



## بررسی اثر پودر قارچ دکمه‌ای بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک کیک اسفنجی با استفاده از آزمون رهایش تنش

فخرالدین صالحی<sup>۱\*</sup> و مهدی کاشانی نژاد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۱

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

<sup>۲</sup> استاد دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

\*مسئول مکاتبه: Email: F.Salehi@Basu.ac.ir

### چکیده

به منظور بررسی اثر جایگزینی قارچ دکمه‌ای خشک شده بر خواص ویسکوالاستیک کیک اسفنجی، آزمون رهایی تنش انجام گرفت. قارچ‌ها در شرایط بهینه خشک شدند و سپس پودر قارچ جهت غنی‌سازی کیک اسفنجی در چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به عنوان جایگزین آرد گندم در فرمولاسیون استفاده شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش رهایی تنش با استفاده از دستگاه بافت سنجر طی دوره نگهداری انجام و ضرایب مدل پلگ-نورمند و ماکسول تعمیم‌یافته محاسبه شدند. نتایج نشان داد با افزایش درصد جایگزینی پودر قارچ، مقادیر نیروی اولیه و نیروی تعادلی کاهش می‌یابند. در طی زمان نگهداری کیک، مقادیر نیروی اولیه و نیروی تعادلی افزایش یافتند. پارامترهای مدل پلگ-نورمند شامل  $k_1$  و  $k_2$  با گذشت زمان کاهش یافت که بیانگر کاهش الاستیسیته کیک با گذشت زمان است. کیک‌ها رفتار جامد ویسکوالاستیک از خود نشان داده و با افزایش درصد جایگزینی، مجموع نیروهای کاهشی ( $F_3 + F_2 + F_1$ ) مدل ماکسول تعمیم‌یافته کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش الاستیسیته است. نتایج مدل‌سازی داده‌های آزمایشگاهی رهایی تنش با مدل‌های پلگ نورمند و ماکسول تعمیم‌یافته نشان داد که مدل ماکسول کارایی بیشتری جهت بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک کیک اسفنجی غنی‌شده با پودر قارچ دارد.

واژگان کلیدی: بافت، رهایی تنش، پلگ-نورمند، ماکسول، قارچ دکمه‌ای

### مقدمه

دکمه‌ای در طی دوره انبارمانی بسیار بالا بوده و خسارت اقتصادی فراوانی ایجاد می‌کند. از جمله دلایل ایجاد ضایعات و کاهش کیفیت قارچ دکمه‌ای قهوه‌ای شدن، نرخ تنفس بالا، باز شدن کلاهک، حساسیت به از دست‌دهی آب و آلودگی‌های قارچی می‌باشد. با توجه به اهمیت غذایی و اقتصادی قارچ دکمه‌ای لازم است تا با

قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) دارای ارزش غذایی و داروئی بسیار بالایی بوده و منبع بسیار عالی پروتئین، اسید آمینه‌های ضروری، ویتامین‌های گروه ب، ویتامین ث، پتاسیم، مانیتول و اسید لینولئیک می‌باشد (صالحی و همکاران ۲۰۱۶). با این حال ضایعات قارچ

