

بررسی اثر صمغ‌های گوار و زانتان بر خصوصیات ویسکوالاستیکی کیک اسفنجی بدون گلوتن با استفاده از آزمون رهایی تنش

هادی باقری^{a*}، عبدالستار عوض صوفیان^b، مهرا ن اعلمی^c

^a دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^b دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^c دانشیار دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت مقاله : ۱۳۹۴/۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۶/۱۰

چکیده

مقدمه: با توجه به نیاز تغذیه‌ای بیماران سلیاکی به یک رژیم غذایی فاقد گلوتن، مطالعه در مورد تولید و بهبود محصولات بدون گلوتن افزایش یافته است. با توجه به برخی از مشکلات کیفی مانند حجم پایین و بافت ضعیف در محصولات بدون گلوتن نظیر کیک برنجی، استفاده از ترکیبات بهبود دهنده مانند هیدروکلئیدها که خواص ویسکوالاستیک گلوتن را شبیه‌سازی می‌کنند، ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که گلوتن به عنوان یک ترکیب ویسکوالاستیک شناخته می‌شود و با توجه به عدم حضور گلوتن در کیک برنجی و استفاده از هیدروکلئیدها که منجر به تغییر خصوصیات ویسکوالاستیک خواهد گردید، بنابراین مطالعه رفتار ویسکوالاستیک کیک برنجی بدون گلوتن حاوی هیدروکلئیدها ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه اثر صمغ‌های گوار و زانتان بر خصوصیات ویسکوالاستیکی کیک برنجی بدون گلوتن با استفاده از آزمون رهایی تنش مورد مطالعه قرار گرفت و سپس توسط دو مدل پلگ-نورمند و ماکسول تعمیم یافته مورد مدل‌سازی قرار گرفت. آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه و به منظور مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش غلظت صمغ‌های گوار و زانتان، مقدار F_0 ، K_1 ، K_2 و پارامترهای مدل ماکسول کاهش یافت. این بدین معنی است که با افزودن صمغ گوار و زانتان نرخ کاهش نیروی اولیه افزایش یافت، بنابراین رفتار کیک حاوی صمغ، بیشتر متمایل به رفتار شبه مایع می‌باشد. با توجه به SSE و R^2 مدل می‌توان بیان کرد که مدل پلگ-نورمند نیز می‌تواند به شکلی مناسب رفتار تنش ویسکوالاستیک کیک بدون گلوتن را در طول زمان توجیه نماید اما نسبت به مدل ماکسول از اعتبار پائین‌تری برخوردار است.

نتیجه گیری: خصوصیات ویسکوالاستیکی کیک بدون گلوتن حاوی صمغ گوار و زانتان بهبود یافته و رفتار کیک حاوی صمغ متمایل به رفتار شبه مایع گردید.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات ویسکوالاستیک، صمغ گوار، کیک بدون گلوتن، مدل ماکسول تعمیم یافته، مدل پلگ - نورمند

مقدمه

بیماری سلیاک یک بیماری تغذیه‌ای مزمن مربوط به التهاب روده کوچک می‌باشد که باعث اشکال در جذب مواد مغذی و آسیب به مخاط روده می‌شود. تنها درمان موثر برای بیماری سلیاک پای‌بندی به یک رژیم غذایی فاقد گلوتن در سراسر طول عمر بیمار می‌باشد (Lazaridou *et al.*, 2007). این افراد باید از مصرف برخی پروتئین‌های ذخیره‌ای نظیر گلایدین، سکالین و هوردرئین اجتناب کنند (Turabi *et al.*, 2008). برنج یکی از مهمترین غلات مناسب برای تهیه رژیم‌های غذایی فاقد گلوتن برای بیماران مبتلا به سلیاک می‌باشد. برنج دارای خواص تغذیه‌ای منحصر به فرد، ضد حساسیت، بی‌رنگ، دارای طعم دلپذیر و دارای مقادیر کم سدیم، پروتئین، چربی، فیبر و مقادیر زیاد کربوهیدرات‌های با قابلیت هضم بالاست. از این رو استفاده از آن در غذاهای کودک، پودینگ‌ها و غذای بیماران مبتلا به سلیاک افزایش یافته است (Gujral *et al.*, 2003). به هر حال، محصولات بر پایه برنج در مقایسه با محصولات بر پایه گندم به علت نداشتن گلوتن، کیفیت پایینی دارند و باعث برخی از مشکلات کیفی محصول مانند حجم پایین و بافت ضعیف می‌شوند. بنابراین، استفاده از مواد پلیمری مانند هیدروکلوئیدها که خواص ویسکوالاستیک گلوتن را شبیه‌سازی می‌کنند (Gallagher *et al.*, 2004)، ضروری به نظر می‌رسد. هیدروکلوئیدها به طور گسترده به عنوان یک ماده افزودنی و عملگر در تولید محصولات نانویی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثرات عملکردی هیدروکلوئیدها از توانایی آنها برای تغییر خواص رئولوژی خمیرها و محصولات پخت تا حفظ کیفیت محصولات نهایی پخت را شامل می‌شود. در همین راستا Turabi و همکاران (۲۰۱۰) ساختمان داخلی کیک برنجی بدون گلوتن در حضور صمغ‌های گوار، دانه‌ی لوکاست، کاراگیان و ترکیبی از گوار و زانتان مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که افزودن انواع صمغ‌ها بر خلل و فرج تاثیر معنی داری دارد و بیشترین آن متعلق به زانتان و ترکیب زانتان و گوار می‌باشد. در تحقیقی دیگر Turabi و همکاران (۲۰۰۸) خصوصیات کیک برنجی بدون گلوتن را در حضور صمغ زانتان و ترکیب زانتان و

