراورده‌های جانبی کارخانه‌های صنایع غذایی از اهمیت زیادی برخوردارند. فراورده‌های جانبی این کارخانه‌ها مانند تفاله میوه‌ها و یا سبوس غلات علاوه بر ارزان بودن و حجم انبوه تولید، منابعی سرشار از پروتئین، ویتامین، فیبر رژیمی و انواع ریزمغذی‌ها می‌باشند (Kosseva, 2013).

تفاله گوجه‌فرنگی منبعی غنی از فیبر رژیمی و پروتئین است که پس از فراوری گوجه‌فرنگی برای تهیه عصاره^۲، پوره^۳، رب^۴ و سس‌گوجه^۵ به‌دست می‌آید و شامل پوست، دانه گوجه‌فرنگی و مقداری پالپ است که حدود ۳ درصد وزنی گوجه‌فرنگی اولیه می‌باشد. آنالیز شیمیایی گوجه‌فرنگی نشان می‌دهد که دانه

¹ Food and Drug Administration (FDA)

² Tomato Juice

³ Tomato Puree

⁴ Tomato Paste

⁵ Tomato Ketchup

⁶ Pericarp

⁷ Aleurone

⁸ Germ

⁹ Endosperm

ویژگی‌های حلالیت در آب، جذب آب، جذب روغن، تورم و دانسیته توده فرآورده نهایی را ارزیابی کردند. متغیرهای فرایند و فرمولاسیون شامل دمای پخت اکستروژن (۱۳۵-۱۱۵ درجه سانتی‌گراد)، سرعت چرخش مارپیچ (۲۳۰-۳۵۰ دور بر دقیقه) و رطوبت خوراک (۱۸-۱۰ درصد) بود. نتایج آنها نشان داد اکستروژن تفاله پرتقال سبب بهبود کلیه ویژگی‌های عملکردی نظیر حلالیت در آب، جذب آب، تورم و دانسیته توده به استثنای جذب روغن در مقایسه با نمونه خام گردید.

Mendez-Garcia و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود به بررسی تأثیر متغیرهای فرایند اکستروژن شامل دما (۵۹/۷۷ درجه سانتی‌گراد)، رطوبت (۶۶/۸۲-۳۳/۱۸ درصد) و سرعت چرخش مارپیچ (۳۶/۸۲-۳/۱۸ دور بر دقیقه) بر خصوصیات فیبر رژیمی پسماند لیمو پرداختند. نتایج آنها نشان داد فرایند اکستروژن قابلیت تبدیل فیبر رژیمی نامحلول به فیبر رژیمی محلول در پسماند لیمو را داشت.

هدف از این پژوهش، امکان کاربرد فناوری اکستروژن در تولید مکمل فیبری فراسودمند از مخلوط فرآورده‌های جانبی حاصل از فرآوری گوجه‌فرنگی و برنج (تفاله گوجه‌فرنگی و سبوس برنج) تحت شرایط فرایند شامل سرعت چرخش مارپیچ (۱۶۰-۱۲۰ دور بر دقیقه)، رطوبت (۱۸-۱۲ درصد) و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج (۷۵-۲۵ درصد) و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی و عملکردی فرآورده نهایی شامل شاخص جذب آب، تورم، میزان سختی و فیبر رژیمی محلول و تعیین شرایط بهینه تولید مکمل فیبری فراسودمند بود.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

سبوس برنج (واریت هاشمی)، سریعاً بعد از آسیاب از یکی از کارخانه‌های شالیکوبی شهرستان رامسر (مازندران، ایران) خریداری شد. به‌منظور حذف اثرات احتمالی ناشی از انبارداری بر خصوصیات سبوس، از محصول تازه برداشت‌شده استفاده گردید. تفاله گوجه‌فرنگی از کارخانه رب گوجه‌فرنگی چین چین (مشهد، ایران) تهیه گردید.

آماده‌سازی تفاله گوجه‌فرنگی

تفاله‌ها با ضخامت ۱ سانتی‌متر در آون (مدل Stal-Astra،

به‌دلیل اعمال توأم حرارت و فشار در زمان کوتاه به روش منحصربه‌فردی در فراوری انواع سبوس در مقیاس صنعتی تبدیل شده است. طی فرایند اکستروژن مواد اولیه وارد مخلوط‌کن شده و همزمان طی حرارت‌دهی، در دمای بالا تحت تأثیر انرژی مکانیکی حاصل از سرعت چرخش بالای مارپیچ فرم‌دهی می‌شوند. عملیات مکانیکی - حرارتی طی اکستروژن موجب زلاتینه‌شدن و افزایش قابلیت هضم نشاسته، دناتوره‌شدن پروتئین‌ها، افزایش میزان فیبر رژیمی محلول و غیرفعال کردن ترکیبات نامطلوب نظیر آنزیم‌ها، میکروب‌ها و بسیاری از عوامل ضدتغذیه‌ای می‌گردد (Moscicki & van (Zuilichem, 2011). در همین راستا، Rashid و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر شرایط اکستروژن بر ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی سبوس گندم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در فرایند پخت اکستروژن میزان فیبر رژیمی کل و فیبر محلول افزایش و فیبر نامحلول کاهش می‌یابد. Charunuch و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثرات متغیرهای سطوح افزودن سبوس برنج (۲۰-۱۰ درصد)، دمای پخت اکستروژن (۱۵۰-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) و میزان رطوبت خوراک (۲۰-۱۴ درصد) در فرایند تهیه غلات صبحانه پرداخته و نشان دادند افزودن سبوس برنج به فرمولاسیون باعث افزایش میزان فیبر رژیمی کل، فیبر رژیمی نامحلول، سختی و دانسیته توده فرآورده گردید. درحالی‌که شاخص جذب آب کاهش یافت. Zhang و همکاران (۲۰۱۰)، در پژوهشی با روش سطح پاسخ به بررسی و بهینه‌یابی اثر دمای پخت، تأثیر اندازه ذرات سبوس برنج و میزان رطوبت بر ویژگی‌های عملکردی و میزان تولید فیبر رژیمی محلول سبوس برنج پرداختند. نتایج آنها نشان داد شرایط بهینه شامل اندازه ذرات سبوس برنج (۰/۱۷۵ میلی‌متر)، میزان رطوبت (۳۳ درصد)، و دمای اکستروژن (۱۶۴ درجه سانتی‌گراد) بود و هر ۳ فاکتور اندازه ذرات سبوس برنج، میزان رطوبت و دمای پخت به‌طور چشمگیری میزان فیبر رژیمی محلول را افزایش دادند. فرایند اکستروژن ویژگی‌های عملکردی سبوس برنج شامل ظرفیت نگهداری آب، ظرفیت جذب روغن و میزان فیبر رژیمی محلول را بهبود بخشید. Huang و Ma (۲۰۱۶) در پژوهشی تفاله پرتقال را در یک اکستروژن تک‌مارپیچی فرایند کرده و

نسبت طول به قطر (L/D) ۱۵ میلی‌متر و قطر روزنه خروجی، ۴ میلی‌متر استفاده گردید. دامنه سرعت چرخش مارپیچ (۱۶۰-۱۲۰ دور بر دقیقه)، سرعت ورود خوراک و دمای فرایند ثابت و به ترتیب برابر ۴۰ کیلوگرم بر ساعت و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. نمونه‌های اکستروژده شده تولیدی پس از جمع‌آوری، در آن هوای داغ (مدل Stal-Astra، ساخت آمریکا) به مدت ۲ ساعت در ۴۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت نهایی ۲-۳ درصد، خشک و توسط آسیاب برقی (مدل A11، ساخت آلمان) خرد شده و با عبور از الک با مش ۴۰ (۴۲۰ میکرون) دانه‌بندی گردیدند و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی و تا انجام آزمایش‌ها در یخچال نگهداری شدند (Selani et al., 2014; Potter et al., 2013).

