



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بهبود ویژگی های کیفی نان بدون گلوتن با استفاده از ایزوله پروتئین باقلا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی

سید سهیل امیری عقدایی^۱، مهران اعلمی^۲، علیرضا صادقی ماهونک^۲، مهدی کاشانی نژاد^۲

۱- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی - گرایش فناوری مواد غذایی-دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲-استاد گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

کلمات کلیدی:

نان بدون گلوتن،

ایزوله پروتئین سویا،

ایزوله پروتئین باقلا،

موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی،

کیفیت بافت نان

DOI: 10.4831/fsct.2026.117083.82909

* مسئول مکاتبات:

نان به عنوان یکی از مهم ترین فرآورده های غذایی در بسیاری از کشورها به شمار می رود. وجود پروتئین گلوتن در گندم عامل اصلی ایجاد ساختار مطلوب خمیر و بهبود ویژگی های نان است. با این حال، حذف گلوتن از فرمولاسیون نان، به دلیل ضرورت های تغذیه ای یا ملاحظات سلامت برای بیماران مبتلا به سلیاک، چالش کاهش کیفیت نان را به همراه دارد. به همین دلیل، تحقیقات گسترده ای بر استفاده از جایگزین های هیدروکلوئیدی جهت جبران نقش عملکردی گلوتن متمرکز شده است. از این رو هدف از پژوهش حاضر، بهبود ویژگی های کیفی نان بدون گلوتن با استفاده از ایزوله پروتئین باقلا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی است. به منظور تعیین تیمارهای آزمایشی، از چهار متغیر مستقل شامل مقادیر مختلف ایزوله پروتئین سویا، ایزوله پروتئین باقلا، کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی استفاده شد. پس از افزودن مواد مذکور به فرمولاسیون و تهیه نمونه ها، آزمون های فیزیکوشیمیایی، بافتی و ارزیابی حسی انجام شد. نتایج آزمون ویژگی های بافتی خمیرآبه نشان داد که افزایش سهم ایزوله های پروتئین و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی منجر به افزایش سفتی خمیرآبه می شود. به طوری که بیشترین و کمترین میزان سفتی به ترتیب در نمونه ۵ (۲ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۲ درصد ایزوله پروتئین باقلا، ۰/۲۵ درصد کربوکسی متیل سلولز، ۰/۲۵ درصد بالنگو) ۵۰۸ گرم و نمونه ۹ (۴/۷۵ درصد ایزوله پروتئین سویا و ۰/۲۵ درصد کربوکسی متیل سلولز) ۱۹ گرم مشاهده شد. استفاده از ایزوله پروتئین باقلا در مقایسه با ایزوله پروتئین سویا موجب کاهش افت پخت (کمترین میزان افت پخت مربوط به نمونه ۳ حاوی ۴ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۰/۵ درصد کربوکسی متیل سلولز، ۰/۵ درصد موسیلاژ بالنگوی شیرازی به مقدار ۲۱/۵۶ درصد) و افزایش تخلخل (بیشترین میزان تخلخل مربوط به نمونه ۷ حاوی ۴/۵ درصد ایزوله پروتئین باقلا و ۰/۵ درصد موسیلاژ بالنگوی شیرازی به مقدار ۳۱/۶ درصد) گردید. به علاوه استفاده از کربوکسی متیل سلولز در مقایسه با موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی موجب کاهش بیشتر افت پخت شد. اما در رابطه با پارامتر تخلخل، هنگام استفاده همزمان از ایزوله پروتئین سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی افزایش قابل ملاحظه در پارامتر مذکور مشاهده شد. استفاده از ایزوله پروتئین سویا موجب افزایش سفتی بافت نان (بیشترین میزان سفتی مربوط به نمونه ۱۱، حاوی ۴/۷۵ درصد ایزوله پروتئین سویا و ۰/۲۵ درصد کربوکسی متیل سلولز به مقدار ۱۳۲۸/۲۷ گرم) و بالعکس ایزوله پروتئین باقلا موجب کاهش سفتی (کمترین میزان سفتی مربوط به نمونه ۱۲، حاوی ۵ درصد ایزوله پروتئین باقلا به مقدار ۱۴۰/۱۷ گرم) نمونه ها شد. استفاده همزمان از ایزوله پروتئین سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی موجب بهبود انسجام بافت نمونه های نان بدون گلوتن شد. به لحاظ شاخص قهوه ای شدن پوسته، تأثیر ایزوله پروتئین سویا در مقایسه با ایزوله پروتئین باقلا بیشتر است. در نهایت به منظور تعیین فرمولاسیون بهینه نان بدون گلوتن، مطابق با بخش بهینه یابی نرم افزار، مقادیر ۰/۹۸۱ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۳/۵۹ ایزوله پروتئین باقلا و ۰/۴۲۲ درصد موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی بهترین فرمولاسیون جهت تهیه نان بدون گلوتن در این پژوهش است.

۱-مقدمه

نان یکی از مهم ترین مواد غذایی در رژیم غذایی انسان است، اما وجود گلوتن در ترکیب آن می تواند برای برخی افراد مشکلات جدی ایجاد کند. گلوتن، که در غلاتی مانند گندم، جو و چاودار یافت می شود، در افراد مبتلا به بیماری سلیاک یا حساسیت به گلوتن باعث واکنش های نامطلوب ایمنی و گوارشی می شود. در سال های اخیر، افزایش آگاهی از این مشکلات منجر به توسعه و تولید نان های بدون گلوتن شده است، که بتوانند جایگزین مناسبی برای افراد دارای این محدودیت غذایی باشند [۱].

نان های بدون گلوتن معمولاً با استفاده از ترکیبات جایگزینی مانند آرد برنج، آرد ذرت، نشاسته سیب زمینی و سایر مواد بدون گلوتن تولید می شوند. چالش اصلی در تهیه این نان ها، دستیابی به بافتی نرم و حجیم مشابه نان های حاوی گلوتن است، زیرا گلوتن نقش مهمی در ایجاد ساختار و خاصیت ارتجاعی خمیر دارد. برای رفع این مشکل، افزودن ترکیباتی نظیر پروتئین ها، صمغ ها، آزیم ها و بهبوددهنده های طبیعی پیشنهاد شده است [۲].

باقلا با نام علمی *Vicia faba* L. گیاهی یک ساله از خانواده Fabaceae از حبوبات مغذی است که به دلیل محتوای بالای پروتئین، فیبر، ویتامین های گروه B و مواد معدنی، مورد توجه قرار گرفته است. باقلا در ارقام مختلف دارای ۴۱-۲۱ درصد پروتئین بوده و پروتئین آن غنی از اسید آمینه لیزین است. پروتئین باقلا دارای ویژگی های عملکردی خوبی نظیر، امولسیون کنندگی، کف کنندگی و ژل کنندگی بوده و این عوامل موجب شده است، پروتئین باقلا گزینه مناسبی جهت استفاده در فرمولاسیون فرآورده های بدون گلوتن باشد [۳].

صمغ دانه بالنگوی شیرازی (*Lallemantia royleana* L.) یک هیدروکلوئید طبیعی است که از دانه های گیاه بالنگو استخراج می شود. صمغ دانه بالنگوی شیرازی با داشتن ویژگی های ژل سازی، افزایش ویسکوزیته، نگهداری آب، تثبیت امولسیون و بهبود بافت، جایگزین مناسبی برای برخی از صمغ های تجاری مانند زانتان و گوار محسوب می شود. این صمغ کاربردهای متعددی در تولید محصولات کم چرب، فرآورده های بدون گلوتن، لبنیات، سس ها و نوشیدنی های گیاهی دارد و می تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت و افزایش ماندگاری محصولات غذایی ایفا کند [۴].

پروتئین ها و صمغ ها نقش مهمی در بهبود کیفیت نان های بدون گلوتن دارند، زیرا این نان ها فاقد ترکیب بینظیر گلوتن بوده که در نان های معمولی موجب ایجاد ساختار، خاصیت کشسانی و نگهداری گاز در خمیر می شود. فقدان گلوتن در نان های بدون گلوتن، موجب تضعیف بافت داخلی نان و تسریع در بیاتی می شود. در رابطه با استفاده از پروتئین ها و صمغ ها در فرمولاسیون نان های بدون گلوتن پژوهش های متعددی صورت گرفته است. در همین راستا از منابع پروتئینی نظیر پروتئین سویا [۵]، پروتئین نخود [۶] پروتئین تخم مرغ [۷]، پروتئین شیر [۸] و صمغ هایی نظیر زانتان [۹]، گوار [۱۰]، کربوکسی متیل سلولز [۱۱] و یا ترکیبی از پروتئین ها و صمغ ها جهت بهبود ویژگی های نان بدون گلوتن استفاده شده است. از این رو با توجه به نیاز بیماران سلیاک به نان های بدون گلوتن با کیفیت و مشابه نان های حاوی گلوتن، هدف از این پژوهش، بهبود ویژگی های نان بدون گلوتن با استفاده از ایزوله پروتئین باقلا و صمغ دانه بالنگوی شیرازی است.

۲-مواد و روش ها

مواد:

آرد برنج (رقم دمسیاه)، کربوکسی متیل سلولز (ساندوز، چین)، ایزوله پروتئین سویا (یوانگ، چین)، ایزوله پروتئین باقلا (رقم مهتا)، موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی، مخمر (رضوی، مشهد)، روغن (رعنا، گلستان)، شکر (گلها - ایران)، نمک (گلها - ایران)، هیدروکسید سدیم (مجللی، ایران)، اسید کلریدریک (مجللی، ایران).

روش ها:

روش تهیه آرد برنج:

جهت تهیه آرد برنج، از برنج رقم دمسیاه کشت شده در سال زراعی ۱۴۰۲ در هنرستان کشاورزی شهید رجایی گنبدکاووس استفاده شد. بدین صورت که ابتدا ۳ کیلوگرم برنج به مدت یک ساعت در آب خیسانده شده و پس از گذشت زمان مذکور برنج آب کشی شده و پس از خروج کامل آب، با استفاده از آسیاب چکشی رومیزی (مینی بوش - ایران) آسیاب گردید. در ادامه آرد خروجی از آسیاب، درون آون (بهنود گستر تابان - ایران) با دمای ۳۵ درجه سانتی گراد با ضخامت یکسان پهن شده تا به رطوبت مناسب برسد. سپس آرد برنج حاصل از الک شماره ۸۰ عبور کرده و در نهایت در بسته های غیرقابل نفوذ به رطوبت نگهداری شد.

آماده سازی باقلا خشک:

برای آماده سازی باقلا خشک شده، ۳۰۰ کیلوگرم باقلا تازه رقم مهتا از مرکز تحقیقات کشاورزی استان گلستان تهیه و پس از خارج کردن دانه ها از غلاف و جدا کردن پوسته دانه، در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک شد (خشک کن نیمه صنعتی تام صنعت - ایران). سپس دانه های خشک شده توسط آسیاب چکشی رومیزی (مینی بوش - ایران) آسیاب شد. در نهایت آرد باقلا تهیه شده را از الک

شماره ۸۰ عبور داده و درون بسته های غیرقابل نفوذ به رطوبت ریخته و درون یخچال نگهداری شد [۱۲].

تهیه ایزوله پروتئین باقلا:

ابتدا آرد باقلا جهت چربی گیری با هگزان به نسبت ۳ به ۱ مخلوط شده و پس از چربی گیری و خشک شدن، آرد چربی گیری شده با آب مقطر به نسبت ۱ به ۱۰ ترکیب و با کمک هیدروکسید سدیم یک نرمال، pH آن به ۹/۵ رسیده و به مدت ۴۰ دقیقه در دمای اتاق با همزن مکانیکی مخلوط گردید. پس از این مرحله مخلوط به دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتیفیوژ و فاز رویی آن جمع آوری شد. مجدد مواد ته نشین شده با آب مقطر به نسبت ۱ به ۵ ترکیب شده و به مدت ۴۰ دقیقه در دمای اتاق مخلوط گردید و مخلوط حاصل به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتیفیوژ شد. فاز رویی جداسازی شده از این مرحله با فاز رویی جداسازی شده از مرحله قبل ترکیب شده و در ادامه pH مخلوط بدست آمده با استفاده از اسید کلریدریک روی ۴/۵ تنظیم شد. پروتئین رسوب کرده در این مرحله با سانتیفیوژ جداسازی شده و پس از خنثی سازی در نهایت به وسیله خشک کن انجمادی (اوپرون، کره جنوبی) خشک گردید [۱۳].

استخراج موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی:

دانه بالنگوی شیرازی از فروشگاه گیاهان دارویی شهر گرگان خریداری شده و پس از تمیز کردن و جدا کردن ناخالصی ها درون آب مقطر به نسبت ۲۰ به ۱ در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و pH برابر ۷ به مدت ۱ ساعت خیسانده شد. پس از جذب آب کامل، جداسازی موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی به وسیله عبور از اکستراکتور مجهز به صفحه چرخنده انجام شد. ماده خروجی از اکستراکتور با استفاده از پارچه صاف شده و درون خشک کن انجمادی (اوپرون -

یک درصد و ترکیب ایزوله پروتئین باقلا و ایزوله پروتئین سویا در مقادیر متغیر ۴ تا ۵ درصد استفاده شد. لازم به ذکر است با توجه به آزمایش های اولیه از کربوکسی متیل سلولز و ایزوله پروتئین سویا در فرمولاسیون نان بدون گلوتن جهت تولید نمونه شاهد استفاده شد و در ادامه با جایگزینی ایزوله پروتئین باقلا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی با هیدروکلئیدهای مذکور سایر نمونه ها تهیه شد.

کره جنوبی) به مدت ۲۴ ساعت خشک شده و در نهایت به وسیله آسیاب (آسیاب قهوه - ایران) پودر شده و در بسته های پلی اتیلنی غیر قابل نفوذ به رطوبت درون فریزر ۲۰- درجه سانتی گراد نگهداری شد [۱۴].

فرمولاسیون نان بدون گلوتن :

فرمولاسیون نان بدون گلوتن بر پایه آرد برنج در جدول ۱ نشان داده شده است. ترکیب کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی (پایدارکننده) در مقادیر متغیر صفر تا

Table 1. Formulation of gluten-free bread based on rice flour

مقدار بر حسب درصد	ترکیبات	ردیف
Amount (%)	Ingredients	No.
100	آرد برنج Rice Flour	1
150	آب Water	2
0-1	پایدارکننده Stabilizer	3
4-5	ایزوله پروتئین Protein Isolate	4
2	نمک Salt	5
8	شکر sugar	6
۱	خمیر مایه خشک فوری	7
۶	روغن	8

تشکیل خمیرآبه افزوده شده و به مدت ۳ دقیقه با دور متوسط هم زن، مخلوط گردید. روغن در مرحله انتهایی اضافه شده و به مدت یک دقیقه با دور تند مخلوط شد. خمیرآبه تشکیل شده از مرحله قبل درون قالب ها به مقدار ۴۵ گرم ریخته شده و در اتاق تخمیر (بیکن صنعت مدل BS-716F) با دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، رطوبت ۸۵ درصد به مدت ۳۵ دقیقه جهت انجام فرآیند تخمیر قرار گرفت. در نهایت پس از طی زمان تخمیر نهایی، قالب ها درون فر مجهز به هوای داغ (اونوکس

تهیه خمیرآبه و تولید نان بدون گلوتن :

جهت تهیه نان بدون گلوتن ابتدا ترکیبات مطابق با فرمولاسیون جدول شماره (۱) بر اساس مقادیر مورد نیاز توزین شد. در ادامه هیدروکلئیدها شامل پایدارکننده ها و ایزوله های پروتئین مورد استفاده در فرمول، با نصف آب ترکیب شده و جهت اختلاط و آب گیری کامل هم زده شد. سپس مواد خشک شامل آرد برنج، شکر، نمک و مخمر به مخلوط اضافه و مابقی آب فرمول جهت اختلاط کامل و

ارزیابی بافت خمیرآبه :

جهت ارزیابی بافت خمیرآبه از آزمون اکستروژن معکوس دستگاه بافت سنج (TA- Stable Microsystem Ltd – XT plus) استفاده شد. به طوری که نمونه‌های تهیه شده در ظروف مخصوص استوانه‌ای دستگاه از جنس پرسپکس با ارتفاع ۶۹ میلی‌متر ریخته شد و با استفاده از دیسک شفاف با قطر ۳۵ میلی‌متر و آداپتور آلومینیومی آزمایش انجام شد. سرعت پیش از آزمون، حین آزمون و پس از آزمون به ترتیب ۱، ۵ و ۱ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با ورود دیسک به درون نمونه و برگشت آن شاخص‌های سفتی (نیوتن)، چسبندگی (نیوتن) و قوام (نیوتن ثانیه) از منحنی نیرو- زمان بدست آمد [۱۸].