کیک‌ها از نظر خصوصیات بافت سنجی مشاهده نشد و سفتی نمونه‌ها در محدوده ۲/۰۷۰-۱/۸۱۲ نیوتن بود. بر اساس نتایج ارزیابی حسی، نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر قارچ بالاترین امتیاز را از نظر پذیرش کلی داشت. آزمون رهایی تنش<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین روش‌های تعیین رفتار ویسکوالاستیکی مواد غذایی می‌باشد و با استفاده از دستگاه بافت سنج قابل‌اندازه‌گیری و بررسی می‌باشد (رودریگز-ساندوال ۲۰۰۹). در این آزمون نمونه تحت یک تغییر شکل سریع و از پیش تعیین‌شده قرار می‌گیرد، سپس مقادیر تغییر تنش به عنوان تابعی از زمان در یک تغییر کرنش ثابت اندازه‌گیری می‌شود (ساهین و سومنو ۲۰۰۶؛ یاداو و همکاران ۲۰۰۶). اندازه و سرعت کاهش تنش پس از اعمال کرنش مورد نظر، وابسته به ساختار مولکولی ماده غذایی و مقدار کرنش اعمال‌شده است. مقدار تنش باقیمانده<sup>۲</sup> بعد از سپری شدن زمان آزمون در مواد ویسکوالاستیک جامد عددی بزرگ‌تر از صفر است (ساهین و سومنو ۲۰۰۶؛ یاداو و همکاران ۲۰۰۶). جهت بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک کیک‌ها و محاسبه زمان رهایی تنش، سه مدل عمومی رهایی تنش به نام‌های مدل ماکسول تعمیم‌یافته<sup>۳</sup>، پلگ-نورمند<sup>۴</sup> و ناسینویچ<sup>۵</sup> توسط محققین بررسی‌شده‌اند (کامپوس و همکاران ۲۰۱۰؛ وزاری و مزاروس ۲۰۰۷). مدل پلگ-نورمند یک روش سریع و مؤثر برای ارزیابی داده‌های رهایی تنش محسوب می‌شود (پلگ، ۱۹۸۰؛ استف ۱۹۹۶). مدل ماکسول که اغلب برای نشان‌دادن رفتار رهایی تنش مواد کشاورزی استفاده می‌شود شامل یک فنر و یک ضربه‌گیر است که به صورت سری متصل می‌شود. از کنار هم قرار گرفتن چند مدل ماکسول ساده، مدل ماکسول تعمیم‌یافته به دست می‌آید. جهت افزایش کارایی، یک فنر به صورت

روش‌های مختلف هم مدت انبارمانی قارچ افزایش یابد و هم ویژگی‌های کیفی محصول در طول دوره انبارمانی حفظ شود (برنان و همکاران ۲۰۰۰). خشک‌کردن یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که برای نگهداری قارچ‌های دکمه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است و برای انجام این فرآیند از خشک‌کن‌های مختلفی از قبیل خشک‌کن خورشیدی، هوای داغ، انجمادی، بسترسایال، مادون قرمز و روش‌های ترکیبی مانند مادون قرمز - هوای داغ استفاده شده است (صالحی و همکاران ۲۰۱۵). با استفاده از این روش‌ها می‌توان رطوبت محصول را کاهش داد، در نتیجه مدت نگهداری آن‌ها طولانی‌تر شده و همچنین هزینه نگهداری و حمل‌ونقل کاهش می‌یابد. کمبود فیبرهای رژیمی در ساختار کیک اسفنجی، یکی از معایب آن است (لبسی و تزییا ۲۰۱۱). جهت غنی‌سازی این محصول، از محصولات خشک‌شده مختلفی استفاده شده است. برای مثال ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کیک غنی‌شده با پودر کدو حلوايي به‌عنوان جایگزین آرد گندم توسط محققان بررسی شده است (بهات و بهات ۲۰۱۳). همچنین لبسی و تزییا (۲۰۱۱) اثر افزودن فیبرهای مغزی و سیوس غلات را به کیک مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که افزودن فیبرهای مغزی به کیک باعث تولید کیک‌هایی با حجم بیشتر و بافت نرم‌تر می‌شود. ویژگی‌های کیفی کیک اسفنجی حاوی ۰،۳ و ۰،۷٪ پودر قارچ صدفی (*Pleurotus eryngii*) توسط جنونگ و شیم (۲۰۰۴) بررسی شده است. صالحی و همکاران (۲۰۱۶) غنی‌سازی کیک اسفنجی با پودر قارچ دکمه‌ای خشک‌شده در سامانه مادون قرمز-هوای داغ را مورد بررسی قرار دادند. پودر قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به‌عنوان جایگزین آرد گندم در فرمولاسیون کیک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج گزارش شده حاکی از افزایش ویسکوزیته خمیر با افزایش درصد پودر قارچ در فرمولاسیون کیک بود. با افزایش پودر قارچ دکمه‌ای اختلاف معنی‌داری بین

1-Strees Relaxation

2-Residual stress

4-Generalized Maxwell model

5-Peleg-Normand

6-Nussinovitch

نمونه‌های قارچ دکمه‌ای از سامانه مادون‌قرمز-هوای داغ با توان ۲۵۰ وات در فاصله ۵ سانتی‌متری از نمونه‌ها، دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هوای داغ با سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه استفاده گردید (صالحی و همکاران ۲۰۱۶a؛ صالحی و همکاران ۲۰۱۵؛ نوواک و لویسکی ۲۰۰۴). برش‌های خشک‌شده قارچ دکمه‌ای آسیاب شده و سپس با استفاده از الک با مش ۵۰ غربال شدند.