آزمایش‌های عملکردی و فیزیکوشیمیایی فراورده نهایی

اندازه‌گیری شاخص جذب آب^۱

به منظور اندازه‌گیری شاخص جذب آب از روش تغییر یافته Cheung و Wong (۲۰۰۴) استفاده شد. به این منظور ۱ گرم نمونه با ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر درون لوله‌های سانتریفیوژ از پیش توزین شده مخلوط و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط نگهداری شد سپس نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دور ۳۰۰۰×g سانتریفیوژ شدند. در انتها مایع رویی حاصل از سانتریفیوژ جدا شده و ژل باقی مانده توزین شد و شاخص جذب آب از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\text{شاخص جذب آب} = \frac{m_g}{m_s}$$

در رابطه (۱)، m_g : وزن ژل باقی مانده بر حسب گرم و m_s : وزن نمونه بر حسب گرم می‌باشد.

اندازه‌گیری تورم

برای محاسبه تورم از روش Robertson و همکاران (۲۰۰۰) با کمی تغییر استفاده شد. ۰/۲ گرم از نمونه با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر در استوانه مدرج ریخته و به مدت

ساخت آمریکا) با دمای 50 ± 5 درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت با جریان هوای ۳ متر بر ثانیه تا رسیدن به رطوبت $3/5 \pm 0/5$ بر حسب وزن مرطوب (درصد) خشک شده سپس آسیاب (مدل A11، ساخت آلمان) و برای یکنواختی ابعاد از مش ۲۰ عبور داده شدند و پس از تعیین رطوبت در کیسه‌های پلی‌اتیلنی مقاوم به نفوذ رطوبت، بسته‌بندی و تا انجام آزمایش‌ها در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Dhungana et al., 2014).

آماده‌سازی سبوس برنج

باقی مانده دانه‌های برنج با استفاده از الک شماره ۲۰ از سبوس برنج جدا و سبوس حاصل در کیسه‌های پلاستیکی مقاوم به نفوذ رطوبت بسته‌بندی گردید و تا انجام آزمایش‌ها در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Kim et al., 1987).

آنالیز ترکیبات شیمیایی

آزمایش‌هایی که روی مواد اولیه (تفاله گوجه‌فرنگی و سبوس برنج) صورت گرفت شامل اندازه‌گیری چربی به روش سوکسله (پروانه، ۱۳۸۵)، اندازه‌گیری پروتئین به روش کج‌لدال (AOAC, 2000)، اندازه‌گیری خاکستر (AOAC, 2000)، اندازه‌گیری رطوبت (AACC, 2000) و اندازه‌گیری فیبر رژیمی محلول، نامحلول و کل (AOAC, 2000) بود.

تهیه فرمولاسیون مخلوط پایه برای اکستروژن

برای تهیه مخلوط پایه اکستروژن تفاله گوجه‌فرنگی به نسبت‌های مشخص با سبوس برنج (۷۵:۲۵)، ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ درصد وزنی:وزنی) مخلوط گردید. برای تنظیم رطوبت نمونه نهایی از فرمول مربع پیرسون استفاده شد. نمونه‌ها پس از مخلوط کردن، در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی و برای به تعادل رسیدن رطوبت، به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شدند (Selani et al., 2014).

شرایط فرایند اکستروژن

به منظور فرمولاسیون و تهیه نمونه‌های اکستروژده شده از دستگاه اکستروژر دو مارپیچی (مدل DS56، شرکت Jinan Saxin، ساخت چین) با چرخش هم‌جهت و

¹ Water Adsorption Index (WAI)

درجه سانتی‌گراد خشک و وزن آن برای محاسبه مقدار فیبر رژیمی محلول یادداشت گردید. از جمع کردن مقادیر فیبر رژیمی محلول و فیبر رژیمی نامحلول، مقدار فیبر رژیمی کل به دست آمد. تصحیح پروتئین و خاکستر با ۲ تکرار هم برای فیبر رژیمی محلول و هم برای فیبر رژیمی نامحلول انجام گردید به این ترتیب که برای تکرار اول فیبر رژیمی نامحلول (قیف شماره ۱) و برای تکرار دوم فیبر رژیمی نامحلول (قیف شماره ۲) در نظر گرفته شد به طور مثال مقدار ۰/۱ گرم (۱۰۰ میلی‌گرم) فیبر نامحلول در قیف شماره ۱ جمع‌آوری گردید و آزمون خاکستر برای این مقدار انجام شد میزان خاکستر ۵ درصد حاصل شد آزمون پروتئین برای محتویات فیبر رژیمی نامحلول جمع‌آوری شده در قیف شماره ۲ (۱۴۰ میلی‌گرم) انجام گرفت. نتیجه آزمون پروتئین ۸ درصد حاصل شد یعنی ۸ درصد از فیبر رژیمی نامحلول حاوی پروتئین است که با آنزیم پروتئاز حذف نشده است ۸ درصد ۱۴۰ میلی‌گرم ۱۱ میلی‌گرم می‌شود. قیف شماره ۱ حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم فیبر نامحلول بود. ۵ درصد خاکستر ۵ میلی‌گرم می‌شود، ۸ درصد پروتئین ۸ میلی‌گرم می‌شود. مجموعاً ۱۳ میلی‌گرم ناخالصی را از ۱۰۰ میلی‌گرم کم می‌کنیم که ۸۷ میلی‌گرم فیبر نامحلول خالص به دست می‌آید. برای قیف شماره ۲ هم همین‌طور، ۵ درصد خاکستر (۰/۰۵×۱۴۰) ۷ میلی‌گرم می‌شود، ۸ درصد پروتئین (۰/۰۸×۱۴۰) ۱۱ میلی‌گرم می‌شود، مجموعاً ۱۸ میلی‌گرم ناخالصی را از ۱۴۰ میلی‌گرم کم می‌کنیم ۱۲۲ میلی‌گرم فیبر نامحلول خالص به دست می‌آید. فیبر رژیمی محلول هم به همین صورت تصحیح گردید.

آنالیز آماری

در این پژوهش طرح مرکب مرکزی چرخش‌پذیر^۴ با ۳ متغیر مستقل و ۶ تکرار در نقطه مرکزی، جهت یافتن اثر متغیرهای مستقل (سرعت چرخش ماریچ، میزان رطوبت و سطوح افزودن تفاله گوجه‌فرنگی به سیوس برنج) بر ویژگی‌های عملکردی و فیزیکوشیمیایی مکمل فیبری مورد استفاده قرار گرفت. سطوح متغیرهای مستقل به صورت حقیقی و کد شده در جدول (۱)،

۱۲ ساعت نگهداری شد. ظرفیت تورم براساس میزان حجم ایجاد شده از نمونه پس از ۱۲ ساعت بر وزن اولیه نمونه برحسب میلی‌لیتر بر گرم محاسبه گردید.

ارزیابی بافت

برای اندازه‌گیری سختی^۱ بافت فرآورده از دستگاه آنالیز بافت (مدل TA Plus، LLOYD، ساخت انگلستان) و آزمون فشردگی^۲ استفاده شد. به این منظور نمونه پودری تا ارتفاع ۲ سانتی‌متر درون یک سیلندر توخالی به قطر ۱۲ میلی‌متر ریخته شد. یک پروب استیل به قطر ۶ میلی‌متر و طول ۳۵۰ میلی‌متر پایین آمده و نمونه را تا عمق نفوذ ۱۰ میلی‌متر فشرده نمود. بیشینه نیروی وارد شده برحسب نیوتن توسط دستگاه به‌عنوان سختی اعلام شد (Thuwapanichayanan et al., 2008).