ارزیابی بافت نان بدون گلوتن :

به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های بافت نان بدون گلوتن طی فاصله زمانی ۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت بعد از پخت، از دستگاه بافت‌سنج و آزمون TPA، به روش روندا و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شد. برای سنجش بافت نان از آزمون پروفایل بافت (TPA) استفاده شد. به طوری که قطعات نان در ابعاد دو سانتی‌متر برش خورده و با استفاده پروب R۳۶ به قطر ۳۶ میلی‌متر ویژگی‌های بافتی شامل سفتی، انسجام تعیین شد [۶].

تخلخل :

به منظور ارزیابی میزان تخلخل مغز نان در فاصله زمانی ۲ ساعت پس از پخت، از روش پردازش تصویر استفاده شد. بدین منظور برشی عرضی از مغز نان تهیه گردیده و تصویربرداری شد. تصویر تهیه شده با استفاده از نرم افزار Image J و فعال کردن قسمت ۸ بیت، تصاویر سطح خاکستری ایجاد می‌نماید. سپس قسمت دودویی نرم افزار فعال شده و تصاویر دودویی مجموعه‌ای از نقاط روشن و

مدل رزلا) با دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و تزریق بخار تا حد اشباع به مدت ۳۰ دقیقه پخت شد. پس از پخت، نان‌ها از قالب خارج و به مدت یک ساعت در دمای محیط خنک شده و درون بسته بندی‌های پلی‌اتیلن غیرقابل نفوذ به رطوبت تا زمان انجام آزمایش نگهداری شد [۱۵].

افت پخت :

به منظور اندازه‌گیری افت پخت نان بدون گلوتن، میزان کاهش وزن خمیرآبه ریخته شده درون قالب پس از پخت به نسبت وزن اولیه خمیرآبه اندازه‌گیری شد. به این صورت که مقدار وزن خمیرآبه ریخته شده درون قالب و وزن نان پس از پخت در دمای محیط اندازه‌گیری شده و با استفاده از فرمول زیر میزان افت پخت محاسبه گردید [۱۶].

$$\text{افت پخت} = \frac{\text{وزن نان پس از پخت و سرد} - \text{وزن خمیرآبه}}{\text{وزن خمیرآبه}} \times 100 \quad (\text{درصد})$$

حجم مخصوص :

جهت اندازه‌گیری حجم مخصوص از روش جابجایی دانه کلزا مطابق با استاندارد AACC، ۲۰۰۰ به شماره ۷۲-۱۰ استفاده شد. در این روش استاندارد، دانسیته توده‌ای دانه کلزا تعیین شد. سپس نان درون ظرف با ابعاد و حجم مشخص همراه با دانه‌های کلزا قرار گرفته و توزین شد. در نهایت حجم مخصوص با تقسیم حجم نان بر وزن اولیه آن محاسبه گردید [۱۷].

تاریک را به عنوان شاخص تخلخل نشان می دهد که بیشتر بودن نقاط روشن نشانده تخلخل بیشتر است. در عمل با فعال کردن قسمت تجزیه و تحلیل (Analysis) نرم افزار، این نسبت محاسبه و درصد تخلخل نمونه ها ثبت می شود [۱۹].

ارزیابی رنگ (شاخص قهوه ای شدن پوسته) :

به جهت بررسی شاخص قهوه ای شدن نمونه های نان بدون گلوتن در فاصله ۳ ساعت پس از پخت تا زمان خنک شدن نمونه، از سه شاخص L^* ، a^* و b^* استفاده شد. جهت اندازه گیری شاخص های مذکور، نمونه های نان به وسیله دستگاه اسکنر تصویربرداری شد، سپس تصاویر در نرم افزار Image J نسخه پرتابل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با تغییر فضای RGB به فضای LAB در بخش Plugins، شاخص های رنگی ذکر شده محاسبه شد. در نهایت شاخص قهوه ای شدن (BI) با استفاده از روابط ریاضی زیر محاسبه شد [۲۰].

ارزیابی حسی :

برای بررسی نمونه های تهیه شده از لحاظ ویژگی های حسی مورد نظر، ارزیابی توسط ۱۳ نفر ارزیاب آموزش دیده در محدوده سنی ۱۷ تا ۴۰ سال انجام شد. ویژگی های رنگ پوسته و مغز نان، مقدار تخلخل، ظاهر، طعم، سفتی، بافت و پذیرش کلی ارزیابی و در نهایت جهت تجزیه و تحلیل نتایج از اعداد پذیرش کلی استفاده شد [۲۱].

تجزیه و تحلیل آماری :

در این پژوهش به جهت امکان سنجی قابلیت استفاده از ایزوله پروتئین باقلا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی به عنوان جایگزین ایزوله پروتئین سویا و کربوکسی متیل سلولز در فرمولاسیون نان بدون گلوتن از طرح آماری مخلوط $D-Optimal$ با ترکیب چهار متغیر شامل ایزوله پروتئین باقلا، ایزوله پروتئین سویا، موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی و کربوکسی متیل سلولز استفاده شد. ترکیب متغیرهای مذکور منجر به طرح آزمایشی با ۱۵ تیمار گردید (جدول ۲). برای نشان دادن روابط هر یک از متغیرهای وابسته با متغیرهای مستقل از معادلات

$$X = \frac{a^* + 1.75 L^*}{0.654 L^* + a^* - 3.012 b^*}$$

مناسب در مدل رگرسیونی استفاده و نتایج آن به صورت نمودار کانتور مخلوط توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت رسم شد. به منظور بررسی صحت مدل های برازش داده شد، ضریب تبیین و مقدار P تعیین شد. در طرح آماری استفاده شده، جهت بهینه یابی فرمولاسیون نان بدون گلوتن از مدل-های دو و سه درجه یک، دو و سه درجه $BI = \frac{(X - 0.31) \times 100}{0.172}$ برای برازش پاسخ های بدست آمده استفاده شد. معنی داری تیمارها در هر مدل با آنالیز واریانس در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد تعیین گردید.

Table 2. Experimental treatments according to formulation variables of gluten-free bread in the mixture design

صمغ بالنگوی شیرازی Balabgu Shirazi Mucilage (%)	کربوکسی متیل سلولز CMC (%)	ایزوله پروتئین باقلا Fava bean Protein Isolate (%)	ایزوله پروتئین سویا Soy Protein Isolate (%)	تیمار Treatment
0	0.5	4.5	0	1
0	0.25	2.375	2.375	2
0.5	0.5	0	4	3
0.5	0	0	4.5	4
0.5	0.5	2	2	5
0.25	0	0	4.75	6
0.5	0	4.5	0	7
0.25	0.5	0	4.25	8
0	0.25	4.75	0	9
0.25	0	2.375	2.375	10
0	0.25	0	4.75	11
0	0	5	0	12
0.5	0.5	4	0	13
0	0	0	5	14
0.25	0.25	4.5	0	15

ایزوله پروتئینی باقلا و سویا و همچنین موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی و کربوکسی متیل سلولز (شکل ۳) بیانگر این است که با افزایش سهم ایزوله پروتئینی سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی میزان سفتی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در شکل ۱ A- و B به وضوح مشخص است که با افزایش سهم ایزوله پروتئین سویا و پایدارکننده‌ها میزان سفتی خمیرآبه افزایش یافته است. از طرفی شکل ۱ C و D نشان می‌دهد که افزایش سهم پایدارکننده‌ها در فرمولاسیون خمیرآبه موجب افزایش میزان سفتی شده است. در این میان تأثیر موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در افزایش میزان سفتی خمیرآبه، در مقایسه با کربوکسی متیل سلولز بیشتر است. به وضوح این مورد در مقایسه نمونه ۶ و ۱۱ قابل مشاهده است. به طوری که هر دو نمونه ذکر شده دارای مقادیر مشابه ایزوله پروتئین سویا و هیدروکلئید بوده اما میزان سفتی در نمونه

۳- نتایج و بحث

ویژگی‌های بافتی خمیرآبه :

سفتی :

در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون سفتی خمیرآبه نان بدون گلوتن نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان سفتی خمیرآبه مربوط به نمونه ۵ (حاوی ایزوله پروتئین سویا ۲ درصد، ایزوله پروتئین باقلا ۲ درصد، کربوکسی متیل سلولز ۰/۵ درصد، موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی ۰/۵ درصد) ۲۰۷۳ گرم و کمترین مقدار مربوط به نمونه ۹ (ایزوله پروتئین باقلا ۴/۷۵ درصد و ۰/۲۵ کربوکسی متیل سلولز) ۱۹ گرم بدست آمد. به طور کلی نتایج اثر متقابل

۶ (حاوی موسیلاژ بالنگوی شیرازی ۵۰۸ گرم) بیشتر از نمونه ۱۱ (حاوی کربوکسی متیل سلولز ۲۷۹ گرم) است. به طور کلی صمغ ها و پروتئین ها با جذب آب و ایجاد کمپلکس با سایر ترکیبات موجود در خمیرآبه موجب افزایش سفتی آنها می شود. نتایج بدست آمده از این پژوهش با نتایج سایر پژوهش گران مطابقت داشت. در همین راستا نوریلا و همکاران [۲۲] علت افزایش سفتی خمیرآبه کیک بدون گلو تن حاوی صمغ زانتان و کربوکسی متیل سلولز را افزایش جذب آب و واکنش میان صمغ ها و پروتئین های موجود در فرمولاسیون دانستند. در پژوهشی دیگر علت افزایش سفتی خمیر کیک با افزایش میزان پروتئین های آب پنیر و ایزوله پروتئین سویا را به ویژگی های ساختاری پروتئین ها در محیط

آبی و جذب آب و تشکیل شبکه ژلی در خمیرآبه گزارش کردند. بدیهی است که افزایش مقدار صمغ و پروتئین در محیط خمیرآبه موجب تقویت شبکه ژلی شده و منجر به سفتی بافت می گردد [۲۳]. با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) هر یک از متغیرها تأثیر معنی دار بر میزان سفتی نمونه ها داشته و بیشترین تأثیر مربوط به موسیلاژ دانه بالنگو و کربوکسی متیل سلولز بود ($P < 0.01$). مدل مناسب جهت برازش نتایج حاصل از سفتی، مدل درجه دوم بوده و ضریب تبیین ۰/۹۴۸ نشان دهنده دقت مناسب مدل جهت پیشگویی روند تغییرات سفتی بر اساس تغییر مقدار متغیرهای مستقل است.

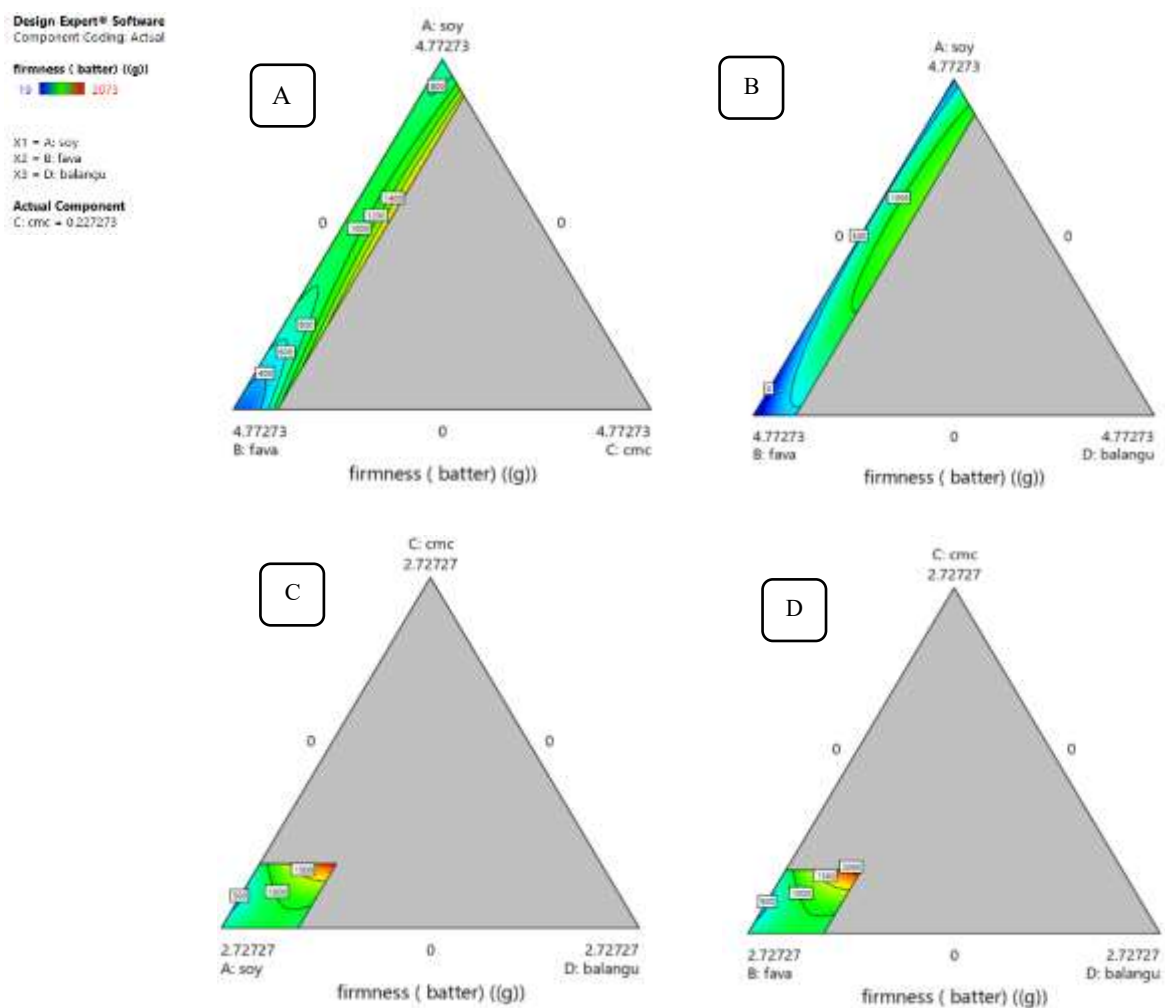


Figure 1. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Firmness of gluten-free batter.