گوار که در ماکروفر مادون قرمز پخت شد، مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که بیاتی کیک‌ها بطور معنی‌داری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین Demirkesen و همکاران (۲۰۱۰) اثر صمغ‌های گوار و زانتان، دانه لوکاست، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز، پکتین، زانتان-گوار، دانه زانتان و امولسیفایر داتم را بر خصوصیات رئولوژیکی نان بدون گلوتن بر پایه‌ی آرد برنج مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج این پژوهش، بیشترین میزان الاستیسیته در نمونه های حاوی صمغ زانتان، زانتان-گوار و زانتان-دانه‌ی لوکاست مشاهده شد. از آنجا که گلوتن به عنون یک ترکیب ویسکوالاستیک شناخته می‌شود و با توجه عدم حضور گلوتن در کیک برنجی و استفاده از هیدروکلوئیدها که منجر به تغییر خصوصیات ویسکوالاستیک خواهد گردید، بنابراین مطالعه رفتار ویسکوالاستیک کیک برنجی بدون گلوتن حاوی هیدروکلوئیدها ضروری به نظر می‌رسد.

آزمون رهایی تنش^۲ یکی از مقبول‌ترین روش‌های تعیین رفتار ویسکوالاستیکی مواد غذایی می‌باشد، زیرا به سادگی و با استفاده از دستگاه‌های بافت‌سنج قابل‌سنجش و اندازه‌گیری است (Sandoval *et al.*, 2009). این آزمون به طور گسترده‌ای برای بررسی خواص ویسکوالاستیک مواد غذایی به کار می‌رود. در این آزمون نمونه تحت یک تغییر شکل سریع و از پیش تعیین شده قرار می‌گیرد، سپس مقادیر تنش به عنوان تابعی از زمان در یک تغییر شکل ثابت اندازه‌گیری می‌شود (Sumnu, 2006; Yadav & Sahin *et al.*, 2006). اندازه و سرعت کاهش تنش پس از اعمال کرنش مورد نظر وابسته به ساختار ملکولی ماده غذایی و مقدار کرنش اعمال شده است. معمولاً مقدار تنش باقیمانده^۲ بعد از سپری شدن زمان آزمون در مواد ویسکوالاستیک جامد عددی بزرگتر از صفر می‌باشد، در حالی که در مواد ویسکوالاستیک مایع مقدار تنش باقیمانده برابر صفر است. رفتار ویسکوالاستیک خمیر آرد گندم و چندین محصول تجاری مانند سوسیس، پنیر و ژله با استفاده از آزمون رهایی تنش توسط Singh و همکاران (۲۰۰۶) مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که مدل پلگ^۳ دارای حساسیت پائینی در ارتباط با طبیعت ویسکوالاستیک مواد است و باید هنگام استفاده از این مدل

¹ Strees Relaxation² Residual Stress³ Peleg Model

حاوی ۳۳ درصد آرد برنج، ۳۳ درصد پودر قند، ۹ درصد روغن گیاهی، ۲۳ درصد تخم مرغ تازه، بیکنینگ پودر ۱ درصد و پودر آب پنیر ۱ درصد بود، انجام گرفت. جهت تولید کیک برنجی، ابتدا ترکیبات مورد نظر شامل آرد برنج، بیکنینگ پودر، پودر آب پنیر به طور کامل با یکدیگر مخلوط شدند. شکر و روغن را در ظرف دیگری مخلوط نموده تا به صورت مایع کرم رنگی درآیند. سپس تخم مرغ‌های زده شده را به مخلوط شکر و روغن اضافه نموده و ۵ دقیقه تا مخلوط شدن کامل همزده می‌شوند. در این مرحله ترکیبات خشک فرمول، به طور همزمان به این مخلوط افزوده و به مدت ۳ دقیقه با دور پایین همزن، مخلوط می‌شوند. خمیر آماده شده را در قالب‌هایی با اندازه مشخص ریخته و به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۱۸۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در فر گازی پخته شد و پس از سرد شدن هر یک از نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلن و در دمای محیط برای انجام آزمون‌ها نگهداری شد (Turabi et al., 2008)

- آزمون رهایی تنش

برای انجام آزمون رهایی تنش از دستگاه بافت سنج (Model TA.XT, plus) (شرکت استیل میکرو سیستم، انگلستان) استفاده شد. برای اندازه‌گیری رهایی تنش، کیک آماده شده روی صفحه آزمون دستگاه قرار گرفته و با پروب استوانه‌ای ۱۰۰ میلی‌متری (P/100) آزمون اجرا شد. آزمایشات بدین صورت بود که هر نمونه کیک با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه توسط پروب دستگاه تحت فشار محوری قرار گرفت بعد از اینکه نمونه‌ها به تغییر شکل معین ثابت (کرنش ۲۰٪) رسیدند، دستگاه با ثابت نگه داشتن مقدار تغییر شکل ایجاد شده در نمونه، مقدار نیروی متناظر با آن (نیروی اعمال از سمت خمیر به پروب دستگاه) را به مدت ۷۵ ثانیه ثبت و منحنی نیرو بر حسب زمان رسم شد در این آزمون اثر صمغ‌های گوار و زانتان براساس جدول ۱ و کرنش ثابت (۲۰٪) بر ویژگی‌های منحنی رهایی تنش، به عنوان مشخصه‌ای از ویژگی‌های ویسکوالاستیک خمیر کیک برنجی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت (باقری و همکاران، ۱۳۹۳).