اندازه‌گیری فیبر رژیمی محلول

اندازه‌گیری فیبر رژیمی محلول براساس روش Prosky و همکاران (۱۹۸۸) و با استفاده از کیت آنزیمی فیبر رژیمی (Bray, Megazyme، ساخت ایرلند) انجام شد (AOAC, 2000). به این منظور ابتدا ۱ گرم از نمونه در ۵۰ میلی‌لیتر فسفات بافر با pH=۶ مخلوط شده و نمونه حاصل به ترتیب با آنزیم‌های آلفا آمیلاز مقاوم به حرارت، پروتئاز و آمیلوگلوکوزیداز توسط حمام آب (مدل Memmert، ساخت آلمان) با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه گرمخانه‌گذاری شد. پس از اتمام تیمارهای آنزیمی، محتویات ظرف توسط قیف^۳ پیرکس G₂ (با اندازه منافذ ۶۰-۴۰ میکرون) متصل به پمپ خلأ فیلتر شد. فاز مابقی که از قیف عبور کرد، جداگانه جمع‌آوری شد. تفاله‌ای که روی قیف باقی‌ماند، با آب دیونیزه، اتانول ۹۵ درصد و استون شست‌وشو داده شد. سپس قیف را در آون ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت خشک و وزن آن برای محاسبه مقدار فیبر رژیمی نامحلول یادداشت گردید سپس پسایی که از قیف عبور کرده بود، با ۴ برابر حجم آن از اتانول مخلوط گردید. پس از گذشت مدت زمان ۱ ساعت، فیلتراسیون با قیف انجام شد و قیف به مدت ۵ ساعت در دمای ۱۰۵

¹ Hardness

² Compressive

³ Fritted crucible, fritted disk

⁴ Rotatable Central Composite Design (RCCD)

ارائه شده است. مدل‌های مختلفی بر داده‌های حاصل از آزمایش‌ها برازش داده شد و بهترین مدل با توجه به نتایج آنالیز واریانس انتخاب گردید. از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۷.۱.۶ جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات و رسم نمودارهای مربوط به روش سطح پاسخ استفاده شد.

ارائه شده است. مدل‌های مختلفی بر داده‌های حاصل از آزمایش‌ها برازش داده شد و بهترین مدل با توجه به نتایج آنالیز واریانس انتخاب گردید. از نرم‌افزار

جدول ۱ - سطوح متغیرهای مستقل فرایند و کدهای مربوطه

کد و سطح مربوطه			نماد ریاضی	متغیرهای مستقل
+	۰	-		
۱۶۰	۱۴۰	۱۲۰	X ₁	سرعت چرخش ماریچ (دور بر دقیقه)
۱۸	۱۵	۱۲	X ₂	رطوبت (درصد)
۷۵	۵۰	۲۵	X ₃	نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج (درصد)

مکمل فیبری در این پژوهش، از نقطه نظر میزان پروتئین، چربی، خاکستر، رطوبت، فیبر رژیمی محلول، نامحلول و کل در جدول (۲) آورده شده است.

نتایج و بحث

ترکیبات شیمیایی

ترکیب شیمیایی مواد اولیه مصرفی در فرمولاسیون

جدول ۲ - ترکیبات شیمیایی مواد اولیه مصرفی در فرمولاسیون مکمل فیبری

مواد اولیه	رطوبت (درصد)	چربی (درصد)	پروتئین (درصد)	خاکستر (درصد)	فیبر رژیمی محلول (درصد)	فیبر رژیمی نامحلول (درصد)	فیبر رژیمی کل (درصد)
سبوس برنج	۶/۰۴	۱۰/۹۹	۸/۴۵	۱۱/۸۷	۱/۲	۴۷/۸	۴۹
تفاله گوجه‌فرنگی	۵/۷۷	۱۱/۱۴	۱۳/۰۵	۳/۴۴	۲/۷۳	۵۶/۳	۵۹/۰۳

* ترکیب شیمیایی مواد اولیه براساس وزن مرطوب (درصد) گزارش شده است.

معنی‌دار، مدل برازش داده شده برای شاخص جذب آب به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$\text{رابطه (۲)}$$

$$BC + 0.47C + 0.45C + 0.412 = \text{شاخص جذب آب}$$

میزان شاخص جذب آب برای نمونه‌های تولید شده بین (۳/۳۶ تا ۵/۵۵ گرم در گرم نمونه) تعیین گردید. همچنین محدوده شاخص حلالیت در آب در این پژوهش بین ۱۲/۵ تا ۲۳ گرم در ۱۰۰ گرم نمونه بود. Larrea و همکاران (۲۰۰۵) برای پالپ پرتقال اکستروژده شده محدوده حلالیت در آب را بین ۱۳/۷۱ - ۲۹/۳۲ گرم در ۱۰۰ گرم نمونه گزارش نمودند.

در شکل (۱)، اثر همزمان دو متغیر سرعت چرخش ماریچ و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در رطوبت ثابت (۱۵ درصد) بر شاخص جذب آب نشان داده شده است. براین اساس، با افزایش سرعت چرخش ماریچ میزان شاخص جذب آب افزایش یافت. همچنین افزایش سطوح افزودن تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج

تأثیر متغیرهای شرایط فرایند و فرمولاسیون بر میزان شاخص جذب آب مکمل فیبری

ویژگی‌های آب‌پوشی^۱ فیبرها از طریق اندازه‌گیری میزان جذب آب و تورم تعیین می‌گردد و تعیین‌کننده سطح بهینه استفاده از فیبر در فرآورده‌های غذایی می‌باشند. برای مثال، از فیبرهایی با ظرفیت جذب آب بالا برای کاهش آب‌اندازی^۲، افزایش لزجت و بهبود بافت استفاده می‌شود. از نظر آماری مدل بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار برای شاخص جذب آب مکمل فیبری، مدل چندجمله‌ای درجه دوم بود ($P < 0.05$). نتایج آنالیز واریانس (جدول ۳)، نشان داد عبارتهای معنی‌دار مدل شامل اثر مستقل نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج، اثر متقابل سرعت چرخش ماریچ و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج بودند ($P < 0.05$). چنانچه مشاهده می‌شود آزمون عدم قطعیت برازش مدل بیانگر عدم معنی‌داری آن بود. با توجه به پارامترهای دارای اثر

¹ Hydration Properties

² Syneresis

اکستروژن شده بر پایه فیبر باگاس نیشکر (Martinez-Bustos et al., 2011) پسماند ترکیبی از میوه‌ها (Stojceska et al., 2010) و پالپ چغندر قند (Rouilly et al., 2006) نیز مطابقت داشت.

Huang و Ma (۲۰۱۶) افزایش در میزان فیبر رژیمی محلول تغاله پرتقال را دلیل افزایش شاخص جذب آب بیان کردند.

Zhang و Daou (۲۰۱۲) طی مطالعه خود روی خواص عملکردی و فیزیکی فیبرهای رژیمی اصلاح شده سبوس برنج روغن گیری شده بیان نمودند اکستروژن، ساختار فیبری را به دلیل برش مکانیکی، تحت فشار و حرارت باز می‌کند و باعث ایجاد گروه‌های هیدروکسیل آزاد از سلولز شده و توانایی پیوند با آب را افزایش می‌دهد.