Table 3. Experimental results of gluten-free bread samples

متغیرهای وابسته Dependent variables						متغیرهای مستقل Independent variables				
قوام خمیرآبه Batter Consistency (g.s)	چسبندگی خمیرآبه Batter Adhesiveness (g)	سفتی خمیرآبه Batter Firmness (g)	تخلخل Porosity (%)	حجم مخصوص Specific Volume (MLg ⁻¹)	افت پخت Baking Loss (%)	صمغ بالنگوی شیرازی Balabgu Shirazi Mucilage (%)	کربوکسی متیل سلولز CMC (%)	ایزوله پروتئین باقلا Fava bean Protein Isolate (%)	ایزوله پروتئین سویا Soy Protein Isolate (%)	تیمار Treatment
459	18	24	20.9	2.93	25.51	0	0.5	4.5	0	1
8267	624	348	22.4	3.87	29.20	0	0.25	2.375	2.375	2
44954	2963	1790	10.6	2.86	21.56	0.5	0.5	0	4	3
21201	1104	844	19.9	4.91	31.22	0.5	0	0	4.5	4
53749	3197	2037	22	3.27	22.06	0.5	0.5	2	2	5
12649	581	508	17.5	2.97	27.42	0.25	0	0	4.75	6
1142	49	49	31.6	3.89	28.4	0.5	0	4.5	0	7
45440	2996	1763	24.7	4.38	21.86	0.25	0.5	0	4.25	8
381	14	19	20.8	3	28.95	0	0.25	4.75	0	9
27734	1561	1110	21.8	3.6	26.4	0.25	0	2.375	2.375	10
5851	310	279	13.3	2.36	31.6	0	0.25	0	4.75	11
397	11	21	19.1	3.02	34.35	0	0	5	0	12
43250	2460	1750	23.4	2.91	23.4	0.5	0.5	4	0	13
5619	237	226	16.4	3.13	30	0	0	0	5	14
2441	143	101	13.7	4.16	24.26	0.25	0.25	4.5	0	15

Table 3 (continued). Experimental results of gluten-free bread samples پ

متغیرهای وابسته Dependent variables				متغیرهای مستقل Independent variables				
پذیرش کلی Overall acceptance	شاخص قهوه ای شدن Browning Index	انسجام Cohesiveness	سفتی نان Bread Hardness (g)	صمغ بالنگوی شیرازی Balabgu Shirazi Mucilage (%)	کربوکسی متیل سلولز CMC (%)	ایزوله پروتئین باقلا Fava bean Protein Isolate (%)	ایزوله پروتئین سویا Soy Protein Isolate (%)	تیمار Treatment
3	44.62	0.68	383.68	0	0.5	4.5	0	1
4	60.49	0.758	520.09	0	0.25	2.375	2.375	2
3	51.37	0.726	384.99	0.5	0.5	0	4	3
5	64.97	0.813	686.39	0.5	0	0	4.5	4
5	48.80	0.772	466.18	0.5	0.5	2	2	5
4	61.81	0.756	746.9	0.25	0	0	4.75	6
2	53.75	0.789	450.3	0.5	0	4.5	0	7
5	44.96	0.751	492.2	0.25	0.5	0	4.25	8
3	43.83	0.752	325.69	0	0.25	4.75	0	9
5	53.85	0.615	622.88	0.25	0	2.375	2.375	10
3	34.65	0.759	1328.27	0	0.25	0	4.75	11
2	44.64	0.323	140.17	0	0	5	0	12
4	44.71	0.700	847.13	0.5	0.5	4	0	13
3	55.26	0.692	881.94	0	0	0	5	14

3 52.93 0.673 505.57 0.25 0.25 4.5 0 15

Table 4. Predictive model for the dependent variables of gluten-free bread samples

ضرایب مدل Model coefficients										پارامترهای اندازه گیری شده Measured parameters
CD	BD	BC	AD	AC	AB	D	C	B	A	
-17091.6**	-2075.6**	-216.98	-2080.8 **	-191.15	2.28	1878.7**	180.94**	30.26**	34.03 **	افت پخت (درصد) Baking Loss(%)
-8716.6**	-417.8**	-139.99*	-406.1**	-143.2*	5.63**	387.09**	128.18**	3.08**	3.06**	حجم مخصوص (میلی لیتر/گرم) Specific Volume (MLg ⁻¹)
-4336.5*	188.7*	2192.9*	266.2	2051.04*	21.58	303.68	2020.66	19.62	16.57	تخلخل (درصد) Porosity (%)
81592.4	82347	-119000	85208	117100	2070.8*	72724**	108600**	-17.9**	352.9**	سفتی خمیرآبه (گرم) Batter Firmness (g)
116900	138000	-190000	146600	-181000	3269.1**	122500**	173200**	-26.28**	270.56**	چسبندگی خمیرآبه (گرم) Batter Adhesiveness (g)
203700	223600	-314600	231900	-3087700	53851*	197700**	287000**	-604.7**	7607**	قوام خمیرآبه (گرم.ثانیه) Batter Consistency (g.s)
53662.35	-15896	76374	-24052.3	70786.6	-389.9	18562.6**	-65746**	86.08**	1075.6**	سفتی (گرم) Bread Hardness (g)

-4.3	-13.23	-11.27	42.15*	10.95*	0.0861	14.53**	-34.27**	0.361**	0.64**	انسجام Cohesiveness
-1710**	712	969**	737	1321.6**	63.37**	-508.66**	917.07**	92.44**	54.96**	شاخص قهوه ای شدن Browning Index
327.09	248.39	-8.89	290.65	-32.42	5.89	250.62**	24.3**	1.81**	3.3**	پذیرش کلی Overall acceptance

A ایزوله پروتئین سویا؛ B ایزوله پروتئین باقلا، C کربوکسی متیل سلولز، D موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی

A- Soy Protein Isolate, B Fava bean Protein Isolate, C -CMC, D Balangu Shirazi Seed Mucilage

Table 4 (continued). Predictive model for the dependent variables of gluten-free bread samples

ضرایب مدل Model coefficients						پارامترهای اندازه گیری شده Measured parameters
R ² (adj)	R ²	BCD	ACD	ABD	ABC	
0.932	0.987	18541.07 *	17720.4 *	11.32	-106.84	افت پخت (درصد) Baking Loss (%)
0.940	0.981	10083.1 **	1011.6 **	-33.11	-0.167	حجم مخصوص (میلی لیتر/گرم) Specific Volume (MLg ⁻¹)
0.58	0.78	-	-	-	-	تخلخل (درصد) (%) Porosity
0.901	0.948	-	-	-	-	سفتی خمیرآبه (گرم) Batter Firmness(g)
0.921	0.958	-	-	-	-	چسبندگی خمیرآبه (گرم) Batter Adhesiveness (g)
0.902	0.948	-	-	-	-	قوام خمیرآبه (گرم.ثانیه) Batter Consistency (g.s)
0.717	0.851	-	-	-	-	سفتی (گرم) Bread Hardness(g)
0.8	0.859	-	-	-	-	انسجام Cohesiveness
0.99	0.997	20953 **	23095 **	-1496.8 **	647 **	شاخص قهوه ای شدن Browning Index
0.614	0.797	-	-	-	-	پذیرش کلی

A ایزوله پروتئین سویا؛ B ایزوله پروتئین باقلا، C کربوکسی متیل سلولز، D موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی

A- Soy Protein Isolate, B Fava bean Protein Isolate, C -CMC, D Balangu Shirazi Seed Mucilage

چسبندگی

کنترل چسبندگی در فرمولاسیون محصولات بدون گلوتن نیازمند تعادل دقیقی در انتخاب ترکیبات عملکردی است. انتخاب نوع و مقدار مناسب هیدروکلوئیدها نقش مهمی در این امر ایفا می کند. صمغ ها و پروتئین ها نقش بسیار مهمی در بهبود ویژگی های خمیرآبه نان بدون گلوتن بویژه در افزایش چسبندگی و الاستیسیته دارند. در شکل ۴ اثر متقابل پروتئین ها و پایدارکننده ها بر چسبندگی خمیرآبه نان بدون گلوتن نشان داده شده است. مطابق با شکل ۲- A و B، با افزایش مقدار پروتئین سویا و پایدارکننده ها، میزان چسبندگی به وضوح افزایش می یابد. در این میان تأثیر ایزوله پروتئین سویا بر چسبندگی بیشتر از ایزوله پروتئین باقلا است. شاید دلیل آنرا بتوان به خاصیت جذب آب بالا و ویژگی تشکیل ژل بالا ایزوله پروتئین سویا در مقایسه با ایزوله پروتئین باقلا دانست. در همین راستا قائمی و همکاران [۲۴] بیان کردند افزودن ایزوله پروتئین سویا، آب پنیر و صمغ دانه ریحان در فرمولاسیون کیک بدون گلوتن موجب افزایش چسبندگی خمیرآبه شد. این پژوهش گران بیان کردند افزودن هیدروکلوئیدها جذب آب را افزایش داده و ایجاد پیوند محکم بین آب و پروتئین، موجب تشکیل شبکه ای ژل مانند شده که همین موضوع موجب افزایش نیروی چسبندگی می شود. از طرفی افزایش مقدار پایدارکننده مطابق با شکل ۲- C و D، تأثیر مستقیم بر افزایش میزان چسبندگی داشت، به طوری که بیشترین میزان چسبندگی در استفاده همزمان از دو ترکیب کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی (نمونه ۵ به مقدار ۳۱۷۹ گرم) و کمترین میزان

چسبندگی در نمونه ۱۲ حاوی ۵ درصد ایزوله پروتئین باقلا به مقدار ۱۱ گرم مشاهده شد. به طور کلی در فرمولاسیون نان های بدون گلوتن، به دلیل نبود شبکه گلوتنی استفاده از صمغ ها و هیدروکلوئیدها یک روش مناسب جهت بهبود بافت و تنظیم چسبندگی خمیر است. صمغ ها به دلیل افزایش ظرفیت نگهداری آب خمیرآبه، موجب جذب و نگهداری بهتر رطوبت شده و چسبندگی خمیر را افزایش می دهند. همان طور که در شکل ۴ مشخص است، افزودن کربوکسی متیل سلولز در مقایسه با موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی تأثیر بیشتری بر چسبندگی فرمولاسیون دارد. نتایج این پژوهش با نتایج صحرائیان و همکاران [۲۵] مطابقت داشت. به طوری که این پژوهش گران بیان کردند با افزودن موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در مقادیر ۰/۲۵ - ۰/۵ درصد چسبندگی نمونه خمیرآبه کاهش یافت و با افزایش مقدار آن به ۰/۷۵ درصد، افزایش چسبندگی در نمونه ها را مشاهده کردند. علت این پدیده را افزایش ویسکوزیته فاز آبی و تشکیل ماتریکس سه بعدی توسط موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی نسبت داده اند که به نوعی آب آزاد را به دام انداخته و مانع روانی و چسبندگی بیش از حد خمیر می شود. مطابق با جدول ۴، نتایج حاصل از تجزیه واریانس، بیانگر تأثیر معنی دار هر یک از متغیرها بر چسبندگی خمیرآبه است و مدل درجه دو با ضریب تبیین ۰/۹۵۸ مدل مناسب جهت برازش داده های حاصل از این پارامتر به شمار می رود، بنابراین به خوبی جهت پیشگویی تغییرات پارامتر مذکور قابل استفاده است.

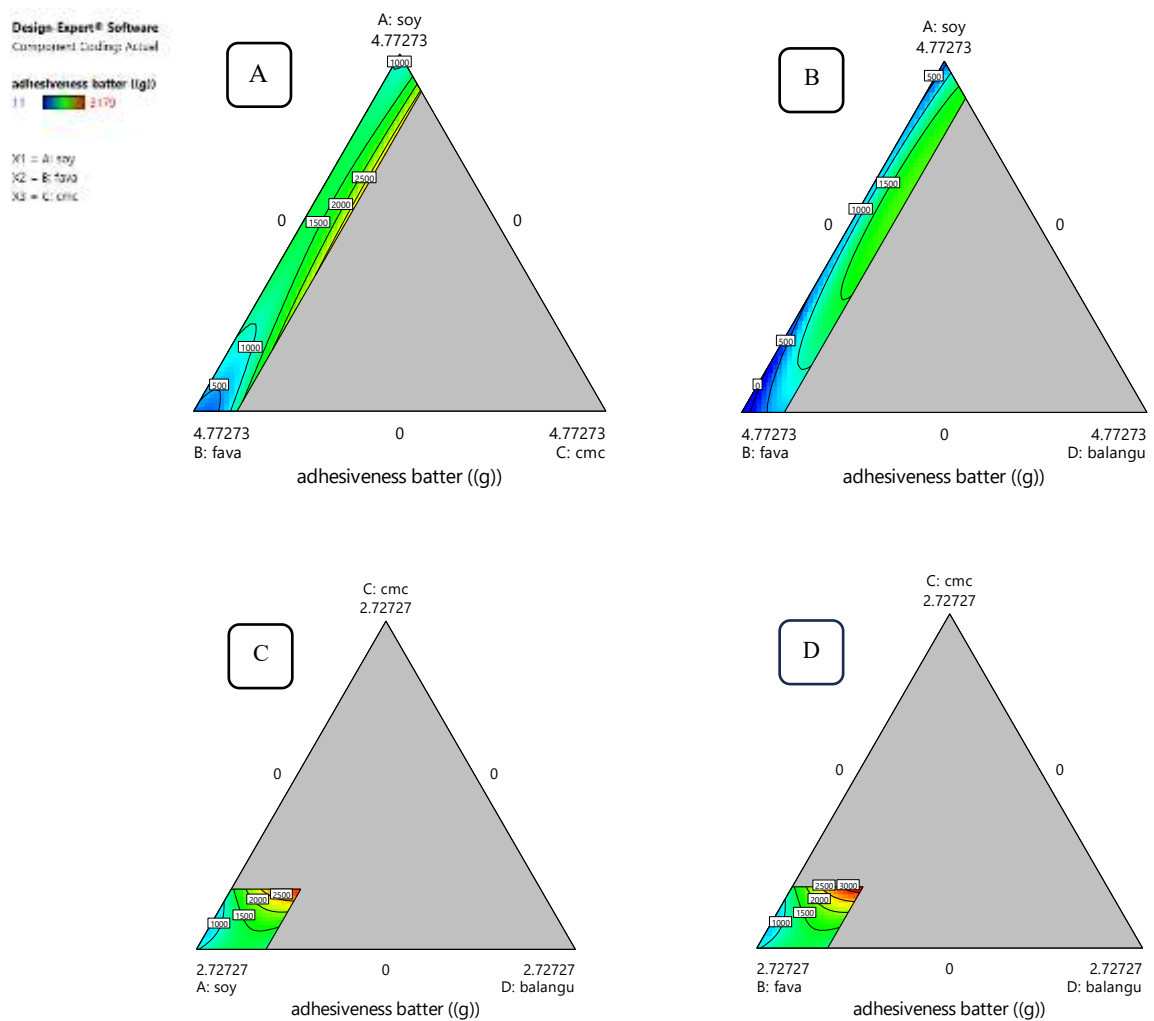


Figure 2. Contour plot of the combined effect of independent variables on the adhesiveness of gluten-free batter.