دقت بیشتری به خرج داد. سه مدل عمومی به نام‌های مدل ماکسول تعمیم یافته^۱، پلگ-نورمند^۲ و ناسینوویچ^۳ برای بررسی رفتار ویسکوالاستیکی ارقام مختلف خرما در طی مرحله رسیدن توسط Hassan و همکاران (۲۰۰۵) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج کار این پژوهشگران نشان داد که هر سه مدل به کار رفته برای برآزش داده‌ها از اعتبار بالای برخوردار بودند، اما مدل ماکسول تعمیم یافته برآزش داده‌ها را با دقت بالاتری انجام می‌دهد. باقری و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی اثر جایگزینی آرد سورگوم بر خصوصیات ویسکوالاستیک خمیر گندم با استفاده از آزمون رهایی تنش نشان دادند که با افزایش جایگزینی آرد سورگوم پارامترهای مدل پلگ-نورمند (K_1 و K_2) کاهش یافت و عنوان کردند که برآزش داده‌های تجربی با مدل پلگ نورمند نشان‌دهنده کارایی این مدل برای برآزش داده برای کرنش‌های بالا (۲۰ درصد) می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی بهبود خصوصیات ویسکوالاستیکی کیک برنجی با استفاده از هیدروکلوئیدها (گوار و زانتان) می‌باشد. این مطالعه شامل ارزیابی مدل‌های مختلف از جمله مدل پلگ-نورمند و مدل ماکسول تعمیم یافته برای برآزش داده‌های رهایی تنش می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده برای تهیه کیک برنجی شامل، آرد برنج (رطوبت ۹/۲ درصد، پروتئین ۸/۴۳ درصد و خاکستر ۰/۴ درصد)، روغن گیاهی، پودر قند، تخم مرغ، آب، پودر آب پنیر، بیکنینگ پودر بود. برنج طارم از کارخانه شالی‌کوبی شهرستان گرگان به صورت نیم‌دانه تهیه شد. سپس با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی مدل ولتا-۲۵۰۰ به آرد تبدیل شد. همچنین صمغ زانتان با نام تجاری Rhodia Gel (Xanthan Gum, E415) از شرکت Rhodia food و گوار از شرکت سوئیسی Procisco تهیه گردید. سایر مواد مورد استفاده از فروشگاه‌های معتبر شهرستان گرگان تهیه شدند.

- روش تهیه خمیر و کیک برنجی

دستور تهیه خمیر کیک بر طبق روش Turabi و همکاران (۲۰۰۸) با کمی تغییراتی در مقدار مواد اولیه که

¹ Generalized Maxwell Model

² Peleg-Normand

³ Nussinovitch

- مدل سازی رفتار رهایی تنش

مدل ماکسول که اغلب برای نشان دادن رفتار رهایی تنش مواد کشاورزی استفاده می شود شامل یک فنر و یک ضربه گیر که به صورت سری متصل شده اند، می باشد. از کنار هم قرار گرفتن چند مدل ماکسول ساده، مدل ماکسول تعمیم یافته بدست می آید. در مدل ماکسول تعمیم یافته، مقادیر تنش از مقدار اولیه به صفر می رسند و تنش تعادلی وجود ندارد، این در حالی است که اکثر مواد ویسکوالاستیک (مخصوصاً ویسکوالاستیک شبه جامد) بعد از زمان طولانی رهایی، مقدار تنش به صفر نمی رسد و دارای یک تنش تعادلی است. برای حل این مسئله یک فنر به صورت موازی با مدل ماکسول تعمیم یافته در نظر می گیرند که نشان دهنده مدول رهایی تعادلی (مدل ماکسول تعمیم یافته تعادلی) است. معادله مربوط به مدل تعمیم یافته ماکسول با فنر اضافی توسط رابطه زیر ارائه می شود.

$$F(t) = F_a \exp(-t/\lambda_a) + F_b \exp(-t/\lambda_b) + F_c \exp(-t/\lambda_c) + F_e \quad (1)$$

هر کدام از جملات مدل با اندیس های a ، b و c نشان داده شده است. تابع زمانی تنش حاصل جمع سه جمله ای، a ، b ، c و یک عدد ثابت مربوط به فنر اضافی است. به دلیل اینکه جمله ای اول در مدل سه جزئی ماکسول بیشترین سهم را در توصیف رفتار مدل دارد، مقادیر جزء الاستیک و زمان رهایی (F و λ) مربوط به آن در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است (Hassan et al., 2010; Campus et al., 2005). با توجه به نتایج و پژوهش محققانی همچون Campus و همکاران (۲۰۱۰) (که جمله ای اول مدل را جمله ای دانستند که داری بیشترین مقدار جزء الاستیک و زمان رهایی تنش بوده و مقدار زمان رهایی آن را به عنوان زمان رهایی تنش ماده عنوان کردند) ما نیز جمله ای که دارای بیشترین مقدار جزء الاستیک و زمان رهایی بوده، را به عنوان جمله اول در نظر گرفتیم و زمان رهایی ماده را براساس جمله اول تعیین کردیم. بنابراین در این فرمول، $F(t)$ مقدار نیرو در هر لحظه از زمان، F_e نشان دهنده تنش تعادلی یا تنش باقیمانده (مقدار تنش وقتی که t به سمت بی نهایت میل