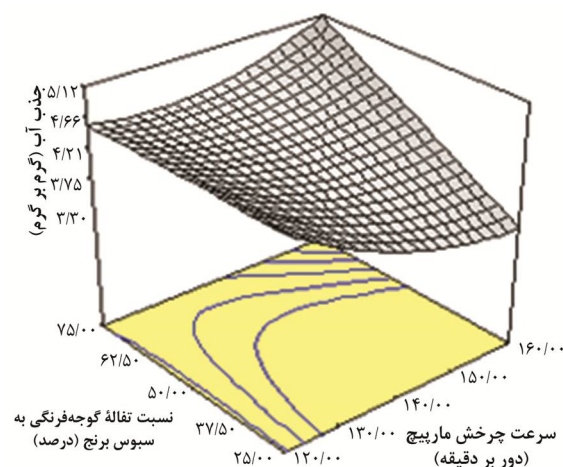
Chang و همکاران (۱۹۹۸) در پژوهش خود دنا تورا سیون پروتئین‌ها و تورم فیبرها را مسئول افزایش میزان جذب آب در فرآورده‌های اکستروژن شده حاوی آرد ذرت بیان نمودند.

نیز باعث افزایش شاخص جذب آب گردید، طوری که بیشینه این شاخص (۵/۱۳) در نسبت ۷۵ درصد تغاله گوجه‌فرنگی و سرعت چرخش مارپیچ ۱۶۰ دور بر دقیقه مشاهده شد. افزایش شاخص جذب آب نمونه‌های تولیدی با افزایش سرعت چرخش مارپیچ ممکن است به دلیل اصلاح ساختار برخی ترکیبات تغاله گوجه‌فرنگی (فیبر رژیمی) با افزایش سرعت چرخش مارپیچ اتفاق بیفتد افزایش انرژی ویژه مکانیکی^۱ در اثر افزایش سرعت چرخش مارپیچ احتمالاً ساختار فیبر را بیشتر باز کرده و باعث می‌شود آب بیشتری وارد فیبر گردد و در معرض گروه‌های آب دوست قرار بگیرد (Altan et al., 2009).

باتوجه به جدول (۲)، افزایش شاخص جذب آب با افزایش سطوح افزودن تغاله گوجه‌فرنگی ناشی از میزان پروتئین و فیبر رژیمی کل بیشتر در تغاله گوجه‌فرنگی در مقایسه با سبوس برنج بود. ترکیبات پروتئینی به واسطه خاصیت آب دوستی بیشتر سبب افزایش جذب آب می‌گردند (Yagci & Gogus, 2008). نتایج فوق با نتایج سایر محققین در مورد فرآورده‌های

جدول ۳ - نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چند جمله‌ای درجه دوم برای شاخص جذب آب (WAI)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال F
مدل	۵/۹۲	۹	۰/۱۶۶	۸/۷۰	۰/۰۰۱۱
C (نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج)	۱/۹۹	۱	۱/۹۹	۲۶/۳۲	۰/۰۰۰۴
B×C	۱/۷۳	۱	۱/۷۳	۲۲/۸۹	۰/۰۰۰۷
ضعف برازش	۰/۴۵	۵	۰/۰۹	۱/۴۵	۰/۳۴۵۶
خطا	۰/۳۱	۵	۰/۰۶۲	-	-



شکل ۱ - اثر متقابل سرعت چرخش مارپیچ و نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در رطوبت ثابت ۱۵ درصد بر میزان شاخص جذب آب مکمل فیبری

¹ Specific Mechanical Energy (SME)

تأثیر متغیرهای شرایط فرایند و فرمولاسیون بر میزان تورم مکمل فیبری

حجمی از آب که توسط وزن مشخصی از فیبر به دام می‌افتد، تورم نامیده می‌شود. تغییرات در چگونگی اثر متقابل فیبر رژیم با آب پس از فرایند اکستروژن با اندازه‌گیری تورم می‌تواند، مشاهده شود. هنگامی که آب وارد ساختار فیبر می‌شود، درشت مولکول‌ها را پراکنده می‌سازد (تورم) تا هنگامی که کاملاً پراکنده شوند. مولکول‌هایی مانند سلولز به دلیل ساختار^۱ خاص خود به پراکندگی نهایی نمی‌رسند، یعنی متورم می‌شوند اما حل نمی‌شوند (Thebaudin *et al.*, 1997). بنابراین احتمالاً آمورف شدن سلولز و ایجاد فضاهای خالی در شبکه لیگنوسلولزی^۲ سبب افزایش نفوذ آب به آن و افزایش تورم می‌شود.

مدل پیشنهادی نرم‌افزار جهت آنالیز میزان تورم مکمل فیبری، مدل چندجمله‌ای درجه اول بود. نتایج حاصل از آنالیز واریانس (جدول ۴) در این قسمت نشان داد اثر مستقل نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج ($P < 0/01$) و اثر متقابل رطوبت - نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج بر میزان تورم فرآورده اکستروژن معنی‌دار می‌باشد ($P < 0/05$).

باتوجه به متغیرهای دارای اثر معنی‌دار، مدل برازش داده شده برای تورم مکمل فیبری به صورت رابطه (۳) می‌باشد:

$$\text{تورم} = 0/44AC + 0/185C + 0/5105 = \text{میزان تورم}$$

در شکل (۲)، اثر متقابل رطوبت - نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در سرعت چرخش مارپیچ ثابت ۱۴۰ دور بر دقیقه بر میزان تورم مکمل فیبری نشان داده شده است. براین اساس، افزایش هر کدام از متغیرهای رطوبت و نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج به طور خطی باعث افزایش میزان تورم مکمل فیبری گردید. بالاترین مقدار تورم (۶/۳۸) در بالاترین مقدار نسبت تغاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج (۷۵ درصد) و بالاترین مقدار رطوبت (۱۸ درصد) مشاهده گردید.

فرایند اکستروژن به واسطه اعمال همزمان دما و نیروی برشی بالا سبب تغییر ساختار سه‌بعدی فیبر رژیمی، افزایش میزان فیبر رژیمی محلول به‌ویژه

پلی‌ساکارید پکتین در فرآورده می‌گردد همچنین با افزایش مولکول‌های محلول با زنجیره کوتاه به طور قابل توجهی بر ساختار فیبر تأثیر می‌گذارد و سبب افزایش میزان آب محصور در میان ساختار متخلخل فیبر می‌شود (Huang & Ma, 2016).

افزایش میزان تورم با افزایش نسبت تغاله گوجه‌فرنگی احتمالاً به دلیل، افزایش میزان پکتین و حضور مقادیر بیشتر گروه‌های آب‌دوست و همچنین تأثیر ویژگی‌های فیزیکی نظیر اندازه ذرات و تخلخل می‌باشد (Lopez *et al.*, 1996). در همین راستا، Zhang و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود ظرفیت تورم بالای سبوس جو دوسر اکستروژن شده را به تشکیل فراکسیون‌های فیبر رژیمی محلول، حفره‌های ریز و توسعه ساختار متخلخل آن طی فرایند اکستروژن نسبت دادند. در پژوهش دیگری اصلاح فیبر رژیمی ذرت با فرایند اکستروژن منجر به کاهش در اندازه ذرات و افزایش تخلخل و تورم گردید (Ning *et al.*, 1991).

Zhang و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی اثر فرایند اکستروژن بر ویژگی‌های فیبر رژیمی محلول سبوس جو دوسر قدرت تورم بالا را به حضور تعداد زیاد زنجیره‌های طویل فیبر رژیمی نسبت دادند.