قوام

متیل سلولز) ۳۸۱ گرم ثانیه مشاهده شد. همان‌طور که در شکل ۳ (A و B) مشخص است با افزایش میزان پایدارکننده‌ها در فرمولاسیون و همچنین افزایش میزان ایزوله پروتئین سویا مقدار قوام افزایش می‌یابد. اما هنگام افزایش مقدار جایگزینی ایزوله پروتئین باقلا با ایزوله پروتئین سویا در فرمولاسیون کاهش مقدار قوام مشاهده شد.

در نان‌های بدون گلوتن قوام خمیرآبه کلید دستیابی به محصولی با بافت مناسب، حجم خوب و پذیرش حسی بالا بوده، از این رو دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. براساس نتایج جدول ۳ بیشترین میزان قوام در نمونه ۵ (۲ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۲ درصد ایزوله پروتئین باقلا، ۰/۵ درصد کربوکسی متیل سلولز، ۰/۵ درصد موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی) ۵۳۷۹۴ گرم ثانیه و کمترین میزان قوام در نمونه ۹ (۴/۷۵ درصد ایزوله پروتئین باقلا و ۰/۲۵ درصد کربوکسی

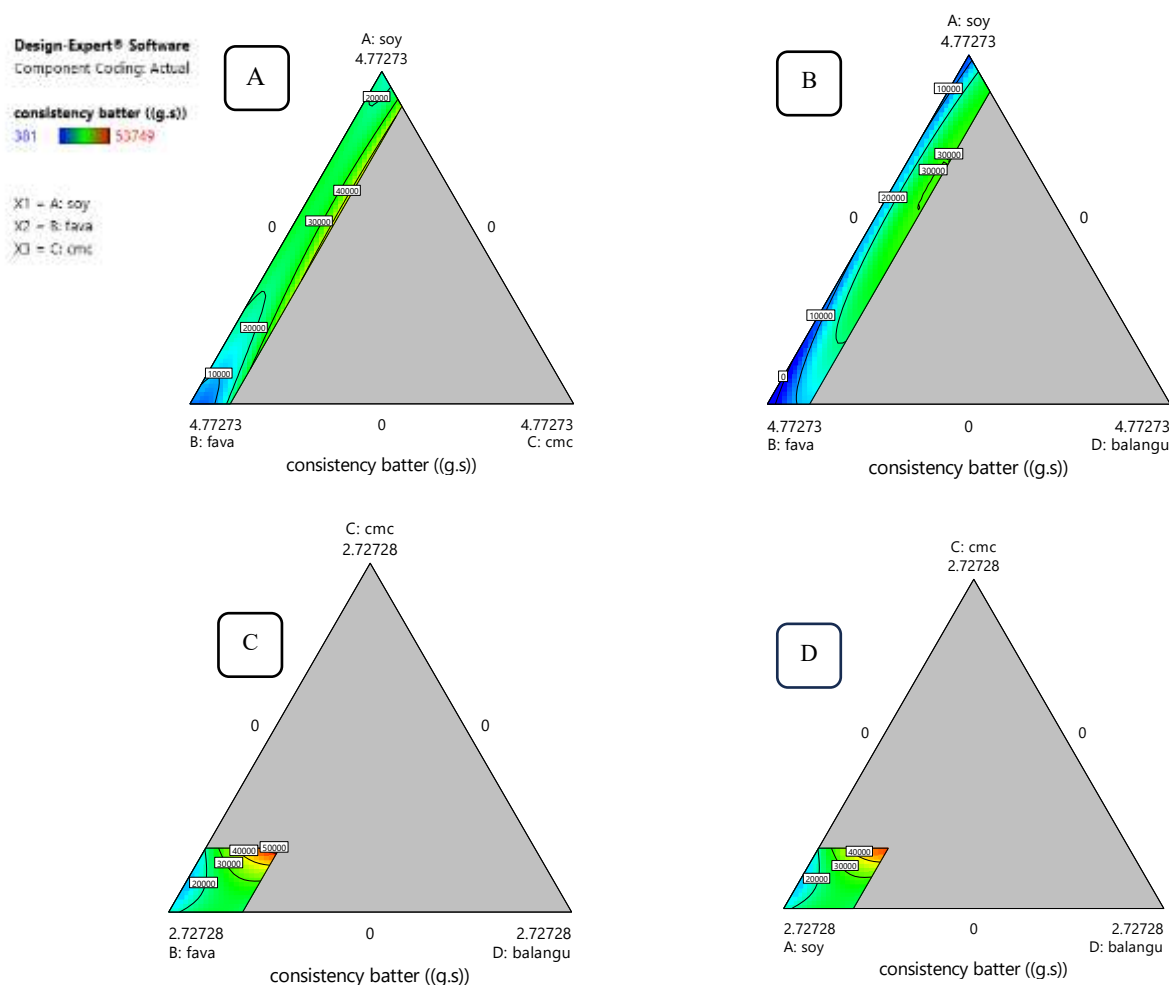


Figure 3. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Consistency of gluten-free batter.

شد [۲۷]. قائمی و همکاران [۲۴] نیز ضمن افزودن ایزوله پروتئین سویا، کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ زانتان افزایش میزان قوام در خمیرآبه کیک بدون گلوتن را گزارش کردند. این پژوهشگران بیان کردند با افزایش میزان صمغ زانتان، قوام خمیرآبه کیک بدون گلوتن افزایش یافت. با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) افزودن ایزوله پروتئین سویا و ایزوله پروتئین باقلا تاثیر معنی دار بر میزان قوام نمونه‌ها داشت ($P < 0.01$). از طرفی افزودن کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی نیز تاثیر معنی دار

دلیل افزایش قوام خمیرآبه جذب آب بیشتر توسط پایدارکننده‌ها در مقایسه با ایزوله‌های پروتئینی است. قوام مناسب خمیرآبه موجب بهبود قابلیت نگهداری گاز خمیرآبه شده و در نهایت منجر حفظ ساختار و افزایش حجم نان بدون گلوتن می‌شود. در همین راستا آردنت و ریگا [۲۶] بیان کردند، افزودن صمغ زانتان و گوار به فرمولاسیون نان بدون گلوتن موجب بهبود ویسکوزیته و قوام شده و حجم نان را افزایش می‌دهد. اما افزایش قوام بیش از حد، باعث متراکم شدن بافت نان شده و مانع افزایش حجم نان خواهد

بر میزان قوام داشت و موجب افزایش قوام گردید. در ارتباط با قوام خمیرآبه نان بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش، موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در مقایسه با کربوکسی متیل سلولز تأثیر بیشتری بر فاکتور مذکور داشت ($P < 0/01$). مدل مناسب جهت برآزش نتایج قوام خمیرآبه مدل درجه ۲ بوده و ضریب تبیین آن ۰/۹۴۸ است. مدل پیشگو به بدست آمده از نتایج قوام خمیرآبه نان بدون گلوتن، نظر به میزان ضریب تبیین بالا، به خوبی قادر به پیشگویی تغییرات این پارامتر است.

افت پخت :

افت پخت در نان بدون گلوتن به کاهش وزن ناشی از تبخیر آب و چربی در طی پخت اشاره دارد. به طور معمول هدف، کاهش افت پخت به منظور حفظ رطوبت، بافت نرم و افزایش زمان ماندگاری نان بدون گلوتن است. در این مورد هیدروکلئیدها نقش اساسی ایفاء می کنند. بررسی تأثیر ترکیب موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی، کربوکسی متیل سلولز، ایزوله پروتئین سویا و وایزوله پروتئین باقلا بر افت پخت در نان‌های بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش، نشان داد که کمترین میزان افت پخت در نمونه ۳ (۴ درصد ایزوله پروتئین سویا و ۰/۵ درصد کربوکسی متیل سلولز و ۰/۵ درصد موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی) با مقدار ۲۱/۵۶ درصد و بیشترین در نمونه ۱۲ (۵ درصد ایزوله پروتئین باقلا) با مقدار ۳۴/۳۵ درصد مشاهده شده است. این تفاوت‌ها، به وضوح، ناشی از عملکرد مؤثر ترکیب‌های هیدروکلئیدی استفاده شده در این پژوهش است. همان‌طور که در شکل ۴- A مشاهده می‌شود، با افزایش سهم مصرف ایزوله پروتئین باقلا، میزان افت پخت در مقایسه با ایزوله پروتئین سویا کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش میزان موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در فرمولاسیون نان بدون گلوتن میزان افت پخت افزایش می‌یابد (شکل ۴- B). در ادامه با افزایش میزان استفاده از کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی

شیرازی در فرمولاسیون خمیرآبه بدون گلوتن، کاهش افت پخت مشاهده شد (شکل ۴- C و D). مطابق با شکل مذکور، استفاده از کربوکسی متیل سلولز در مقایسه با موسیلاژ دانه بالنگوی شیراز تأثیر مشهودی بر کاهش میزان افت پخت دارد. شاید بتوان دلیل کاهش افت پخت در نان‌های بدون گلوتن را افزایش قابلیت نگهداری آب توسط هیدروکلئیدها و همچنین افزایش میزان ویسکوزیته و پایداری خمیرآبه در حضور ترکیبات هیدروکلئیدی نظیر ایزوله پروتئین باقلا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی و کربوکسی متیل سلولز دانست که در این شرایط قادر به حفظ رطوبت در خمیر و کاهش تبخیر در حین پخت می‌شود. نتایج مارکو و راسل (۲۰۰۸) با نتایج این پژوهش مطابقت داشت، به‌طوری‌که این پژوهش‌گران با افزودن صمغ زانتان و هیدروکسی پروپیل متیل سلولز کاهش افت پخت در نان بدون گلوتن را گزارش کردند [۱۳]. از سوی دیگر پژوهش لزاریدو و همکاران [۲۸] نشان داد استفاده از صمغ‌های زانتان، گوار و کربوکسی متیل سلولز بر یکدیگر اثر سینرژیستی داشته و باعث ایجاد کمترین افت پخت در نان‌های بدون گلوتن می‌شود. این پژوهش‌گران دلیل کاهش افت پخت را افزایش ویسکوزیته، بهبود نگهداری آب و پایداری بهتر در دمای بالا و در نتیجه کاهش نرخ تبخیر آب در حین پخت گزارش کردند. در پژوهش دیگر استفاده ترکیبی از هیدروکسی پروپیل متیل سلولز و پروتئین زئین ذرت موجب کاهش افت پخت و افزایش حجم نان بدون گلوتن شد که دلیل آنرا اثر ژل گرمایی هیدروکسی پروپیل متیل سلولز و تثبیت حباب‌های گاز توسط آن و همچنین برهمکنش غیرکوالانسی پروتئین زئین ذرت با مولکول‌های آب دانستند [۲۷]. با توجه به جدول ۴ اثر معنی‌داری هر یک از متغیرها بر فرمولاسیون مشهود بوده و مدل درجه ۳ با توجه به ضریب همبستگی بالا ($R^2 = 0/987$) مدل مناسب جهت پیشگویی تغییرات هر یک از متغیرهای مستقل و تأثیر آن‌ها بر متغیرهای وابسته است.

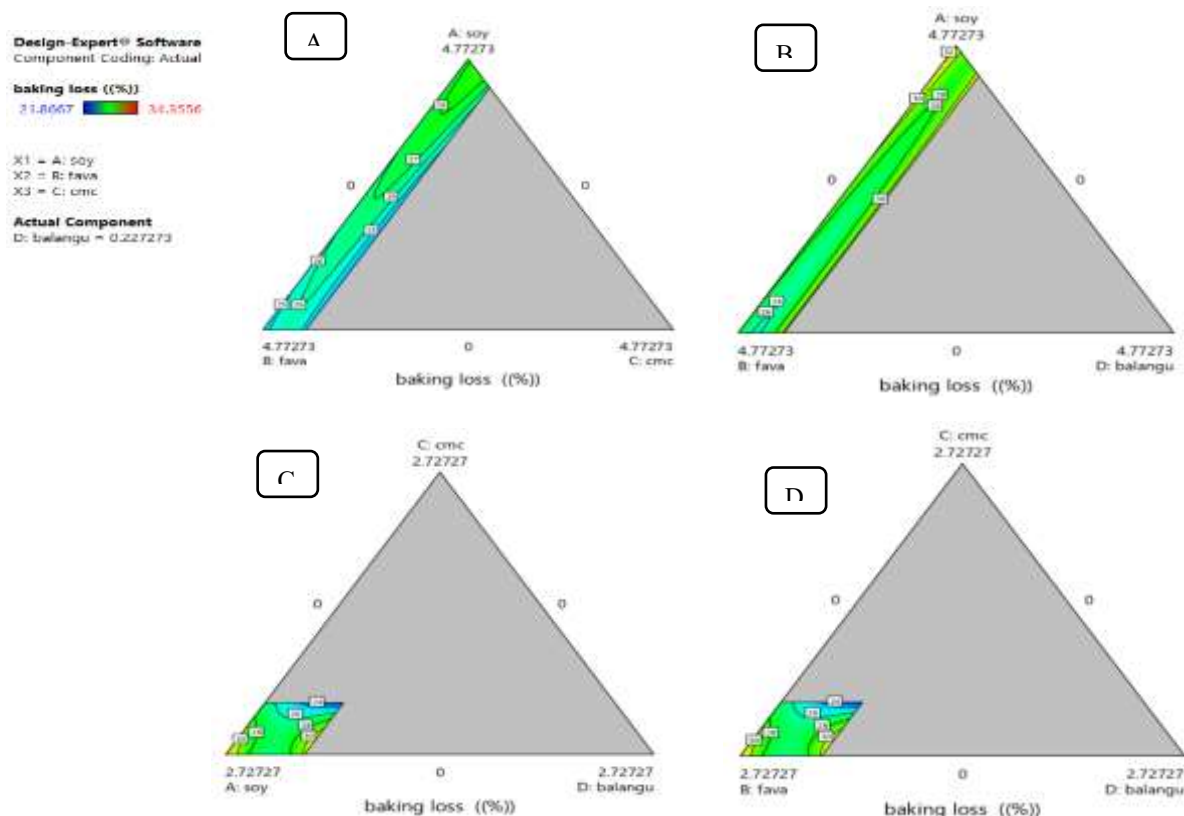


Figure 4. Contour plot of the combined effect of independent variables on the baking loss of gluten-free bread.