می کند)، F_a ، F_b ، F_c نیروهای کاهشی^۱ می باشند و λ_a ، λ_b ، λ_c زمان های رهایی هستند. داده های تجربی با استفاده از رگرسیون غیر خطی با استفاده از نرم افزار سیگما پلات نسخه ۱۱ مورد برازش قرار گرفتند. همچنین Peleg (۱۹۸۰) معادله زیر (۲) که یک مدل دو پارامتری خطی می باشد، را برای بررسی و برازش خصوصیات ویسکوالاستیکی ارائه دادند.

$$(F_0 t) / (F_0 - F(t)) = K_1 + K_2 t \quad (2)$$

F_0 نیروی اولیه (نیوتن)، $F(t)$ نیروی لحظه ای در هر زمان (نیوتن) و K_1 (ثانیه) و K_2 (بدون بعد) ثابت های معادله اند. مقدار K_1 و K_2 از روی شیب و عرض از مبدا نمودار نرمال شده نیرو و زمان با استفاده از رگرسیون خطی^۲ بدست می آید.

منظور از نمودار نرمال شده نیرو و زمان عبارت است از مدل دو پارامتری پلگ و نورمند که به صورت نمودار نیرو و زمان درآمده است و اصولاً منظور از نیرو نرمال شده همان عبارت اول مدل پلگ-نورمند است. نیروی نسبی^۳ نیز برای داده های تجربی از طریق فرمول ۳ مورد محاسبه قرار گرفت که F_0 نیروی اولیه (نیوتن) و $F(t)$ نیروی لحظه ای در هر زمان (نیوتن) می باشد (Peleg and Normand, 1983)

$$RF = F(t) / F_0 \quad (3)$$

- طرح آماری و نحوه برازش داده ها

پس از به دست آوردن داده های تنش- زمان، مدل های ماکسول تعمیم یافته و پلگ-نورمند (رابطه ۱ و ۲) بر داده های حاصل از آزمایش برازش و ثابت های مربوط به مدل استخراج شد. برازش مدل بر روی داده های تجربی توسط نرم افزار آماری اکسل و سیگما پلات نسخه ۱۲ انجام گرفت. برای پیدا کردن ثابت های مربوط به مدل رئولوژیکی پلگ-نورمند از روش آنالیز رگرسیون خطی و برای پیدا کردن ثابت های مربوط به مدل ماکسول تعمیم یافته از روش رگرسیون غیر خطی استفاده شد. تمامی آزمون ها و تیمارها با سه تکرار انجام شد. همچنین به منظور آنالیز آماری داده ها از آنالیز واریانس یک طرفه و به منظور مقایسه میانگین ها از آزمون دانکن استفاده شد.

¹ Decay Forces² Linear Regression³ Relative Force

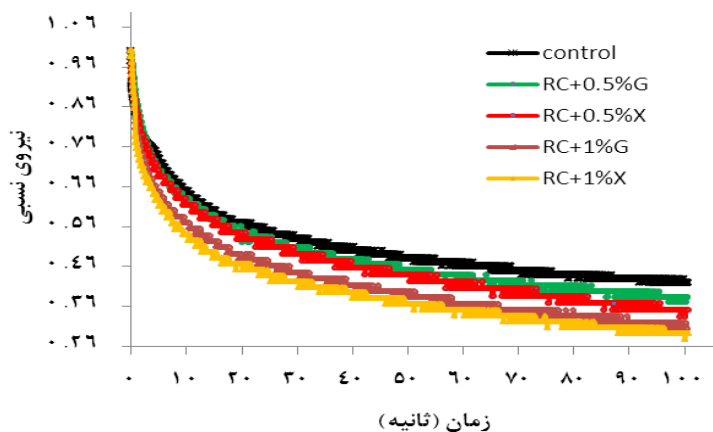
یافته‌ها

است. همچنین نتایج مربوط به مدل‌سازی خصوصیات ویسکوالاستیکی با دو مدل پلک-نورمند و مدل ماکسول تعمیم یافته در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است.

نیروی اولیه لازم برای اعمال کرنش ثابت و نمودار کاهش نیروی نسبی در شکل ۱ و جدول ۲ برای نمونه‌های مختلف حاوی درصد‌های مختلف صمغ گوار و زانتان آورده شده

جدول ۱- تیمارهای مورد آزمون

ردیف	نمونه کیک	نوع صمغ	درصد صمغ	توضیحات	حروف اختصاری
۱	کیک برنجی (شاهد)	---	صفر		RC
۲		گوار	۰/۵		RC + 0.5%G
۳			۱		RC + 1%G
۴		زانتان	۰/۵		RC + 0.5X
۵	کیک برنجی +		۱		RC + 1%X
۶	صمغ		۰/۵	(۰/۲۵ درصد از هر صمغ)	RC + 0.25%G + 0.25%X
۷		ترکیب صمغ گوار	۱	۰/۲۵ درصد زانتان + ۰/۷۵ درصد گوار	RC + 0.75%G + 0.25%X
۸		و زانتان	۱	۰/۷۵ درصد زانتان + ۰/۲۵ درصد گوار	RC+0.25%G+ 0.75%X
۹			۱	۰/۷۵ درصد زانتان + ۰/۵ درصد گوار	RC+0.5%G+0.5%X