باین حال Ralet و همکاران (۱۹۹۱) در پژوهش خود گزارش کردند فرایند اکستروژن میزان تورم نمونه‌های اکستروژن شده پالپ چغندر قند را کاهش داد علت این امر تضعیف ساختار دیواره سلولی با افزایش شدت فرایند اکستروژن (دمای بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چرخش مارپیچ بیش از ۱۵۰ دور بر دقیقه) بیان گردید.

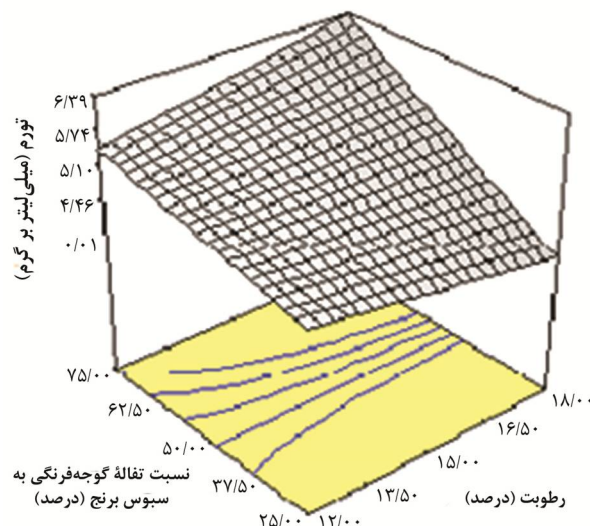
باید ذکر شود که سبوس برنج یک ترکیب لیگنوسلولزی بوده که ظرفیت نگهداری آب کمی دارد. این به دلیل حضور لیگنین و همی‌سلولز بوده که مانع ورود آب به ساختار داخلی سبوس شده و از طرفی ساختار کریستاله پلیمر سلولز نیز این امر را تشدید می‌کند (Galdeano & Grossmann, 2005). تیمار ترکیبات لیگنوسلولزی تحت شرایط فرایند اکستروژن از طریق قطع پیوندهای هیدروژنی میان و درون شاخه‌ها، باعث کاهش درجه کریستالیزاسیون سلولز می‌شود. در ساختار داخلی باز ایجاد شده، گروه‌های هیدروکسیل آزاد تمایل به برقراری پیوند با مولکول‌های آب را داشته و این امر موجب افزایش ظرفیت نگهداری آب و قابلیت تورم‌یافتگی می‌شود (Gould, 1989; Galdeano & Grossmann, 2005).

¹ Conformation

² Lignocellulosic

جدول ۴ - نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چندجمله‌ای درجه اول برای میزان تورم

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال F
مدل	۹/۹۷	۶	۱/۶۶	۸/۷۰	۰/۰۰۰۶
C (نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج)	۷/۲۳	۱	۷/۲۳	۳۷/۸۵	<۰/۰۰۰۱
A×C	۱/۵۳	۱	۱/۵۳	۸/۰۲	۰/۰۱۴۱
ضعف برازش	۲/۱۱	۸	۰/۲۶	۳/۵۱	۰/۰۹۱۴
خطا	۰/۳۷	۵	۰/۰۷۵	-	-



شکل ۲ - اثر متقابل رطوبت و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در سرعت ماریچ ثابت ۱۴۰ دور بر دقیقه بر میزان تورم مکمل فیبری

شکل (۳) مشاهده می‌شود در مقادیر بیشینه نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج (۷۵:۲۵) افزایش رطوبت سبب کاهش فاکتور سختی گردید. دلیل این پدیده را می‌توان به حضور پلی‌ساکاریدهای محلول پکتین در ساختار تفاله گوجه‌فرنگی و تأثیر آن در حفظ و نگهداری رطوبت نسبت داد. نتایج پژوهش با نتایج O'Shea و همکاران (۲۰۱۳) مبنی بر تأثیر حضور پکتین تفاله سیب اکستروژده در افزایش میزان رطوبت و کاهش سختی بافت فرآورده مطابقت داشت. باین وجود مشاهده می‌شود افزایش نسبت تفاله گوجه‌فرنگی در کمترین میزان رطوبت (۱۲ درصد) سهم بیشتری در افزایش سختی داشت در این حالت نیز میزان پکتین موجود در تفاله گوجه‌فرنگی به دلیل عدم اتصال با آب کافی سبب افزایش ضخامت دیواره سلولی گردیده و این اثر سبب افزایش سختی بافت فرآورده شده است. افزایش سختی در نتیجه افزایش پودر تفاله گوجه‌فرنگی با نتایج سایر پژوهش‌ها

تأثیر متغیرهای شرایط فرایند و فرمولاسیون بر میزان سختی بافت مکمل فیبری مطابق جدول آنالیز واریانس (جدول ۵) مدل چندجمله‌ای درجه دوم با ($P < 0.01$) بر پاسخ معنی‌دار بود. آزمون عدم قطعیت برازش مدل بیانگر عدم معنی‌داری آن بود. عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل اثر مستقل رطوبت ($P < 0.01$) و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج بودند ($P < 0.05$). معادله برازش داده‌شده برای میزان سختی به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{میزان سختی} = +11/17C - 35/64A - 86/58 =$$

میزان سختی مکمل فیبری در محدوده (۴۴ تا ۱۵۱ نیوتن) اندازه‌گیری گردید. در شکل (۳)، تأثیر مستقل رطوبت و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در سرعت ماریچ ثابت ۱۴۰ دور بر دقیقه بر میزان سختی مکمل فیبری نشان داده شده است. همان‌طور که در

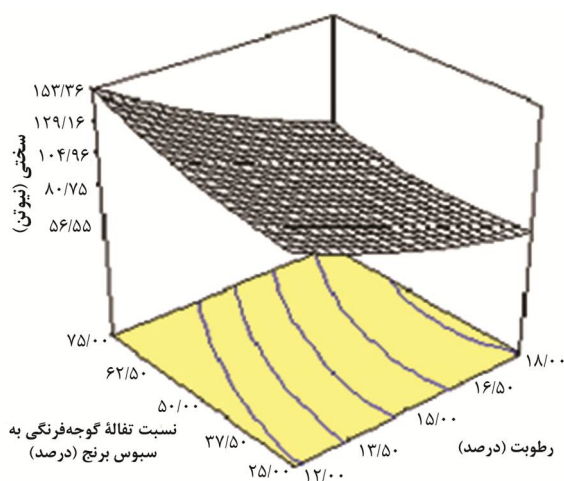
Lue و همکاران (۱۹۹۱) در پژوهش خود اثرات افزودن فیبر جو دوسر و سبوس گندم را بر ساختار درونی بلغور ذرت اکستروژده شده بررسی نمودند. مطابق نتایج؛ افزایش میزان فیبر جو دوسر سبب تولید فراورده‌های اکستروژده شده با ساختار متراکم‌تر (به هم فشرده‌تر) و میانگین اندازه سلول کوچک‌تر گردید.

مطابقت داشت (Altan et al., 2009; Kumar et al., 2010; Dhungana et al., 2014).

Moraru و Kokini (۲۰۰۳) بیان نمودند فیبرها همچنین می‌توانند مقدار آب موجود در ماتریکس را محصور کنند و دسترسی آن را کاهش و بنابراین سختی را افزایش دهند.