حجم مخصوص:

نان بدون گلوتن ایفاء کرد. در شکل ۶ نمودار کانتور مخلوط تأثیر هیدروکلوئیدهای مختلف بر حجم مخصوص نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش نسبت استفاده از ایزوله پروتئین سویا در مقایسه با ایزوله پروتئین باقلا افزایش حجم مخصوص مشاهده شد. از سوی دیگر افزایش میزان استفاده از پایدار کننده ها در ترکیب با ایزوله های پروتئینی موجب افزایش معنی دار ($P < 0.01$) در حجم مخصوص نمونه ها گردید (شکل ۵ - C و D). در همین راستا رزتی و آردنت [۲۹] ضمن افزودن صمغ زانتان و پروتئین آب پنیر تحت تأثیر آنزیم ترانس گلوتامیناز افزایش چشمگیر در میزان حجم مخصوص را گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. دلیل این افزایش حجم

حجم مخصوص از پارامترهای اساسی، مهم و تأثیر گذار بر کیفیت نان های بدون گلوتن از دیدگاه مصرف کنندگان است. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش بیشترین میزان حجم در نمونه ۴ (۴/۵ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۰/۵ درصد موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی) ۴/۹۱ میلی لیتر بر گرم و کمترین میزان حجم مخصوص در نمونه ۱۱ (۴/۷۵ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۰/۵ درصد کربوکسی متیل سلولز) ۲/۳۶ میلی لیتر بر گرم مشاهده شد (جدول ۳). به طور ویژه ترکیب همزمان ایزوله پروتئین سویا با موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی دارای نقش موثری در افزایش ویسکوزیته، بهبود پایداری ساختار خمیرآبه و در نتیجه افزایش حجم مخصوص

مهم ساختار ژل مانند و خواص رئولوژیکی این ترکیبات در بهبود کیفیت نهایی نان بدون گلوتن است. مطابق با جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) تمامی ترکیبات استفاده شده در این پژوهش به صورت جداگانه و ترکیب با یکدیگر دارای تأثیر معنی دار بر حجم مخصوص بوده و بیشترین تأثیر در میان تمامی هیدروکلوئیدها هنگام استفاده از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی مشاهده شد. از طرفی هنگام استفاده ترکیبی از کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در ترکیب با ایزوله های پروتئینی افزایش حجم چشمگیر مشاهده شد ($P < 0.01$). با بررسی مدل آماری به کاررفته در این پژوهش، مدل درجه سوم ارائه شده با ضریب همبستگی بالا ($R^2 = 0.978$) توانسته به خوبی روند تغییرات را پیش بینی کرده و مؤثرترین ترکیبات در بهینه سازی ساختار خمیر و افزایش حجم نان را شناسایی کند.

مخصوص را افزایش ویسکوزیته خمیرآبه و ایجاد شبکه های پروتئینی پایدار دانستند. مطالعات دیگری نیز بر نقش حیاتی ترکیب پروتئین و صمغ در بهبود ویژگی های فیزیکی نان های بدون گلوتن تأکید داشته اند. برای مثال، ساهین و همکاران [۳۰] نشان دادند که ترکیب زئین ذرت با هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) منجر به افزایش حجم نان های بدون گلوتن شد. آن ها دلیل این بهبود را اثر ژل سازی حرارتی HPMC و برهم کنش های غیرکوالانسی میان زئین و آب دانستند که منجر به حفظ ساختار خمیرآبه در طول فرآیند پخت شد. در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که حضور ترکیبات هیدروکلوئیدی مانند CMC و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی، در کنار ایزوله های پروتئینی، اثر بارزی در افزایش ظرفیت نگهداری آب، جلوگیری از خروج گاز و در نتیجه افزایش حجم نان ایفا کردند. چنین اثراتی، بیانگر نقش

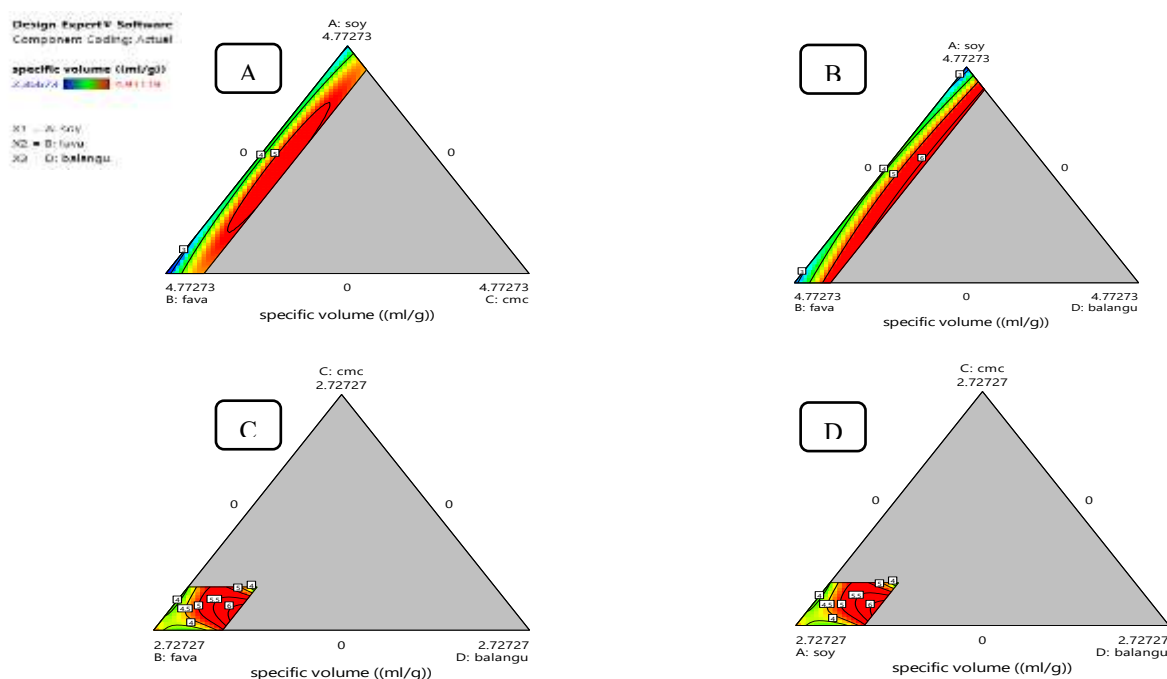


Figure 5. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Specific Volume of gluten-free bread.

تخلخل

تخلخل یکی از مهم ترین شاخص های کیفی در نان، به ویژه در نان های بدون گلوتن است. در نان های حاوی گلوتن، شبکه پروتئینی گلوتن موجب نگهداری گازهای حاصل از تخمیر شده و ساختاری متخلخل و حجیم به وجود می آورد. اما در نان های بدون گلوتن به دلیل نبود گلوتن، این شبکه طبیعی تشکیل نمی شود، بنابراین تخلخل نان به شدت تحت تأثیر نوع ترکیبات جایگزین و فناوری فرآوری قرار می گیرد. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، بیشترین میزان تخلخل در نمونه ۷ (ایزوله پروتئین باقلا ۴/۵ درصد و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی ۰/۵ درصد) ۳۱/۶ درصد و کمترین مقدار در نمونه ۳ (۴ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۰/۵ درصد کربوکسی متیل سلولز و ۰/۵ درصد موسیلاژ دانه بالنگو شیرازی) ۱۰/۶ درصد مشاهده شد. مطابق با شکل ۶-۶ A و B تأثیر استفاده از ایزوله پروتئین باقلا بر تخلخل نان های بدون گلوتن در مقایسه با ایزوله پروتئین سویا بیشتر است. در واقع با حرکت به سمت ضلعی از شکل که مقدار ایزوله پروتئین باقلا بیشتر است، میزان تخلخل افزایش می یابد (نقطه B) و با حرکت به سمت ضلع مقابل که در واقع نشان دهنده افزایش ایزوله پروتئین سویا می باشد (نقطه A)، کاهش میزان تخلخل مشاهده شد. شاید بتوان دلیل آن را به تفاوت در ساختار و رفتار عملکردی این پروتئین ها با سایر اجزای خمیر نسبت داد. پروتئین باقلا ساختار فوم پایداری در مقایسه پروتئین سویا ایجاد می کند و این ویژگی به تشکیل حباب های گاز پایداری در زمان تخمیر و پخت کمک می کند. از طرفی ایزوله پروتئین باقلا در pH محدوده تخمیر در مقایسه با ایزوله پروتئین سویا حلالیت و فعالیت سطحی بالاتری دارد و این ویژگی موجب پایداری کف در خمیرآبه و شکل گیری تخلخل بیشتر در نان نهایی می شود. مطالعه سوزر و همکاران [۳۱] نشان داد، نان بدون گلوتن حاوی آرد باقلا دارای تخلخل ۸۲ درصد و حجم مخصوص ۲/۴ میلی لیتر بر گرم بود، در حالی که نمونه حاوی سویا تنها ۶۱ درصد تخلخل و حجم مخصوص ۱/۵ میلی لیتر بر گرم داشت. این ویژگی احتمالاً ناشی از خواص کف کنندگی بالا، قابلیت

امولسیفیکاسیون و تشکیل شبکه پروتئینی بادوام تر توسط پروتئین باقلا است. با افزایش مقدار استفاده از کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در فرمولاسیون نان بدون گلوتن میزان تخلخل کاهش یافت (شکل ۶-C و D). دلیل آن را می توان به افزایش ویسکوزیته و چسبندگی بالای خمیرآبه هنگام استفاده همزمان از دو هیدروکلوئید مذکور نسبت داد که مانع توسعه طبیعی حفره های گاز و گسترش گاز در بین حباب ها می شوند. در همین راستا شهریان و همکاران [۳۲] ضمن افزودن صمغ بالنگو به نان سورگوم بدون گلوتن تا سطح ۰/۵ درصد افزایش میزان تخلخل را گزارش کردند ولی در ادامه بیان کردند با افزایش غلظت میزان صمغ دانه بالنگو میزان تخلخل کاهش چشمگیر داشت و دلیل آن را افزایش ویسکوزیته و چسبندگی بیش از حد گزارش کردند. اما در این پژوهش هنگام استفاده ترکیبی از ایزوله پروتئین و پایدارکننده ها افزایش قابل توجهی در میزان تخلخل مشاهده شد (شکل ۷). دلیل این افزایش تخلخل را شاید بتوان به هم افزایی پروتئین و صمغ نسبت داد. به طوری که پروتئین با ایجاد شبکه و پایدارکننده با افزایش ویسکوزیته به تثبیت ساختاری شبکه پروتئین کمک کرده و امکان تشکیل حفرات بزرگ و منظم را فراهم می سازد. راسل و مارکو [۱۳] با بررسی تأثیر همزمان افزودن ایزوله پروتئین سویا، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) و ترانس گلوتامیناز بر ویژگی های ساختاری نان های بدون گلوتن گزارش کردند، استفاده از ترکیب سه گانه شامل ۱۳ درصد ایزوله سویا، ۴ درصد HPMC و ۱ درصد آنزیم ترانس گلوتامیناز منجر به ایجاد ساختاری بازتر و تخلخل بیشتر در مغز نان شد. این پژوهش گران بیان کردند، HPMC به عنوان یک هیدروکلوئید با خاصیت ژل سازی و افزایش ویسکوزیته خمیر، نقش کلیدی در حفظ و تثبیت گازهای حاصل از تخمیر ایفاء می کند، در حالی که ایزوله سویا، به تنهایی گرچه قادر به تقویت شبکه ی پروتئینی بود، اما به دلیل ویسکوزیته پایین خمیر، به تنهایی قادر به حفظ گاز درون خمیرآبه نبوده و بنابراین، حضور همزمان پروتئین و HPMC برای ایجاد محیطی پایداری جهت

داشت ($P < 0.05$). در ارتباط با مدل پیشگو نیز مدل درجه دو به دلیل ضریب تبیین 0.78 مدل مناسب جهت پیش بینی تأثیر هر یک از ترکیبات بر تخلخل نان بدون گلوتن می باشد.

نگهداری گازهای تولید شده در خمیر ضروری است. مطابق با جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) استفاده ترکیبی از ایزوله پروتئین سویا- کربوکسی متیل سلولز، ایزوله پروتئین باقلا- موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی و کربوکسی متیل سلولز- موسیلاژ بالنگوی شیرازی تأثیر معنی دار بر تخلخل

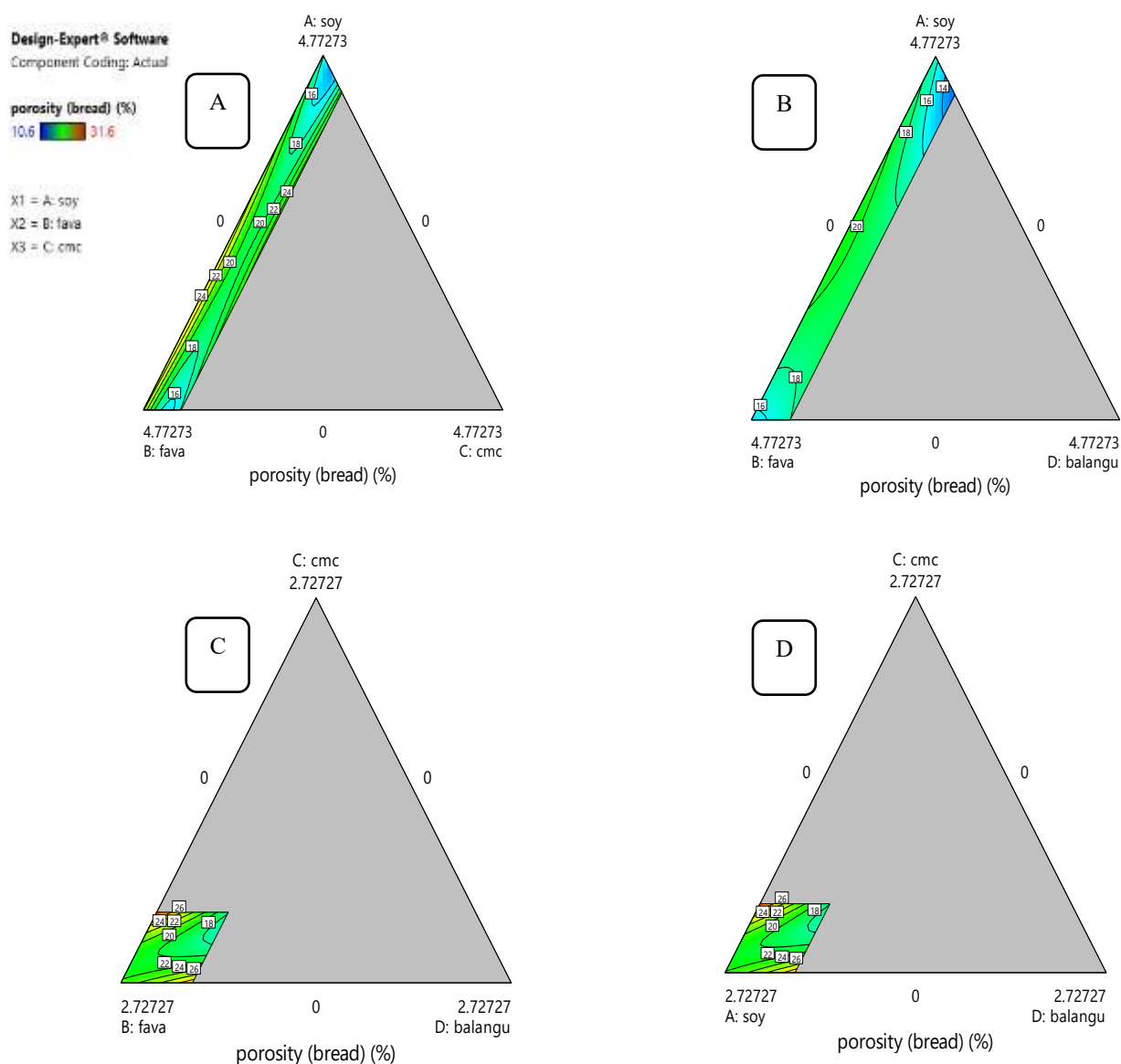
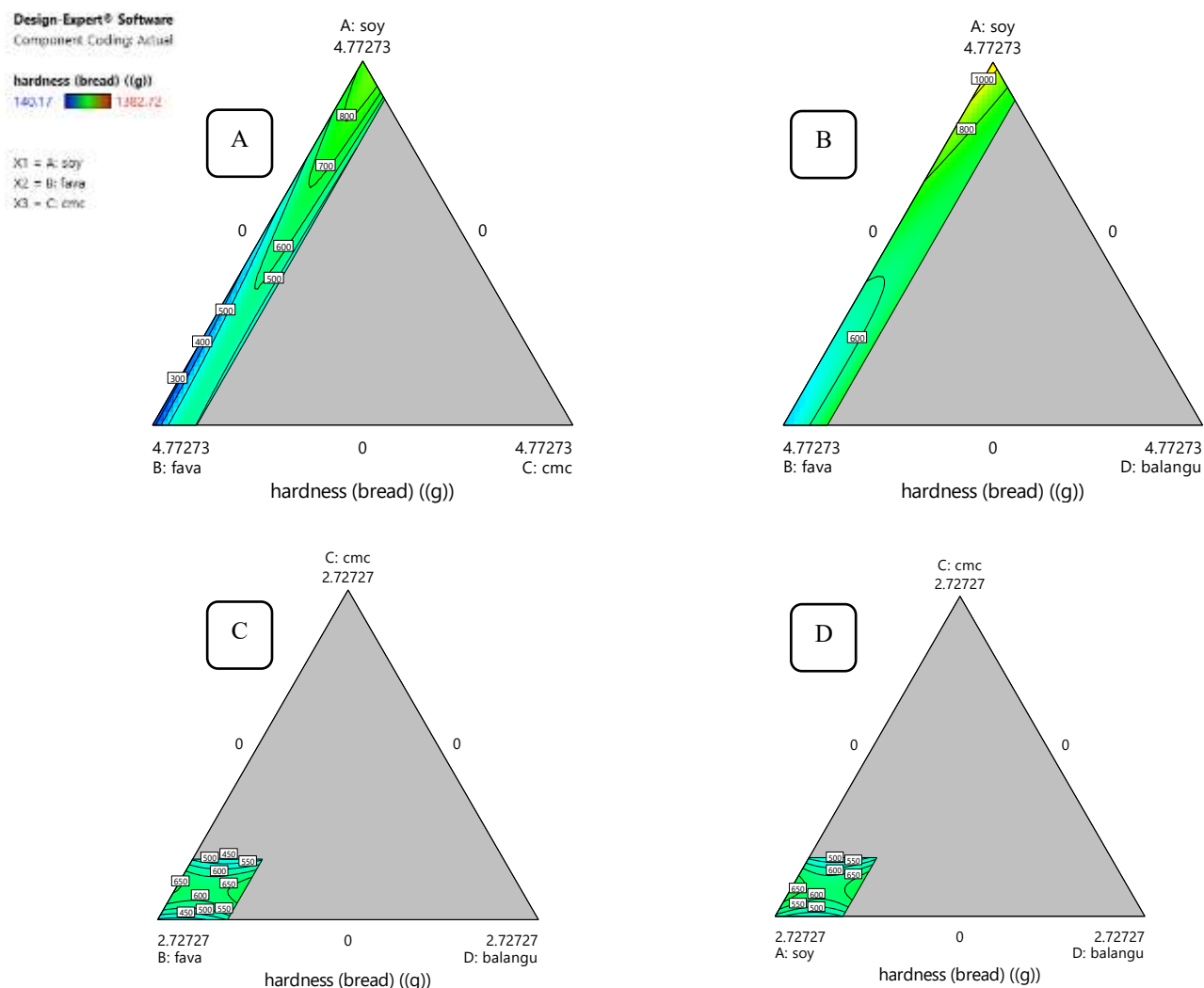