شکل ۱- اثر غلظت‌های مختلف صمغ‌های گوار و زانتان بر مقدار نیروی نسبی در کیک بدون گلوتن

جدول ۲- پارامترهای برازش شده مدل پلک- نورمند با استفاده از داده‌های رهایی تنش در کیک بدون گلوتن حاوی سطوح مختلف صمغ‌های گوار و زانتان

تیمارها	F ₀ (N)	K ₁ (S)	K ₂	SSE	R ²
RC	۹/۲۸ ^a	۶۲۶/۹ ^a	۴/۹۷۹۸ ^a	۰/۰۴۱	۰/۸۰۷۳
RC + 0.5%G	۶/۸۶۹۲ ^b	۶۰۰/۵۷ ^d	۴/۶۳۳۹ ^b	۰/۰۲۳۱	۰/۸۹۸۱
RC + 1%G	۶/۶۸۸۲ ^b	۵۸۴/۰۷ ^e	۴/۵۵۰۴ ^c	۰/۰۴۱۱	۰/۸۴۲۶
RC + 0.5%X	۶/۳۸۹۰ ^c	۶۱۰/۵۷ ^c	۴/۴۵۸۹ ^e	۰/۰۳۱۱	۰/۸۴۰۴
RC + 1%X	۶/۱۳۸۹ ^d	۵۹۵/۹۷ ^{ed}	۴/۲۲۱۵ ^f	۰/۰۴۱۱	۰/۸۵۶۴
RC + 0.25% X+0.25% G	۶/۴۷۱۵ ^{bc}	۶۱۹/۱۴ ^b	۴/۵۹۲۴ ^{bc}	۰/۰۲۱۴	۰/۸۰۹۵
RC + 0.75% X + 0.25% G	۵/۶۹۰۷ ^e	۵۷۳/۱۴ ^f	۳/۹۶۳۶ ^h	۰/۰۲۱۲	۰/۸۵۸۲
RC+0.25% X + 0.75% G	۶/۲۷۹۶ ^c	۵۶۸/۰۶ ^g	۴/۰۶۸۹ ^g	۰/۰۷۱۱	۰/۸۹۳۶
RC+0.5%G+0.5%X	۵/۸۴۹۶ ^{de}	۵۹۶/۳۱ ^{ed}	۴/۰۳۶۸ ^g	۰/۰۵۱۲	۰/۸۲۸۳

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

جدول ۳- پارامترهای برازش شده مدل سه پارامتری ماکسول با استفاده از داده‌های رهایی تنش در کیک بدون گلوتن حاوی صمغ‌های گوار و زانتان

تیماها	Fe	Fa	Fb	Fc	λ_a	λ_b	λ_c	SSE	R2
RC	۷/۷۸۵ ^a	۰/۷۴۹۹ ^c	۰/۱۵۰۳ ^{cd}	۰/۷۳۱۵ ^b	۱۰۸/۹۹۱۸ ^a	۶/۰۰۶ ^c	۱۰۸/۹۹۱۸ ^a	۰/۰۰۱۵	۱
RC + 0.5%G	۵/۵۲۷ ^b	۰/۶۲۳۴ ^{de}	۰/۳۶۵۵ ^b	۰/۳۵۴۹	۶۸/۹۱۸۰ ^f	۳۰/۷۸۷۰ ^b	۳۰/۷۸۷۰ ^f	۰/۰۰۰۱۶	۰/۹۹
RC + 1%G	۵/۱۶۴۸ ^c	۰/۶۷۹۳ ^d	۰/۰۳۴۱ ^f	۰/۶۵۸۴ ^{bc}	۱۶۳/۹۳۴۴ ^{de}	۱۲/۶۹۰۳ ^d	۱۶۳/۹۳۴۴ ^{de}	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹
RC + 0.5%X	۵/۲۰۶ ^c	۰/۵۸۹۳ ^c	۰/۰۱۵۵ ^f	۰/۵۷۹۷ ^c	۱۲۰/۴۸۱۹ ^e	۷/۰۸۲۱ ^e	۱۲۰/۴۸۱۹ ^e	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹
RC + 1%X	۴/۳۰۹ ^e	۰/۸۲۲۳ ^b	۰/۱۹۹۸ ^c	۰/۸۰۸۷ ^b	۳۳۱/۱۲۵۸ ^b	۳۲/۷۸۶۸ ^b	۳۳۱/۱۲۵۸ ^b	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹
RC + 0.25%X+0.25%G	۴/۲۲۵ ^f	۱/۰۷۳ ^a	۰/۱۲۱۰ ^d	۱/۰۵۳ ^a	۳۲۱/۹۵۷۵ ^b	۲۴/۲۴۴۴ ^{bc}	۳۲۱/۹۵۷۵ ^b	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹
RC + 0.75%G + 0.25%X	۴/۵۸۸ ^d	۰/۶۶۵۷ ^d	۰/۰۶۸۸ ^e	۰/۶۴۶۲ ^{bc}	۱۸۸/۶۷۹۳ ^d	۲۰/۳۶۶۵ ^c	۱۸۸/۶۷۹۳ ^d	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹
RC+0.25%G+ 0.75%X	۴/۶۳۳ ^d	۰/۴۱۱۹ ^f	۰/۶۸۳۱ ^a	۰/۵۴۸۳ ^c	۷۹۱/۱۳۹ ^a	۷۰/۶۲۱۴ ^a	۷۹۱/۱۳۹ ^a	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹
RC+0.5%G+0.5%X	۴/۲۱۴ ^f	۰/۷۶۷۳ ^c	۰/۱۱۸۸ ^d	۰/۷۴۹۳ ^b	۲۵۳/۶۱۴ ^c	۲۷/۷۴۶۹ ^{bc}	۲۵۳/۶۱۴ ^c	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد است.