جدول ۵ - نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چندجمله‌ای درجه دوم برای سختی

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال F
مدل	۱۵۱۶۷/۱۶	۹	۱۶۸۵/۲۴	۹/۸۰	۰/۰۰۰۷
A (رطوبت)	۱۲۷۰۲/۱۰	۱	۱۲۷۰۲/۱۰	۷۳/۸۳	<۰/۰۰۰۱
C (نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج)	۱۲۴۷/۶۹	۱	۱۲۴۷/۶۹	۷/۲۵	۰/۰۲۲۶
A×C	۳۵۱/۱۲	۱	۳۵۱/۱۲	۲/۰۴	۰/۱۸۳۶
ضعف برازش	۱۴۶۸/۸۵	۵	۲۹۳/۷۷	۵/۸۴	۰/۰۳۷۷
خطا	۲۵۱/۶۴	۵	۵۰/۳۳	-	-



شکل ۳ - اثر متقابل رطوبت و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در سرعت چرخش مارپیچ ثابت ۱۴۰ دور بر دقیقه بر میزان سختی مکمل فیبری

عدم قطعیت برازش مدل بیانگر عدم معنی‌داری آن بود. مدل برازش داده شده برای میزان فیبر رژیمی محلول مکمل فیبری به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

رابطه (۵)

$$Y = 2/62 A - 0/77 B - 1/14 C + 10/66$$

میزان فیبر رژیمی محلول مکمل فیبری در این پژوهش در محدوده ۱۳/۹۰-۴/۹۰ درصد بود. شکل (۴)، اثر همزمان رطوبت - سرعت چرخش مارپیچ در نسبت ثابت ۵۰ درصد تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج بر

تأثیر متغیرهای شرایط فرایند و فرمولاسیون بر میزان فیبر رژیمی محلول مکمل فیبری

از نظر آماری مدل پیشنهادی نرم‌افزار برای فاکتور میزان فیبر رژیمی محلول مکمل فیبری، مدل چندجمله‌ای درجه دوم بود ($P < 0/01$). نتایج حاصل از آنالیز واریانس (جدول ۶) نشان داد که عبارت‌های معنی‌دار مدل شامل اثرات مستقل میزان رطوبت ($P < 0/01$)، سرعت چرخش مارپیچ ($P < 0/05$) و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج ($P < 0/05$)، اثر متقابل رطوبت - سرعت چرخش مارپیچ ($P < 0/01$) بودند. چنانچه مشاهده می‌شود آزمون

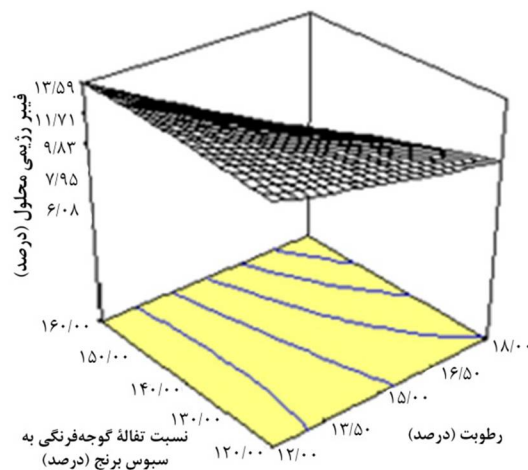
شکسته و ذرات کوچک‌تر که محلول هستند، ایجاد می‌شود. نتایج مطالعه‌های زیادی مشخص نمود که فرایند اکستروژن با اصلاح و تغییر ساختار دیواره سلولی فیبر رژیمی میوه‌ها و سبزی‌ها و تبدیل فیبر رژیمی نامحلول به فیبر رژیمی محلول سبب افزایش فیبر رژیمی محلول گردید (Huang & Ma, 2016; Galdeano et al., 2005).

Wang و همکاران (۱۹۹۳) گزارش کردند کاهش فیبر رژیمی نامحلول و افزایش فیبر رژیمی محلول در فرآورده‌های اکستروژن شده می‌تواند در نتیجه شکستن پیوندهای کووالانسی و غیر کووالانسی بین مولکول‌های پروتئین و کربوهیدرات با فیبر باشد که منجر به تشکیل قطعه‌های مولکولی کوچک‌تر و محلول‌تر می‌شود.

میزان فیبر رژیمی محلول مکمل فیبری را نشان می‌دهد. براین اساس، در بالاترین میزان سرعت چرخش ماریچ (۱۶۰ دور بر دقیقه)، با افزایش رطوبت میزان فیبر رژیمی محلول کاهش یافت. در بالاترین میزان رطوبت، افزایش سرعت چرخش ماریچ باعث افزایش میزان فیبر رژیمی محلول گردید. افزایش میزان فیبر رژیمی محلول در نتیجه افزایش سرعت چرخش ماریچ با نتایج سایر پژوهش‌ها به ترتیب برای فرآورده‌های سیوس گندم، پسماند سویا و تفاله پرتقال مطابقت داشت (Huang & Ma, 2016; Jing & Chi, 2013; Rashid et al., 2015). آنها گزارش کردند تنش برشی ایجاد شده توسط سرعت‌های ماریچ بالا باعث آسیب‌رساندن به ماکرومولکول‌های فیبر رژیمی نامحلول می‌شود که طی آن پیوندهای شیمیایی

جدول ۶ - نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چندجمله‌ای درجه دوم برای میزان فیبر رژیمی محلول

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	اندیس F	احتمال F
مدل	۹۰/۶۷	۹	۱۰/۰۷	۴۳/۱۲	<۰/۰۰۰۱
A (رطوبت)	۶۸/۶۴	۱	۶۸/۶۴	۲۹۳/۸۴	<۰/۰۰۰۱
B (سرعت ماریچ)	۵/۹۳	۱	۵/۹۳	۲۵/۳۸	۰/۰۰۰۵
C (نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سیوس برنج)	۵/۰۴	۱	۵/۰۴	۲۱/۵۸	۰/۰۰۰۹
A×B	۱۰/۳۵	۱	۱۰/۳۵	۴۴/۳۱	<۰/۰۰۰۱
ضعف برازش	۱/۹۴	۵	۰/۳۹	۴/۹۴	۰/۰۵۲۲
خطا	۰/۳۹	۵	۰/۰۷۹	-	-



شکل ۴- اثر متقابل رطوبت و سرعت چرخش ماریچ در نسبت ثابت (۵۰:۵۰ درصد) تفاله گوجه‌فرنگی به سیوس برنج بر میزان فیبر رژیمی محلول مکمل فیبری

عملکردی، فیزیکی و تغذیه‌ای مکمل فیبری فراسودمند بود. تنظیم‌های اعمال شده برای فرایند بهینه‌سازی شامل متغیرهای فرایند و فرمولاسیون (سرعت چرخش ماریچ،

بهینه‌یابی فرمولاسیون و شرایط فرایند اکستروژن جهت تولید مکمل فیبری فراسودمند در این پژوهش، هدف از بهینه‌سازی بهبود ویژگی‌های