Figure 6. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Porosity of gluten-free bread.

سفتی بافت

سفتی یکی از ویژگی های مهم در ارزیابی کیفیت نان های بدون گلوتن محسوب می شود. در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون سفتی نمونه های نان بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، بیشترین و کمترین میزان سفتی به ترتیب در نمونه های ۱۱ (۴/۷۵) درصد ایزوله پروتئین سویا و ۰/۲۵ درصد کربوکسی متیل سلولز (۱۳۲۸/۲۷ گرم و ۱۲ (۵) درصد ایزوله پروتئین باقلا (۱۴۰/۱۷ گرم مشاهده شد. مطابق با شکل ۷ - A هنگام استفاده از ایزوله پروتئین باقلا (نقطه B) میزان سفتی کمتر بوده ولی با افزایش میزان ایزوله پروتئین سویا در فرمولاسیون یعنی حرکت به سمت نقطه A میزان سفتی افزایش می یابد. دلیل آن را شاید بتوان به تفاوت در ماهیت عملکردی دو پروتئین نسبت داد. به طوری که پروتئین های اصلی سویا (گلیسینین و بتاکونگلیسینین) تمایل زیادی به تشکیل ژل سخت و متراکم در حضور حرارت دارد و در این شرایط موجب کاهش ظرفیت نگهداری آب و افزایش سفتی مغز نان شود. در عوض پروتئین های باقلا ساختار ژل نرم تری ایجاد کرده و موجب کاهش سفتی نان می شود. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج ماکنین و همکاران [۳۳] مطابقت داشت. این پژوهشگران ضمن افزودن پروتئین های خانواده بقولات شامل باقلا، عدس، نخود و سویا، کاهش میزان سفتی مغز نان را هنگام استفاده از ایزوله پروتئین باقلا در مقایسه با ایزوله پروتئین سویا گزارش کردند و دلیل آن را ساختار ژل نسبتاً نرم ایزوله پروتئین باقلا و ساختار سفت ژل حاصل از ایزوله پروتئین سویا در حضور حرارت بیان کردند. در ادامه

با افزایش سهم کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در ترکیب با ایزوله های پروتئینی مطابق با شکل ۷ - (A و B) در فرمولاسیون نان بدون گلوتن، تغییرات متفاوتی در میزان سفتی نمونه ها مشاهده شد. به عنوان مثال در شکل ۷ - A با حرکت از نقطه B به سمت نقطه C در شکل (در واقع اضافه شدن سهم کربوکسی متیل سلولز در فرمولاسیون است) افزایش میزان سفتی مشاهده می شود (P < ۰/۰۱). اما بر خلاف آن در نقطه A به دلیل بالا بودن میزان سفتی با افزایش سهم کربوکسی متیل سلولز یعنی حرکت از نقطه A به سمت نقطه C کاهش در میزان سفتی مشاهده می شود، ولی مطابق با جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) این کاهش در میزان سفتی معنی دار نیست (P > ۰/۰۵). همین رویکرد در شکل ۷ - B هنگام استفاده از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی مشهود است. بدان معنی که هنگام استفاده از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در ترکیب با ایزوله پروتئین باقلا افزایش در میزان سفتی مشاهده شد و بالعکس هنگام ترکیب شدن موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی با ایزوله پروتئین سویا کاهش میزان سفتی گزارش گردید. اثر متقابل کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در فرمولاسیون نان بدون گلوتن تأثیر معنی بر سفتی بافت نداشت (P < ۰/۰۵). همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، پاسخ های سفتی نمونه های نان بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش با مدل درجه دو به خوبی برازش شدند. معادلات پیشگوی حاصل از این پارامتر از ضریب تبیین بالایی (۰/۸۵) برخوردار بوده و بنابراین برای پیش بینی تغییرات حاصل از این شاخص قابل استفاده است.



شکل ۷- نمودار کانتور مخلوط اثر متغیرهای مستقل بر سفتی نان بدون گلوتن

Figure 7. Contour plot of the combined effect of independent variables on the hardness of gluten-free bread.

های ۴ (۴/۵ درصد ایزوله پروتئین سویا و ۰/۵ درصد موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی) ۰/۸۱۳ و ۱۲ (۵ درصد ایزوله پروتئین باقلا) ۰/۳۲۳ مشاهده شد. روند تغییر انسجام بافت در نمودارهای شکل ۸- A و B نشان داد که با افزایش سهم استفاده از ایزوله پروتئین سویا همراه با موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در فرمولاسیون نان بدون گلوتن میزان انسجام به طور قابل توجهی افزایش می یابد. شاید این نتیجه نشان دهنده اثر هم افزایی ایزوله پروتئین سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی

انسجام بافت :

انسجام بافت در نان به معنی مقاومت بافت در برابر خرد شدن و از هم پاشیدن است. در نان های معمولی گلوتن موجب ایجاد بافت یکدست و همبسته شده، اما در نان های بدون گلوتن احتمال خرد شدن و ریزدانه شدن بافت بسیار زیاد است. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است،

۰/۸۵۹ مدل مناسب جهت برآزش و پیشگویی نتایج حاصل از انسجام بافت نمونه های نان بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش است.

شیرازی در بهبود شبکه ساختاری نان های بدون گلوتن باشد. از طرفی در مقایسه دو پایدار کننده مورد استفاده در فرمولاسیون، می توان گفت اثر موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در مقایسه با کربوکسی متیل سلولز بر افزایش انسجام بافت نان بدون گلوتن بدست آمده بیشتر است (شکل ۸-D). افزایش انسجام با افزودن موسیلاژ دانه بالنگو شیرازی در مقایسه به کربوکسی متیل سلولز می تواند ناشی از قابلیت این صمغ بومی در ایجاد پیوندهای هیدروژنی و حفظ آب در خمیرآبه باشد که منجر به تشکیل بافتی منسجم تر و جلوگیری از خرد شدن نان می شود. در همین راستا آرورا و همکاران [۳۴] ضمن تولید نان بدون گلوتن با استفاده از آرد های بدون گلوتن (نشاسته پیش ژلاتینه، ارزن مرواریدی، گندم سیاه) و ایزوله پروتئین سویا گزارش کردند، افزودن پروتئین سویا در فرمولاسیون نان بدون گلوتن موجب افزایش معنی دار در انسجام بافت نان های تولید شده گردید. انسجام بافت در این نان ها همبستگی مثبتی با ظرفیت تورم و ظرفیت جذب آب داشت. بر اساس یافته های کراکت و ودودوز [۳۵] پروتئین موجود در ایزوله سویا اهمیت زیادی در شبیه سازی رفتار گلوتن در به دام انداختن گاز های حاصل از تخمیر در نان های بدون گلوتن دارد. مطابق با جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) تأثیر معنی دار تیمارها قابل مشاهده است ($P < 0.01$). به طوری که در میان متغیرها موثرترین عامل در افزایش انسجام، موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی است. همچنین ایزوله پروتئین سویا و ایزوله پروتئین باقلا تأثیر مثبتی بر افزایش انسجام داشتند. اما بر خلاف سایر ترکیبات کربوکسی متیل سلولز در مقایسه با سایر ترکیبات تأثیر منفی بر انسجام داشت (جدول ۴). همچنین با بررسی اثر افزودن ترکیبات به صورت آمیخته مشخص گردید ترکیب همزمان ایزوله پروتئین سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی بیشترین تأثیر را بر افزایش انسجام بافت دارد ($P < 0.05$). بر اساس جدول تجزیه واریانس مدل درجه دو با ضریب تبیین

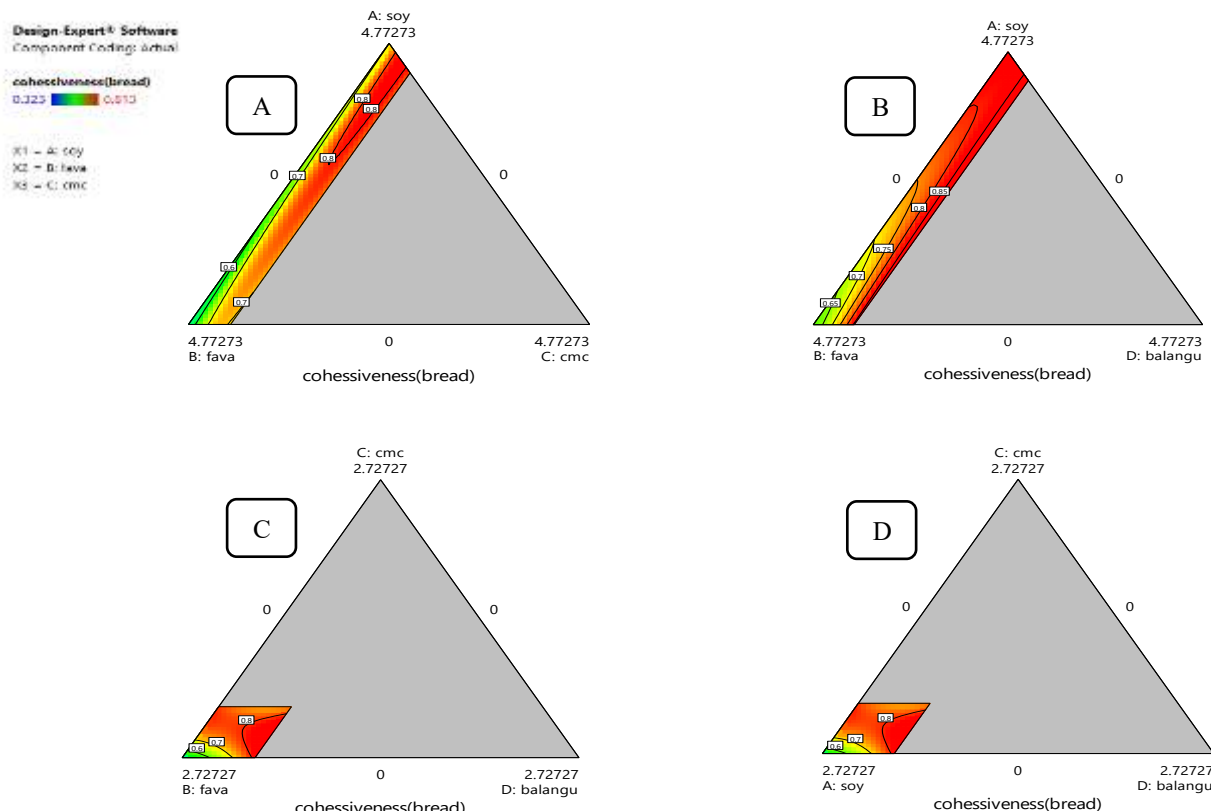


Figure 8. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Cohesiveness of gluten-free bread.