بحث

است. افزودن صمغ گوار و زانتان باعث افزایش سرعت و نرخ کاهش اولیه رهایی تنش شد و مقدار نیروی باقیمانده نسبی^۲ نیز با افزایش غلظت صمغ کاهش یافت، به طوری که پس از اتمام زمان آزمایش، مقدار نیروی باقیمانده در نمونه کیک بدون گلوتن حاوی ۱ درصد صمغ زانتان داری کمترین مقدار بود (شکل ۱). و نمونه شاهد (کیک بدون گلوتن) داری بالاترین مقدار نیروی باقیمانده بود. این بدین معنی است که با افزایش غلظت صمغ‌ها، رفتار خمیر متمایل به شبه مایع می‌شود و کیک بدون گلوتن داری سطوح بالاتر صمغ رفتار مشابه رفتار ویسکوالاستیک شبه مایع دارند. افزودن صمغ به کیک گلوتن، صمغ به عنوان یک ماده شبه گلوتن عمل کرده و در نتیجه باعث ایجاد خاصیت ویسکوالاستیسیته در کیک بدون گلوتن می‌شود، بنابراین افزودن صمغ به کیک بدون گلوتن، باعث جبران کمبود گلوتن ناشی از جایگزینی آرد شده و خصوصیات ویسکوالاستیسیته کیک را بهبود می‌دهد.

با توجه به ضرایب آورده در جداول ۲ و ۳ و مقایسه R^2 و SSE مشاهده شد که مدل تعمیم یافته ماکسول نسبت به مدل پلگ-نورمند برازش بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج محققان دیگری همچون Hassan و همکاران (۲۰۰۵) نیز نشان از برتری مدل تعمیم یافته ماکسول برای پیشگویی داده‌های تجربی رفتار ویسکوالاستیک می‌باشد.

علت برتری مدل پلگ به مدل ماکسول، ساده بودن شکل ریاضی آن است، که این محاسبه ضرایب را ساده‌تر می‌کند (Al-Haik et al., 2006; Peleg, 1980). نتایج

با افزایش غلظت هر دو صمغ مقدار F_0 کاهش یافت که این کاهش در نمونه‌های حاوی صمغ زانتان بیشتر بود (جدول ۲). علت کاهش مقدار F_0 با افزایش مقدار صمغ احتمالاً به دلیل ایجاد شبکه و توانایی صمغ‌ها در حفظ آب یا ایجاد واکنش بین ترکیبات هیدروفیل موجود در صمغ‌ها با پروتئین گلوتن موجود در آرد گندم است. این واکنش‌ها می‌تواند باعث کاهش مقدار نیروی F_0 و در نتیجه کاهش سختی کیک شود. به عبارت دیگر این امر بدان علت است که صمغ‌ها به دلیل دارا بودن ساختار هیدروفیل قادر به جذب آب می‌باشد، که این خود سبب کاهش میزان نیروی لازم فشردن بافت کیک، به تعویق افتادن بیاتی و افزایش ماندگاری آن می‌گردد. بررسی اثر متقابل این دو صمغ نشان داد که نمونه دارای ترکیب ۰/۲۵ درصد زانتان و ۰/۷۵ گوار از کمترین میزان نیروی اولیه (F_0) نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار بودند و این نشان‌دهنده کاهش سختی بافت این نمونه نسبت به سایر نمونه‌های می‌باشد (جدول ۲).

شکل ۱ منحنی رهایی تنش در کیک بدون گلوتن با درصدهای مختلف صمغ‌های گوار و زانتان طی زمان را نشان می‌دهد با سپری شدن زمان، نرخ کاهش مقدار نیروی نسبی در تمام نمونه‌ها کاهش یافت که این امر نشان‌دهنده ثابت شدن کرنش اعمال شده است. در بیشتر مواد غذایی بعد از به کارگیری یک کرنش ثابت، یک کاهش در مقدار نیرو برای حفظ تغییر شکل قابل مشاهده