برنج میزان تورم را افزایش داد. سختی بافت مکمل فیبری با افزایش سطوح افزودن تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج افزایش یافت و افزایش سرعت چرخش مارپیچ سبب افزایش میزان فیبر رژیمی محلول گردید. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، شرایط بهینه فرآوری مکمل فیبری در شرایط تحت بررسی با اهداف افزایش شاخص جذب آب، تورم، میزان فیبر رژیمی محلول و کاهش سختی شامل شاخص جذب آب ۴/۶۴ گرم بر گرم، میزان تورم ۴/۶۱ میلی‌لیتر بر گرم، میزان سختی ۸۹/۰۸ نیوتن و فیبر رژیمی محلول ۱۱/۰۹ درصد، میزان رطوبت خوراک ۱۴/۰۶ درصد، نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج ۲۶/۴۳ درصد و سرعت چرخش مارپیچ ۱۲۰ دور بر دقیقه، شاخص جذب آب ۴/۶۴ گرم بر گرم، میزان تورم ۴/۶۱ میلی‌لیتر بر گرم، میزان سختی ۸۹/۰۸ نیوتن و فیبر رژیمی محلول ۱۱/۰۹ درصد تعیین گردید. به‌طور کلی یافته‌های پژوهش بیانگر قابلیت مناسب فرایند اکستروژن، به‌عنوان یک فناوری مؤثر در جهت اصلاح ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی فیبر رژیمی در تولید مکمل فیبری فراسودمند از پسماندهای صنایع تبدیلی گوجه‌فرنگی و برنج (تفاله گوجه‌فرنگی و سبوس برنج) بود. فرآورده تولیدی ضمن داشتن ویژگی عملکردی مطلوب (جذب آب و تورم بالا)، غنی از فیبر رژیمی محلول می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان یک جزء فرمولاسیون در فرمول فرآورده‌های رژیمی نظیر فرآورده‌های پخت، لبنی و گوشتی به‌منظور بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و تکنولوژیکی فرآورده نهایی استفاده شود.

رطوبت خوراک و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج در محدوده آزمایش در نظر گرفته شد. ویژگی‌های فیزیکی شامل میزان سختی کمینه تنظیم گردید، ویژگی‌های عملکردی شامل شاخص جذب آب، تورم و همچنین ویژگی تغذیه‌ای میزان فیبر رژیمی محلول بیشینه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بهینه‌یابی فرمولاسیون مکمل فیبری، جهت دستیابی به شرایط بهینه، شامل میزان رطوبت خوراک ۱۴/۰۶ درصد، نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج ۲۶/۴۳ درصد و سرعت چرخش مارپیچ ۱۲۰ دور بر دقیقه، شاخص جذب آب ۴/۶۴ گرم بر گرم، میزان تورم ۴/۶۱ میلی‌لیتر بر گرم، میزان سختی ۸۹/۰۸ نیوتن و فیبر رژیمی محلول ۱۱/۰۹ درصد تعیین گردید.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی متغیرهای فرایند اکستروژن و فرمولاسیون شامل سرعت چرخش مارپیچ (۱۶۰-۱۲۰ دور بر دقیقه)، رطوبت (۱۸-۱۲ درصد) و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج (۲۵:۷۵، ۵۰:۵۰ و ۷۵:۲۵ درصد وزنی:وزنی) بر ویژگی‌های عملکردی و فیزیکوشیمیایی مکمل فیبری فراسودمند انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش همزمان متغیرهای سرعت چرخش مارپیچ و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس برنج، شاخص جذب آب فرآورده افزایش یافت. افزایش همزمان رطوبت و نسبت تفاله گوجه‌فرنگی به سبوس

منابع

- همتیان سورکی، ع، مهدویان‌مهر، ه، پورفرزاد، ا. و صداقت، ن. (۱۳۹۲). بهینه‌یابی شرایط استخراج کلیایی فیبرهای رژیمی پوست قهوه و تأثیر آن بر ویژگی‌های کیفی و ماندگاری نان بربری. *علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران*، ۸(۱)، ۱-۲۲
- AACC. (2000). *Approved Methods of the American Association of cereal Chemists*. (10th ed). St.Paul, Minnesota: American Association of cereal Chemist.
- Altan, A., McCarthy, K.L., & Maskan, M. (2009). Effect of extrusion cooking on functional properties and in vitro starch digestibility of barley-based- extrudates from fruit and vegetable by-products. *Journal of Food Science*, 74, 86-77. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01051.x>
- AOAC. (2000). Association of official analytical chemists. *Official methods of analysis*, Washington, DC.
- Knudsen, K.E.B. (2001). The nutritional significance of dietary fiber analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 90(1-2), 3-20. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00193-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00193-6)
- Chandi, G.K., & Sogi, D.S. (2007). Functional properties of rice bran protein concentrates. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 592-597. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.018>

- Chang, Y.K., Martinez-Bustos, F., & Lara, H. (1998). Effect of some extrusion variable on rheological properties and physicochemical changes of cornmeal extruded by twin screw extruder. *Brazilian Journal of chemical Engineering*, 15(4), 370-381. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-66321998000400006>
- Charunuch, C., Limsangouan, N., Prasert, W., & Wongkrajang, K. (2014). Optimization of extrusion conditions for ready-to-eat breakfast cereal enhanced with defatted rice bran. *International Food Research Journal*, 21(2), 713-722.
- Daou, C., & Zhang, H. (2011). Physico-chemical properties and Antioxidant Activities of Dietary fiber Derived from Defatted Rice Bran. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 3(5), 339-347.
- Davies, J.N., & Hobson, G.E. (1981). The constituents of tomato fruit-the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 15(3), 205-208. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398109527317>
- Dhingra, D., Michael, M., & Rajput, H. (2012). Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255-266. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5>
- Dhungana, P., Chauhan, A., & Sing, S. (2014). Evaluation of extrudate from sweetpotato flour and tomato pomace blend by extrusion processing. *African Journal of Food Science*, 8(5), 264-277. doi: <https://doi.org/10.5897/AJFS2013.1074>
- FDA. (2005). 21 CFRPart 101. Food labeling: Health claims; soluble dietary fiber from certain foods and coronary heart. *Federal Register*, 70:246.
- Galdeano, M.C., & Grossmann, M.V.E. (2005). Effect of treatment with alkaline hydrogen peroxide associated with extrusion color and hydration properties of oat hulls. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48(1), 63-72. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-89132005000100010>
- Gould, J.M. (1989). Alkaline peroxide treatment of agricultural by products. *USP Patent*, 4, 806-475.
- Grigelmo-Miguel, M., Gorinstein, S., & Martin-Belloso, O. (1999). Characterization of peach dietary fiber concentrate as a food ingredient. *Food Chemistry*, 65(2), 175-181. doi: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00190-3)
- Hematian Sourki, A., Mahdavian Mehr, H., Pourfarzad, A., & Sedaghat, N. (2013). Optimization of alkaline extraction for dietary fiber of coffee silver skin and its effect on the quality and shelf life of Iranian Barbari bread. *Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 1(30), 11-22. (in Persian)
- Huang, Y., & Ma, Y. (2016). The effect of extrusion processing on the physicochemical properties of extruded orange pomace. *Food Chemistry*, 192, 363-369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.039>
- Jing, Y., & Chi, Y. (2013). Effects of twin-screw extrusion in soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue. *Food Chemistry*, 138(2-3), 884-889. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.003>
- Kim, C.J., Byun, S.M., Cheigh, H.S., & Kwon, T.W. (1987). Optimization of extrusion rice bran stabilization process. *Journal of Food Science*, 52(5), 1355-1357. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb14081.x>
- Kosseva, M.R. (2013). *Food Industry Wastes*. (1st ed). Academic Press, Elsevier, San Diego, USA.
- Kumar, N., Sarkar, B.C., & Sharma, H.K. (2010). Development and characterization of extruded product using carrot pomace and rice flour. *International Journal of Food Engineering*, 6(3), 1-24. doi: <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1824>
- 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>
- Lopez, G., Ros, G., Rincon, F., Periago, M.J., Martinez, M.C., & Ortuno, J. (1996). Relationship between physical and Hydration properties of Soluble and Insoluble fiber of Artichoke. *Journal of Agriculture and Food chemistry*, 44(9), 2773-2778. doi: <https://doi.org/10.1021/jf9507699>