درصد ایزوله پروتئین سویا و ۰/۲۵ درصد کربوکسی متیل سلولز) به میزان ۳۴/۶ می باشد. استفاده از هر یک از متغیرهای مستقل تأثیر معنی دار بر شاخص قهوه‌ای شدن پوسته داشت ($P < 0.01$). با توجه به شکل ۹- A ملاحظه می شود که در مقایسه ایزوله‌های پروتئینی با یکدیگر، تأثیر ایزوله پروتئین سویا بر شاخص قهوه‌ای شدن بیشتر است به طوری که زمان استفاده از مقادیر بیشتر ایزوله پروتئین سویا شاخص مذکور افزایش می یابد. اما در شرایط استفاده هم-زمان، از ایزوله‌های پروتئینی در مقادیر مساوی، افزایش شاخص قهوه‌ای شدن مشهود است. زیبرو و همکاران [۳۶] گزارش کردند استفاده از ایزوله پروتئین سویا و کلاژن موجب تیره شدن نان بدون گلوتن شد و دلیل آن را افزایش

شاخص قهوه‌ای شدن پوسته :

شاخص قهوه‌ای شدن در نان‌های بدون گلوتن یکی از معیارهای مهم برای ارزیابی کیفیت ظاهری و پذیرش حسی محصول است. این شاخص به طور معمول به رنگ پوسته مربوط می شود و به طور مستقیم به واکنش‌های شیمیایی و ترکیبات تشکیل دهنده خمیر مرتبط است. نتایج حاصل از شاخص قهوه‌ای شدن (جدول ۳) نشان می دهد که بیشترین و کمترین میزان شاخص قهوه‌ای شدن به ترتیب متعلق به نمونه‌های ۴ (۴/۵ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۰/۵ درصد موسیلاژ دانه بالنگو شیرازی) به میزان ۶۴/۹۷ و ۱۱ (۴/۷۵

واکنش میلارد به دلیل حضور پروتئین بیشتر در فرمولاسیون بیان کردند. در پژوهشی دیگر نیز ضمن استفاده از آرد سویا در فرمولاسیون نان بدون گلوتن، گزارش شد با افزایش میزان آرد سویا در فرمولاسیون رنگ پوسته از حالت روشن به سمت رنگ قهوه‌ای تغییر کرد و دلیل آن را وجود رنگدانه-ها در آرد سویا، قندهای طبیعی و اسیدآمین‌های شرکت کننده در واکنش میلارد بیان کردند [۳۷]. مطابق با شکل ۹- C و D هنگام استفاده از کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی، در ترکیب با ایزوله‌های پروتئینی شاخص قهوه‌ای شدن، هنگام استفاده از کربوکسی متیل سلولز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از طرفی هنگام استفاده همزمان ایزوله پروتئین سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی افزایش شاخص قهوه‌ای شدن مشاهده می‌شود. اما در کل تأثیر کربوکسی متیل سلولز بر افزایش شاخص قهوه‌ای شدن بیشتر از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی است. نتایج این بخش، با نتایج سایر پژوهش‌ها مغایرت داشت، به‌طوری‌که گزارش شده است، استفاده از کربوکسی متیل سلولز در فرمولاسیون نان بدون گلوتن به دلیل افزایش ویسکوزیته و افزایش توان نگهداری آب موجب به وجود

آمدن پوسته روشن می‌شود [۳۸]. به علاوه گزارش شده است که استفاده از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در فرمولاسیون نان بدون گلوتن موجب افزایش روشنی پوسته در نمونه‌ها شد و دلیل آنرا حفظ رطوبت در محصول و افزایش ظرفیت نگهداری آب در پوسته نان بیان کردند. در ارتباط با تأثیر کربوکسی متیل سلولز و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی بر افزایش شاخص قهوه‌ای شدن و تیرگی پوسته محصول در این پژوهش، شاید بتوان این گونه تحلیل کرد که با افزایش رطوبت پوسته محصول دیرتر خشک شده، اما به دلیل ساختار یکنواخت‌تر و کاهش ترک خوردگی انتقال حرارت موثرتر صورت می‌گیرد. از سوی دیگر وجود قند آزاد در هیدروکلوئیدهای مورد استفاده در این پژوهش احتمال واکنش میلارد را افزایش می‌دهد. در نهایت با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) مشخص می‌شود که متغیرهای مستقل مورد استفاده در این پژوهش تأثیر معنی‌دار بر شاخص قهوه‌ای شدن دارند. همچنین مدل درجه سه به دلیل ضریب تبیین بالا (۰/۹۹۷)، مدل مناسب جهت برازش نتایج حاصل از شاخص قهوه‌ای شدن پوسته می‌باشد.

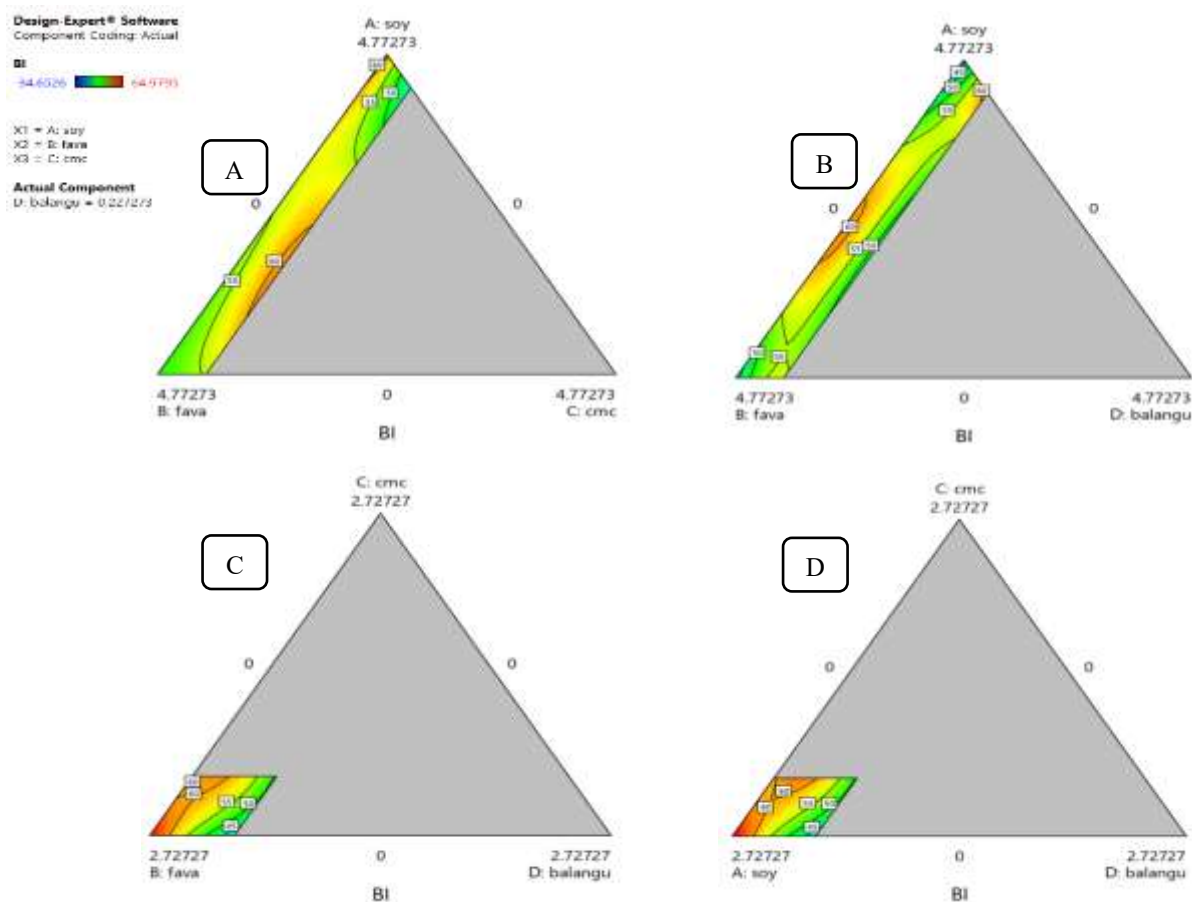


Figure 9. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Browning Index of gluten-free bread.

بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش نشان داده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌های ۴ و ۵ و ۸ و ۱۰ (امتیاز ۵) بالاترین نمره را از نظر ارزیابان کسب نمودند در حالی که نمونه‌های ۷ و ۱۲ کمترین امتیاز (امتیاز ۲) را کسب کردند. روند حرکتی نمودار کانتور مخلوط پذیرش کلی نمونه‌های نان بدون گلوتن نشان می‌دهد که افزایش سهم ایزوله پروتئین سویا در فرمولاسیون نان بدون گلوتن موجب افزایش پذیرش کلی شده است (شکل ۱۰-A). اما افزایش بیش از حد آن منجر به کاهش پذیرش کلی خواهد شد. نتایج

پذیرش کلی :

پذیرش کلی در ارزیابی حسی نان‌های بدون گلوتن به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی موفقیت محصول در بازار و سنجش میزان رضایت مصرف‌کننده دارد. این معیار، ابزاری مهم برای توسعه‌دهندگان این محصولات به شمار می‌رود تا ارزیابی کنند که اصلاحات اعمال‌شده در فرمولاسیون تا چه اندازه از دیدگاه مصرف‌کنندگان قابل قبول و ارزشمند است. در جدول ۳ نتایج کلی حاصل از ارزیابی حسی نمونه‌های نان

پژوهش ینگ و همکاران [۳۹] با نتایج این پژوهش مطابقت داشت (۲۵). به طوری که این پژوهش گران ضمن استفاده از ایزوله پروتئین سویا در فرمولاسیون نان بدون گلوتن حاوی آرد برنج گزارش کردند، افزودن ایزوله سویا به فرمولاسیون موجب بهبود حجم و ویژگی های رئولوژیکی محصول گردید. اما افزایش مقدار ایزوله پروتئین سویا به ۹ درصد منجر به کاهش قابل ملاحظه در پذیرش کلی نمونه ها شد و دلیل آن را ایجاد پس طعم غیرمطلوب سویا عنوان کردند. از سوی دیگر با بررسی اثر متقابل ایزوله های پروتئینی و پایدارکننده های مورد استفاده در این پژوهش (موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی و کربوکسی متیل سلولز) افزایش امتیاز پذیرش کلی مشاهده شد (۱۰- A و B). همچنین مطابق با شکل ۱۰- C و D تأثیر موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در مقایسه با کربوکسی متیل سلولز بر افزایش پذیرش کلی بیشتر است. در پژوهشی تأثیر موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی و حسی نان بدون گلوتن تهیه شده از آرد ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد

که با افزودن ۲ درصد موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی ویژگی - های فیزیکی و حسی محصول بهبود یافت (جلالی و همکاران، ۲۰۱۹). این پژوهش‌گران بیان کردند، موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی به دلیل ویژگی‌های هیدراتاسیون و ژل‌سازی، جایگزین عملکردی شبکه گلوتن در نان بدون گلوتن می‌شود و با بهبود رطوبت، حجم، تخلخل و بافت، امتیاز پذیرش کلی نان را بالا می‌برد.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس پذیرش کلی (جدول ۴) نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که هر یک از متغیرهای مستقل دارای تأثیر معنی‌دار بر پذیرش کلی هستند ($P < 0/05$). اما بیشترین تأثیر مربوط به استفاده از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی است. بررسی جدول تجزیه واریانس نشان دهنده این امر است که مدل مناسب جهت برازش داده‌های حاصل از پذیرش کلی، مدل درجه دو است و به جهت ضریب تبیین ۰/۷۹۷، مدل مناسب جهت پیشگویی روند تغییرات این پارامتر است.

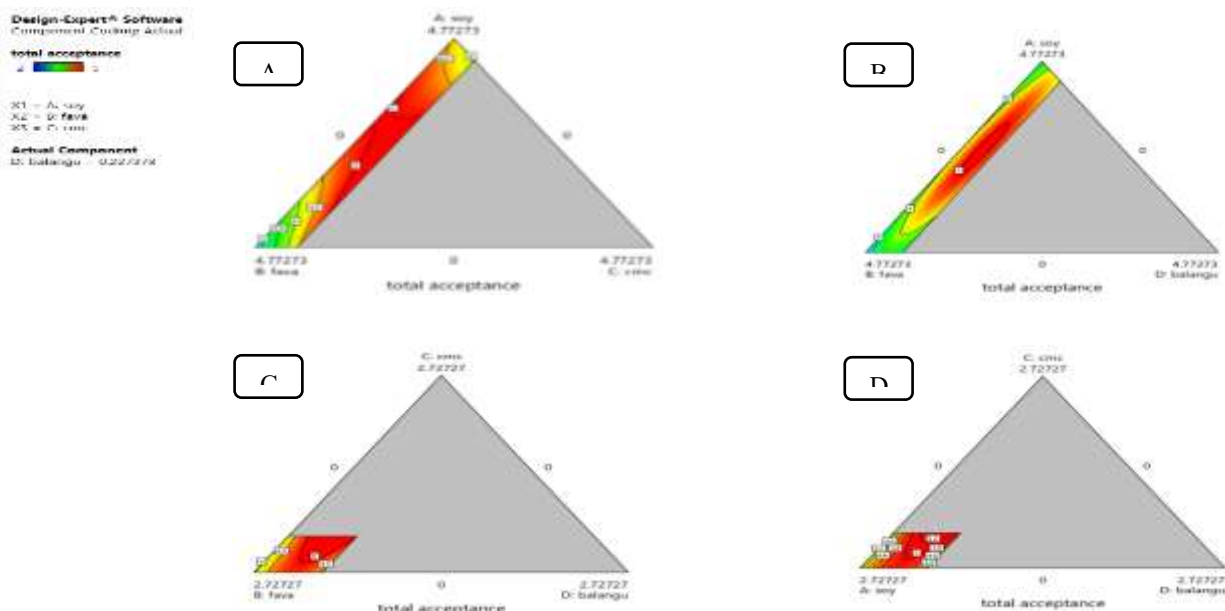


Figure 10. Contour plot of the combined effect of independent variables on the Overall Acceptance of gluten-free bread

بهینه سازی فرمولاسیون

به جهت بهینه یابی فرمولاسیون نان‌های بدون گلوتن تهیه شده در این پژوهش، از بخش بهینه‌یابی گرافیکی نرم افزار دیزاین اکسپرت استفاده گردید. از این رو ابتدا اهداف بهینه‌سازی مشخص شده و سپس متغیرهای مستقل و وابسته در نرم افزار تنظیم شد. متغیرهای وابسته سفتی، چسبندگی، قوام خمیرآبه، رنگ شاخص قهوه‌ای شدن، سفتی نان در محدوده مشخص و سایر پارامترها در حالت بیشینه تنظیم گردید. در نهایت فرمول بهینه‌سازی شده خروجی از نرم افزار به

صورت ۰/۹۸۱ درصد ایزوله پروتئین سویا، ۳/۵۹ درصد ایزوله پروتئین باقلا و ۰/۴۲۲ درصد موسیلاژ دانه بالنگو شیرازی بدست آمد. نتایج متغیرهای وابسته بدست آمده از نرم افزار مطابق با نمودار کانتور همپوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به منظور تعیین اعتبار مدل، آزمایش‌ها بر روی نمونه پخت شده با استفاده از فرمولاسیون بهینه، انجام شد و نتایج آن با نتایج مربوط به مقادیر بهینه مقایسه گردید. مشاهده شد که مدل به دست آمده از روش آماری مخلوط، به خوبی قادر به پیش بینی نتایج است.