¹ Relative Residual Force

عناصر الاستیک در المان‌های ماکسول می‌تواند توسط نیروهای کاهش^۲ (F_c و F_b , F_a) نشان داده شوند که به طور غیر مستقیم جامدیت (سختی) ماده مورد آزمایش را نشان می‌دهد. زمان‌های رهایی λ_a , λ_b و λ_c به عنوان زمانی تعریف می‌شود که طول می‌کشد تا ماکرومولکول‌ها منبسط شوند، وقتی که تغییر شکل داده‌اند، و عبارت است از نسبت ویسکوزیته جزء دشپات به مدول الاستیسیته جزء فتر می باشد (Sozer et al., 2007). برای برآزش خوب مدل به داده های حاصل از آزمایش معمولا ۲ یا ۳ المان مورد نیاز است. جدول ۳ مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول را که با استفاده از معادله‌ی ۱ و روش رگرسیون غیر خطی محاسبه شده برای کیک بدون گلوتن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با توجه به افزودن صمغ‌های گوار و زانتان، این مقادیر دارای تغییرات مشخصی است. با توجه به این موارد و با در نظر گرفتن اینکه، مقدار زمان رهایی بسته به سهم ویژگی ویسکوز یا الاستیک ماده متفاوت، و برای مواد جامدالاستیک بسیار طولانی ولی برای مواد ویسکوالاستیک بین 10^{-1} تا 10^{-9} متغیر است، گستره‌ی زمان رهایی بین ۶۸ تا ۷۹۱ ثانیه متغیر بوده و متوسط آن برابر با ۲۶۰ ثانیه است (در این پژوهش، F_a و λ_a به عنوان جمله اول در نظر گرفته شد). کاهش تنش (یا نیروی معادل آن) در مواد ویسکوالاستیک به تدریج صورت گرفته و بسته به ساختار مولکولی ماده در یک زمان معین متوقف می‌شود. این کاهش تنش (یا نیرو) تا یک تنش یا نیروی تعادلی (F_e) که بزرگتر از صفر می باشد ادامه می‌یابد. به طور کلی و با توجه به نتایج جدول ۳ مقدار نیروی تعادلی که محدوده تغییرات آن بین $4/225$ تا $7/785$ نیوتون می‌باشد، با افزودن صمغ-های گوار و زانتان مقدار نیروی تعادلی به طور نسبی کاهش یافت و مقدار F_0 (نیروی لازم برای ایجاد کرنش ثابت در زمان صفر) نیز که با مجموع اجزاء نیرو برابر است از $9/28$ تا $5/84$ نیوتن متغیر بوده و دارای روند تغییرات مشابه با F_e است. Kajuna و همکاران (۱۹۹۸) اظهار نموده‌اند که کاهش مجموع مقادیر F_a , F_b و F_c به عنوان اجزاء الاستیک در مدل ماکسول حاکی از کاهش ویژگی الاستیسیته‌ی ماده‌ی تحت آزمایش است. بررسی تغییرات خواص ویسکوالاستیک کیک بدون گلوتن نشان داد که

مدل پلگ- نورمند در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به SSE و R^2 مدل می‌توان بیان کرد که مدل پلگ- نورمند نیز می‌تواند به شکلی مناسب رفتار تنش ویسکوالاستیک کیک بدون گلوتن را در طول زمان توجیه نماید، اما نسبت به مدل ماکسول از اعتبار پائین تری برخوردار است. مطابق با نتایج سایر محققین Hassan و همکاران (۲۰۰۵) و Moghimi و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه خطاهای مدل پلگ با مدل تعمیم یافته ماکسول نشان می‌دهد که مدل ماکسول عملکرد بهتری داشته است.

معکوس مقدار K_1 در مدل پلگ-نومند، نشان دهنده اندازه و نرخ کاهش نیروی اولیه^۱ است. از این رو افزایش مقدار K_1 باعث افت سرعت کاهش تنش ناشی از اعمال کرنش می‌شود و بالعکس کاهش مقدار K_1 باعث افزایش سرعت کاهش تنش ناشی از اعمال کرنش می‌شود (Wu et al, 2012).

پائین‌ترین مقدار K_1 در نمونه حاوی ۰/۷۵ درصد زانتان و ۰/۲۵ گوار و بالاترین مقدار K_1 در نمونه شاهد دیده شد. افزودن صمغ گوار و زانتان باعث کاهش مقدار K_1 نمونه شد. این بدین معنی است که با افزودن غلظت گوار و زانتان سرعت افت تنش ناشی از اعمال کرنش افزایش یافت، بنابراین رفتار کیک حاوی صمغ، بیشتر متمایل به رفتار شبه مایع می‌باشد (جدول ۲).

مقدار K_2 نشان دهنده درجه جامد بودن یک ماده غذایی است و مقدار آن بین ۱ تا بی‌نهایت متغیر است. به عبارت دیگر شاخصی از درجه سفتی محصول یا ماده غذایی می‌باشد. برای مواد مایع واقعی مقدار آن برابر با یک و برای الاستیک ایده‌آل که قابلیت رهایی ندارند مقدار آن بی‌نهایت است (Peleg & Normand, 1983). مقدار k_2 نیز در کیک حاوی صمغ کاهش یافت که این نشان دهنده این است که کیک حاوی صمغ رفتار متمایل به شبه مایع از خود به نمایش می‌گذارد (جدول ۲). Singh و همکاران (۲۰۰۶) عنوان کردند که مقدار K_2 معرف بهتری برای طبیعت الاستیک مواد غذایی است بنابراین رفتار کیک بدون گلوتن در این مطالعه رفتار شبه جامدتری از خود به نمایش گذاشت و با افزایش صمغ‌ها به خصوص صمغ زانتان، رفتار شبه مایع تری در کیک بدون گلوتن دیده شد.

¹ Initial Decay Rate

² Decay Force

(Sparus aurata L.) following high pressure treatment. *Journal Food Engineering*, 96, 192-198.

Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G. & Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulation. *Journal of Food Engineering*, 96, 295-303.

Gallagher, E., Gormley, T. R. & Arendt, E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal based products. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 143-152.

Gujral, H. S., Guardiola, I., Carbonell, J. V. & Rosell, C. M. (2003). Effect of cyclodextrinase on dough rheology and bread quality from rice flour. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 3814-3818.

Hassan, B. H., Alhamdan, A. M. & Elansari, A. M. (2005). Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering*, 66, 439-445.

Kajuna S., Bilanski W. K. & Mittal, G. S. (1998). Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana and plantain. *Transactions of the ASAE* 41(1), 55-61.

Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, M. & Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology & bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79, 1033-1047.

Moghim, A., Saeidirad, M. H. & Ghanji, E. (2011). Interpretation of viscoelastic behaviour of sweet cherries using rheological models. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 855-861.

Peleg, M. (1980). Linearization of relaxation and creep curves of solid biological materials. *Journal of Rheology (1978-present)*, 24, 451-463.

Peleg, M. & Normand, M. D. (1983). Comparison of two methods for stress relaxation data presentation of solid foods. *Rheological Acta*, 22, 108-113.

Sahin, S. & Sumnu, S. G. (2006). *Physical properties of foods*. Springer.

Sandoval, E. R., Quintero, A. F. & Cuvelier, G. (2009). Stress relaxation of reconstituted cassava dough. *LWT - Food Science and Technology*, 42, 202-206.

Singh, H., Rockall, A., Martin, C. R., Chung, O. K. & Lookhart, G. L. (2006). The analysis of stress relaxation data of some viscoelastic foods using a texture analyzer. *Journal of Texture Studies*, 37(4), 383-392

تغییر در ویژگی الاستیک یا ویسکوز فقط تحت تأثیر تغییرات اجزاء نیرو یا تنش نیست بلکه به شدت تغییرات اجزاء تنش یا نیرو و زمان رهایی آنها بستگی دارد. براساس نتایج مندرج در جدول ۳، در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش مقدار تنش تعادلی بزرگتر از صفر می‌باشد که این موضوع نشان می‌دهد که کیک بدون گلوتن همانند جامد ویسکوالاستیک رفتار می‌کند.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج این تحقیق، کیک بدون گلوتن یک جامد ویسکوالاستیک محسوب می‌شود که خصوصیات ویسکوز و الاستیک آن از تغییرات ایجاد شده در ترکیبات شیمیایی کیک بدون گلوتن در اثر افزودن صمغ‌های گوار و زانتان تأثیر می‌پذیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، کیک بدون گلوتن حاوی صمغ از درجه ویسکوز بالاتری برخوردار است این در حالی است که رفتار کیک بدون گلوتن فاقد صمغ در مقایسه با نمونه های حاوی صمغ، بیشتر الاستیک می‌باشد. با توجه به نتایج داده ها مدل پلک نورمند به خوبی قادر نیست، خصوصیات ویسکوالاستیک کیک بدون گلوتن را نشان دهد و براساس مقدار نیروی نرمال شده برازش داده‌ها را انجام می‌دهد، این در حالی است که مدل ماکسول تعمیم یافته، برازش داده را با استفاده از F_0 انجام می‌دهد و نتایج آن قابل قبول تر است، از طرفی دقت آنالیز مدل ماکسول تعمیم یافته در این پژوهش بالاتر است.

۱۰۸

منابع

باقری، ه.، محبی، م. و کوچکی، آ. (۱۳۹۳). بررسی اثر جایگزینی آرد سورگوم بر رفتار فارینوگرافی و ویسکوالاستیکی خمیر آرد گندم، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، جلد ۱۰، شماره ۴، ۳۱۸-۳۲۶.

Al-Haik, M. S., Hussaini, M. Y. & Garmestani, H. (2006). Prediction of nonlinear viscoelastic behavior of polymeric composites using an artificial neural network. *International Journal of Plasticity* 22, 1367-1392.

Campus, M., Addis, M. F., Cappuccinelli, R., Porcu, M. C., Pretti, L., Tedde, V., Secchi, N., Stara, G. & Roggio, T. (2010). Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream

Sozer, N., Kaya, A. & Coskun Dalgic, A. (2007). The effect of resistant starch addition on viscoelastic propertice of cooked spaghetti. *Journal of texture studies* 39 (1), 1-16.

Turabi, E., Sumnu, G. & Sahin, S. (2008). Rheological properties and quality of rice cake formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food Hydrocolloids*, 22, 305-312.

Turabi, E., Sumnu, G. & Sahin, S. (2010). Quantitative analysis of macro and micro-structure of gluten-free rice cakes containing

different types of gums baked in different ovens. *Food Hydrocolloids*, 24, 755-762.

Wu, M. Y., Chang, Y. H., Shiaui, S. Y. & Chen, C. C. (2012). Rheology of Fiber-Enriched Steamed Bread: Stress Relaxation and Texture Profile Analysis. *Journal of Food and Drug Analysis*, 20(1), 133-142.

Yadav, N., Roopa, B. S. & Bhattacharya, S. (2006). Viscoelasticity of a simulated polymer and comparison with chickpea flour doughs. *Journal of Food Process Engineering*, 29, 234–252.

بررسی اثر صمغ های گوار و زانتان بر خصوصیات ویسکوالاستیکی کیک اسفنجی