- 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.
- Lyly, M., Salmenkallio-Marttila, M., Suortti, T., Autio, K., Poutanen, K., & Lahteenmaki, L. (2004). The sensory characteristics and rheological properties of soups containing oat and barley β -glucan before and after freezing. *LWT- Food Science and Technology*, 37(7), 749-761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.02.009>
- Patel Manilal, P. (2005). Super critical fluid extraction of rice bran with adsorption on rice hull ash (Doctoral dissertation). *Louisiana: Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College*. https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1128&context=gradschool_dissertations
- Mansour, E.M., & Khalil, A.H. (1997). Characteristics of low-fat beef burger as influenced by various types of wheat fibers. *Food Research International*, 30(3-4), 199-205. doi: [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(97\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(97)00043-4)
- Martinez-Bustos, F., Viveros-Contreras, R., Galicia-Garcia, T., Nabeshima, E.H., & Verdalet-Guzman, I. (2010). Some functional characteristics of extruded blends of fiber from sugarcane bagass, whey protein concentrate, and corn starch. *Food Science and Technology*, 31(4), 870-878. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612011000400007>
- Mendez-Garcia, S., Martinez-Flores, H.E., & Marales-Sanchez, E. (2011). Effect of extrusion parameters on some properties of dietary fiber from lemon (*Citrus aurantifolia* swingle) residues. *African Journal of Biotechnology*, 10(73), 16589-16593.
- Moraru, C.I., & Kokini, J.L. (2003). Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(4), 147-165. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00020.x>
- Moscicki, L., & van Zuilichem, D. J. (2011). Extrusion-cooking and related technique. *Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability*. Wiley, Weinheim, 1-24.
- Ning, L., Villota, R., & Artz, W.E. (1991). Modification of corn fiber through chemical treatments in combination with twin-screw extrusion. *Cereal Chemistry*, 68(6), 632-636.
- O'Shea, N., Arendt, E., & Gallagher, E. (2013). Enhancing an extruded puffed snack by optimizing die head temperature, screw speed and apple pomace inclusion. *Food and Bioprocess Technology*, 7(6), 1767-1782. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1181-x>
- Potter, R., Stojceska, V., & Plunkett, A. (2013). The use of fruit powders in extruded snacks suitable for children's diets. *LWT-Food Science and Technology*, 51(2), 537-544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.015>
- Prosky, L., Asp, N.G., Schweizer, T.F., Devaries, J.W., & Furda, I. (1988). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fibre in foods and food products: interlaboratory study. *Journal of Official Analytical Chemists*, 71, 1017-1023.
- Ralet, M.C., Thibault, J.F., & Della Valle, G. (1991). Solubilization of sugar-beet pulp cell wall polysaccharides by extrusion-cooking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 24(2), 107-112.
- Rashid, S., Rakha, A., Anjum, F. M., Ahmed, W., & Sohail, M. (2015). Effect of extrusion cooking on the dietary fibre content and water solubility Index of wheat bran extrudates. *Food Science and Technology*, 50(7), 1533-1537. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12798>
- Regand, A., & Goff, H.D. (2003). Structure and ice recrystallization in frozen stabilized ice cream model systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 95-102. doi: [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00042-5)
- Robertson, J.A., de Moredon, F.D., Dysseler, P., Guillon, F., Amado, R., & Thibault, J.F. (2000). Hydration properties of dietary fiber and resistant starch: a European collaborative study. *LWT-Food Science and Technology*, 33(2), 72-79. doi: <https://doi.org/10.1006/food.1999.0595>
- Rouilly, A., Jord, J., & Rigal, L. (2006). Thermo-mechanical processing of sugar beet pulp. I. twin-screw extrusion process. *Carbohydrate Polymers*, 66(1), 81-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.02.025>

- Selani, M. M., Brazaca, S. G. C., dos Santos Dias, C. T., Ratnayake, W. S., Flores, R. A., & Bianchini, A. (2014). Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement. *Food Chemistry*, 163, 23-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.076>
- Soukoulis, C., Lebesi, D., & Tzia, C. (2009). Enrichment of rice cream with dietary fibre: Effects on rheological properties, ice crystallization and glass transition phenomena. *Food Chemistry*, 115(2), 665-671. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.070>
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A., & Ibanoglu, S. (2010). The advantage of using extrusion processing for increasing dietary fiber level in gluten- free products. *Food Chemistry*, 121(1), 156-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.024>
- Thebaudin, J.Y., Lefebvre, A.C., Harrington, M., & Bourgeois, C.M. (1997). Dietary fiberes: nutritional and technological interest. *Trends Food Science and Technology*, 8(2), 41-48. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01007-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01007-8)
- Thuwapanichayanan. R, Prachayawarakorn. S., & Soponronnarit, S. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 573-583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.008>
- Wang, W.M., Klopfenstein, C.F, & Ponte, G. (1993). Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chemistry*, 70(6), 707-711.
- Wong, K.H., & Cheung, P.C.K. (2004). Dietary fibers from mushroom sclerotia: preparation and physicochemical and functional properties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 53(24), 9395-9400. doi: <https://doi.org/10.1021/jf0510788>
- 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>
- Yangilar, F. (2013). The application of dietary fibre in food industry: structural features, effects on health and definition, obtaining and analysis of dietary fibre: a review. *Journal of Food and Nutrition Research*, 1(3), 13-23.
- Zhang, M., Bai, X., & Zhang, Z. (2011). Extrusion process improve the functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *Journal of Cereal Science*, 54(1), 98-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.001>
- Zhang, M., Liang, Y., Pei, Y., Gao, W., & Zhang, Z. (2009). Effect of process on physicochemical properties of oat bran soluble dietary fiber. *Journal of Food Science*, 74(8), 28-36. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01324.x>
- Zhang, Y., Feng, Y., Sun, L., & Wang, D.W. (2010). Optimization of extrusion technology of rice bran by response surface methodology and measurement of its physical properties [J]. *Food Science*, 20.

Production and Optimization of Functional Fiber Supplement Based on Food By-products Using Extrusion Technology

Sara Niasti¹, Mohammad Hossein Haddad Khodaparast^{2*}, Elnaz Milani³,
Arash Koocheki⁴

1- PhD Student Food Science & Technology, Department of Food Science & Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2,4- Professor, Department of Food Science & Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* Corresponding author (khodaparast@um.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Food Processing, Iranian Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran

Abstract

In this study, the use of extrusion technology in the production of functional fiber supplement from by-products of tomato and rice processing industries (tomato pomace and rice bran) was investigated. A rotatable central composite design was used to investigate the processing and formulation variables including screw speed (120-160 rpm), moisture content (12-18%) and tomato pomace to rice bran ratio (25-75%). The functional and physicochemical properties of texturized products including water absorption index (WAI), swelling (SW), hardness, and soluble dietary fiber content were evaluated. The results showed that WAI of product increased with the increasing of screw speed and tomato pomace to rice bran ratio. Increasing tomato pomace to rice bran ratio and moisture content caused an increase in swelling. The hardness of fiber supplement also increased with increasing tomato pomace to rice bran ratio. Increasing screw speed increased the content of soluble dietary fiber. According to the results, the optimized processing conditions for the production of fiber supplement with desirable properties including WAI (4.64 g/g), SW (4.61 ml/g), hardness (89.08 N) and soluble dietary fiber (11.09%) were as following, moisture content of 14.06%, tomato pomace to rice bran ratio of 26.43% and screw speed of 120 rpm.

Keywords: By-Product, Extrusion, Fiber Supplement, Rice Bran, Tomato Pomace