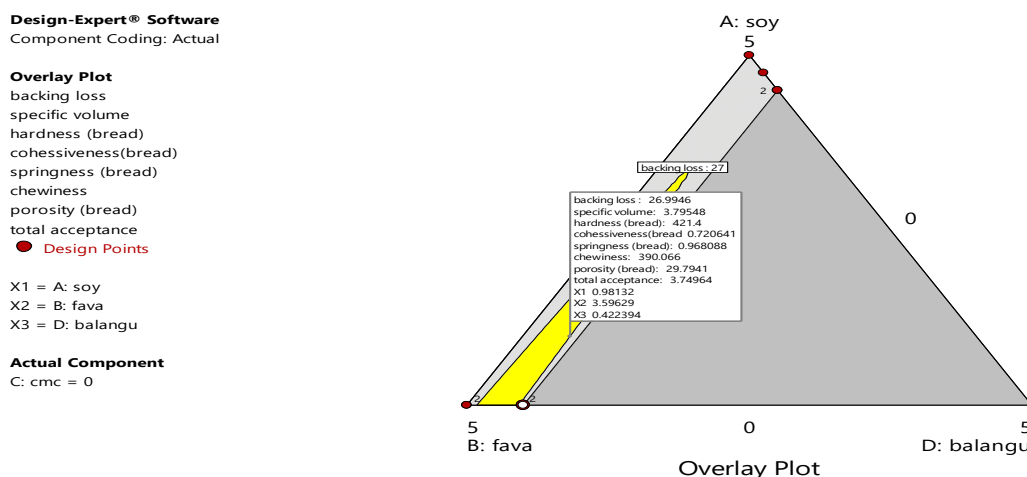


Figure 11. Overlay contour plot for the optimization of gluten-free bread formulation

۴-نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، مشخص شد که استفاده از ترکیبات هیدروکلوئیدی قادر است به طور معنی‌داری ویژگی‌های فیزیکی و حسی نان‌های بدون گلوتن را بهبود دهد. افزایش سهم ایزوله پروتئین سویا و پایدار کننده طبیعی موسیلاژ دانه بالنگو شیرازی موجب افزایش پارامترهای سفتی، قوام و کاهش چسبندگی خمیرآبه شد، که

این اثر ناشی از جذب آب بالا و تشکیل شبکه ژلی پایدار در خمیر است. در مقابل، استفاده از ایزوله پروتئین باقلا باعث کاهش سفتی و افزایش تخلخل نمونه‌ها شد، که بیانگر ایجاد ساختار کف پایدارتر و حفظ حفرات گازی در خمیر است. پایدارکننده‌های صنعتی نظیر کربوکسی متیل سلولز نیز نقش مهمی در کاهش افت پخت و افزایش حجم مخصوص ایفا کردند، اما تأثیر آن‌ها بر تخلخل و انسجام بافت متفاوت بود. همچنین، شاخص قهوه‌ای شدن پوسته با افزایش میزان

مرتبط با سویا، استفاده از منابع پروتئینی بومی و اقتصادی تر، بهبود ویژگی های بافتی محصول نهایی داشته باشد. بنابراین، ترکیب ایزوله پروتئین باقلا با موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی می تواند جایگزینی کارآمد برای فرمولاسیون فرآورده های نانوائی بدون گلوتن مبتنی بر سویا و کربوکسی متیل سلولز باشد.

رضایت نامه کتبی

رضایت نامه کتبی و آگاهانه از تمامی شرکت کنندگان در مطالعه اخذ شد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تعارض منافع ندارند.

بیانیه دسترسی ها

داده های پژوهش در صورت درخواست از سوی نویسنده مسئول به اشتراک گذاشته می شوند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در این انجام پروژه مشارکت داشته اند.

۵-منابع

- [1] Sciarini, L. S., Calviño, A., León, A. E., & Puppo, M. C. (2022). Gluten-free bread and bakery products technology. *Frontiers in Nutrition*, 9, 818930.
- [2] Masure, H. G., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2021). High-protein substitutes for gluten in gluten-free bread. *Foods*, 10(9), 1997.
- [3] Żmudziński, D., Goik, U., & Ptasek, P. (2021). Functional and rheological properties of Vicia faba L. protein isolates. *Biomolecules*, 11(2), 178.
- [4] Salehi, M., Tabarsa, M., Amraie, A., & Emam-Djomeh, Z. (2015). Structural and physicochemical characteristics of a novel water-soluble gum from Lallamentia royleana seed (Balangu seed gum). *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 890-898.
- [5] Zhang, T., Li, Y., Miao, M., & Jiang, B. (2020). Effects of soy protein on quality and storage

پروتئین ایزوله سویا و برخی پایدارکننده ها افزایش یافت که با واکنش های میلارد و حفظ رطوبت مرتبط است. نتایج ارزیابی نیز حسی نشان داد که ترکیب بهینه پروتئین ها و صمغ ها، به ویژه استفاده همزمان ایزوله پروتئین سویا و موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی در فرمولاسیون، بیشترین پذیرش کلی را در بین مصرف کنندگان ایجاد نموده است. مدل های آماری ارائه شده با ضریب تبیین بالا قادرند تغییرات پارامترهای بافتی و حسی را به خوبی پیش بینی کنند. به طور کلی، استفاده همزمان از پروتئین های گیاهی و هیدروکلوئیدها یک استراتژی مؤثر برای بهبود کیفیت ساختاری و پذیرش حسی نان های بدون گلوتن محسوب می شود و می تواند به توسعه محصولات با ویژگی های نزدیک تر به نان های سنتی حاوی گلوتن کمک کند. در نهایت مشخص شد که امکان جایگزین کردن موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی با کربوکسی متیل سلولز در فرمولاسیون مورد استفاده در این پژوهش وجود دارد. این جایگزینی نه تنها باعث حفظ ویژگی های عملکردی محصول از جمله ویسکوزیته و پایداری می شود، بلکه استفاده از موسیلاژ دانه بالنگوی شیرازی به دلیل منشاء طبیعی و خواص ژل زایی، می تواند به بهبود بافت و کیفیت حسی محصول کمک کند. همچنین، نتایج نشان داد که جایگزین شدن قسمت اعظم ایزوله سویا با ایزوله پروتئین باقلا نیز امکان پذیر است. این تغییر می تواند مزایای متعددی از جمله افزایش ارزش غذایی به دلیل پروفایل آمینواسیدی بهتر ایزوله باقلا، کاهش آلرژی های

characteristics of gluten-free bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(7), 2440–2448.

[6] Ronda, F., Rivero, P., & Pérez-Quirce, S. (2019). Impact of protein addition on sensorial and instrumental characteristics of gluten-free bread. *European Food Research and Technology*, 245(2), 311–319.

[7] Matos, M. E., & Rosell, C. M. (2017). Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(14), 4548–4554.

[8] Capriles, V. D., & Arêas, J. A. G. (2014). Approaches to reduce the glycemic response of gluten-free products: In vivo and in vitro studies. *Food & Function*, 5(3), 546–556.

- [9] Moreira, R., Chenlo, F., & Torres, M. D. (2021). Influence of hydrocolloids on gluten-free dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, 113, 106452.
- [10] Sivaramakrishnan, H. P., Senge, B., & Chattopadhyay, P. K. (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, 62(1), 37–45.
- [11] Torres, M. D., Moreira, R., & Chenlo, F. (2015). Effect of xanthan gum and guar gum on gluten-free rice-based doughs: Rheological and thermal properties. *Carbohydrate Polymers*, 122, 122–129.
- [12] Elkhalfa, A. E. O., & Bernhardt, R. (2010). Influence of soaking and dehulling methods on functional properties of protein concentrate from Faba bean (*Vicia faba* L.). *Food Chemistry*, 119(4), 1310–1316.
- [13] Marco, C., & Rosell, C. M. (2008). Effect of different hydrocolloids on gluten-free bread quality. *Food Hydrocolloids*, 22(7), 1429–1437.
- [14] Ghaemi, P., Arabshahi Delouei, S., Allami, M., & Hosseini Ghaboos, S. H. (2022). Effect of whey protein concentrate and soy protein isolate with basil seed gum on some physicochemical and sensory properties of dough and gluten-free cake based on rice flour. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 19(127), 139–154.
- [15] Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2009). Recent advances in gluten-free breadmaking: Formulation, processing, and functional ingredients. *Food Research International*, 42(1), 861–870.
- [۱۶] Aghajani, N., Alavi, S., & Farhoosh, R. (2018). Physical, textural and sensory properties of gluten-free rice bread enriched with pea protein isolate. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 3412–3420.
- [17] AACC International. (2000). Approved Methods of Analysis, 10-05.01: Bread – Specific Volume by Rapeseed Displacement Method. 10th Edition. St. Paul, MN: AACC International.
- [18] Liu, X., & Zhang, L. (2020). Characterization of the dough rheological and steamed bread properties using back extrusion test. *Journal of Texture Studies*, 51(5), 497–507.
- [19] Choi, S. H., & Okos, M. R. (1997). A computer imaging method for the evaluation of bread crumb structure. *Journal of Food Engineering*, 33(4), 341–355.
- [20] Kobus, Z., Krzywicka, M., Blicharz-Kania, A., Bosacka, A., Pecyna, A., Ivanišová, E., Kozłowicz, K., & Kovačiková, E. (2024). Impact of incorporating dried Chaga mushroom (*Inonotus obliquus*) into gluten-free bread on its antioxidant and sensory characteristics. *Molecules*, 29(16), 3801.
- [21] Pagliarini, E., Della Croce, C., & Paci, G. (2010). Sensory evaluation of gluten-free breads assessed by a trained panel of celiac assessors. *Food Research International*, 43(2), 586–592.
- [22] Noorlaila, A., Hasanah, H. N., Asmeda, R., & Yusoff, A. (2020). The effects of xanthan gum and hydroxypropylmethylcellulose on physical properties of sponge cakes. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(2), 128–135.
- [23] Pycarelle, S. C., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2020). The role of exogenous lipids in starch and protein mediated sponge cake structure setting during baking. *Food Research International*, 137, 1–31.
- [24] Ghaemi, P., Arabshahi Delouei, S., Allami, M., & Hosseini Ghaboos, S. H. (2022). Effect of whey protein concentrate and soy protein isolate with basil seed gum on some physicochemical and sensory properties of dough and gluten-free cake based on rice flour. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 19(127), 139–154.
- [۲۵] Sahraeeian, B., Karimi, M., Habibi Najafi, M. B., Haddad Khodaparast, M. H., Ghiyafe Davoodi, M., Sheikh Al-Islami, Z., & Naghipoor, F. (2014). Effect of native Balangu Shirazi gum (*Lallemantia royleana*) on physicochemical and sensory properties of semi-sourdough Barbari gluten-free bread. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 19(1), 1–10.
- [۲۶] Arendt, E. K., & Ryga, B. (2002). Non-wheat breads: Quality and processing aspects. *International Journal of Food Science & Technology*, 37(7), 747–759.
- [27] Liu, X., & Ma, X. (2013). Effect of xanthan gum and guar gum on dough rheological properties and gluten-free bread quality. *Food Biophysics*, 8(1), 54–61.
- [28] Lazaridou, A., et al. (2007). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 21(3), 374–383.
- [29] Renzetti, S., & Arendt, E. K. (2008). Effect of protease and transglutaminase treatment on the bread-making functionality of brown rice, maize, and oat flours. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 775–785.
- [30] Sahin, A. W., et al. (2019). Application of hydrocolloids in gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 245, 1805–1817.
- [32] Sahraiyani, B., Farahnaky, A., & Azizi, M. H. (2014). Application of Balangu seed gum in gluten-free bread made from sorghum. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 9(2), 57–66.
- [33] Mäkinen, O. E., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Pulse proteins: Technological functionality and application in gluten-free food products. *Food Research International*, 89, 259–267.
- [34] Arora, K., Tlais, A. Z. A., Augustin, G., Grano, D., Filannino, P., Gobetti, M., & Di Cagno, R. (2023). Physicochemical, nutritional, and functional characterization of gluten-free ingredients and their impact on the bread texture. *LWT*, 177, 114566.
- [35] Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). Effects of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread. *Food Chemistry*, 129, 84–91.

- [36] Ziobro, R., Juszczak, L., Witczak, T., & Korus, J. (2016). Non-gluten proteins as structure forming agents in gluten-free bread. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 571–580.
- [37] Taghdir, M., Mazloomi, S. M., Honar, N., Sepandi, M., Ashourpour, M., & Salehi, M. (2016). Effect of soy flour on nutritional, physicochemical, and sensory characteristics of gluten-free bread. *Food Science & Nutrition*, 5(3), 439–445.
- [38] Moreira, R., Chenlo, F., & Torres, M. D. (2021). Influence of hydrocolloids on gluten-free dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, 113, 106452.
- [39] Yang, Y., Li, X., Zhang, L., & Chen, J. (2024). Impact of soybean protein isolate on gluten-free bread: A comprehensive study of physicochemical properties of gluten-free dough and bread matrix properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(1), 251–265.
- [۴۰] Jalali, M., Sheikholeslami, Z., Elhamirad, A. H., Haddad Khodaparast, M. H., & Karimi, M. (2019). The effect of Balangu Shirazi (*Lallemantia royleana*) gum on the quality of gluten-free pan bread containing pre-gelatinized simple corn flour with microwave. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 11(2), 6–15



Scientific Research

Improvement of the Quality Characteristics of Gluten-Free Bread Using Fava Bean Protein Isolate and *Balangu Shirazi* (*Lallemantia royleana*) Seed Mucilage

Seyed Soheil Amiri Aghdaei¹, Mehran Aalami², Alireza Sadeghi Mahoonak², Mehdi Kashaninejad²

1-Ph.D. Candidate in Food Science and Technology – Food Technology Division,

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2-Professor, Department of Food Science and Technology,

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/10/27

Review: 2025/12/21

Accepted: 2025/12/24

Keywords:

Gluten-free bread;

Soy protein isolate;

Fava bean protein isolate;

seed mucilage;

Bread textural quality

Bread is considered one of the most important food products in many countries. The presence of gluten protein in wheat is the main factor responsible for creating the desirable dough structure and improving bread quality. However, removing gluten from bread formulations—due to nutritional requirements or health considerations for individuals with celiac disease—poses the challenge of decreased bread quality. Therefore, extensive research has focused on the use of hydrocolloid substitutes to compensate for the functional role of gluten. Accordingly, the aim of the present study was to improve the quality attributes of gluten-free bread using broad bean protein isolate and *Balangu Shirazi* seed mucilage. To determine the experimental treatments, four independent variables were used, including different levels of soy protein isolate, broad bean protein isolate, carboxymethyl cellulose (CMC), and *Balangu Shirazi* seed mucilage. After incorporating these components into the formulation and preparing the samples, physicochemical, textural, and sensory evaluations were performed. The results of the batter textural properties showed that increasing the levels of protein isolates and *Balangu Shirazi* seed mucilage led to an increase in batter firmness. The highest and lowest firmness values were observed in sample 5 (2% soy protein isolate, 2% broad bean protein isolate, 0.25% CMC, 0.25% *Balangu* mucilage) with 508 g, and sample 9 (4.75% soy protein isolate and 0.25% CMC) with 19 g, respectively. Using broad bean protein isolate compared to soy protein isolate resulted in reduced baking loss (the lowest baking loss belonged to sample 3 containing 4% soy protein isolate, 0.5% CMC, and 0.5% *Balangu Shirazi* mucilage, with 21.56%) and increased porosity (the highest porosity was observed in sample 7 containing 4.5% broad bean protein isolate and 0.5% *Balangu* mucilage, with 31.6%). Additionally, the use of CMC compared to *Balangu Shirazi* mucilage led to a greater reduction in baking loss. However, regarding porosity, a considerable increase was observed when soy protein isolates and *Balangu* mucilage were used simultaneously. Soy protein isolate increased bread firmness (the highest firmness was recorded for sample 11, containing 4.75% soy protein isolate and 0.25% CMC, with 1328.27 g), while broad bean protein isolates decreased firmness (the lowest firmness belonged to sample 12, containing 5% broad bean protein isolate, with 140.17 g). Simultaneous use of soy protein isolates and *Balangu* mucilage improved the cohesiveness of the gluten-free bread samples. Regarding crust browning index, the effect of soy protein isolate was greater than that of broad bean protein isolate. Finally, to determine the optimal gluten-free bread formulation, the optimization section of the software indicated that 0.981% soy protein isolate, 3.59% broad bean protein isolate, and 0.422% *Balangu Shirazi* seed mucilage constituted the best formulation for producing gluten-free bread in this study.

DOI: 10.48311/fsct.2026.117083.82909

*Corresponding Author E-