#### تهیه کیک اسفنجی

در این پژوهش از فرمولاسیون و روش تهیه کیک اسفنجی حاوی پودر قارچ دکمه‌ای گزارش شده توسط صالحی و همکاران (۲۰۱۶c) استفاده شد. فرمولاسیون کیک شامل آرد (۱۰۰ گرم)، تخم‌مرغ تازه (۷۲ گرم)، پودر شکر (۷۲ گرم)، روغن مایع (۵۷ گرم)، پودر آب‌پنیر (۴ گرم)، پودر شیر خشک (۲ گرم)، بیکنگ پودر (۲ گرم)، وانیل (۰/۵ گرم) صمغ گزانتان (۰/۲۵ گرم) و آب (۳۰ گرم) بود. آرد گندم مخصوص قنادی با رطوبت ۱۱/۸ درصد، ۰/۵۰ درصد خاکستر، ۱۰/۴ درصد پروتئین و ۱۷/۵ درصد گلوتن مرطوب تهیه شد. ابتدا شکر و روغن به مدت چهار دقیقه توسط همزن برقی مخلوط شدند. سپس تخم‌مرغ در سه مرحله و در مدت‌زمان دو دقیقه به مخلوط اضافه گردید. ۱۵ سی‌سی از آب اضافه و دو دقیقه هم زده شد. همه موارد پودری که از قبل باهم مخلوط و غربال شده بودند، به مخلوط اضافه و تا به دست آمدن یک خمیر یکنواخت مخلوط شدند. باقی‌مانده آب نیز اضافه و به مدت یک دقیقه مخلوط هم زده شد. در ادامه پودر قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین آرد کیک شد. سی گرم خمیر درون هر قالب ریخته شد و جهت پخت در آون توستر (Oven toaster, Noble, Model:KT-45XDRC) با دمای ۱۹۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفت. کیک‌های پخته‌شده، خنک و سپس در بسته‌های پلی‌پروپیلن عایق نسبت به

موازی با مدل ماکسول تعمیم‌یافته در نظر گرفته می‌شود که نشان‌دهنده تنش‌های تعادلی است. سه مدل ماکسول تعمیم‌یافته، پلگ-نورمند و ناسینویچ برای بررسی رفتار ویسکوالاستیکی ارقام مختلف خرما در طی مرحله رسیدن توسط حسن و همکاران (۲۰۰۵) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج کار این پژوهشگران نشان داد که هر سه مدل به کار رفته برای برآزش داده‌ها مناسب بوده و مدل ماکسول تعمیم‌یافته برآزش داده‌ها را با دقت بالاتری انجام داد.

خصوصیات رئولوژیکی و ویسکوالاستیکی نان و کیک تحت تأثیر نوع مواد اولیه و فرمولاسیون آن می‌باشد و این خصوصیات بر کیفیت محصول نهایی اثر می‌گذارد (سینگ و رام ۱۹۹۰؛ سته و همکاران ۱۹۸۱؛ الیسون، ۱۹۹۰). بر اساس نتایج انتشاریافته از میان این سه مدل مکانیکی، مدل‌های پلگ-نورمند و ماکسول تعمیم‌یافته جهت بررسی خواص ویسکوالاستیک مواد غذایی توصیه شده‌اند (حسن و همکاران ۲۰۰۵؛ ووزاری و مزاروس ۲۰۰۷). در این مطالعه اثر جایگزینی پودر قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و زمان نگهداری، بر رفتار ویسکوالاستیکی کیک اسفنجی با استفاده از آزمون رهایش تنش بررسی و داده‌های به دست آمده با مدل‌های پلگ-نورمند و ماکسول تعمیم‌یافته تعادلی برآزش شد.

#### مواد و روش‌ها

##### تهیه قارچ دکمه‌ای خشک شده

قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) از بازار تهیه و با آب سرد شستشوی سطحی داده شد. با یک چاقوی تیز، به‌طور عمودی به برش‌هایی به ضخامت ۵ میلی‌متر برش داده شدند. برش‌های قارچ دکمه‌ای بلافاصله پس از برش جهت خشک کردن با سامانه مادون‌قرمز - هوای داغ مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس بررسی منابع مختلف در زمینه خشک کردن قارچ دکمه‌ای و سایر محصولات کشاورزی، جهت خشک‌کردن

خصوصیات ویسکوالاستیک کیک مورد بررسی قرار گرفت (صالحی و همکاران ۲۰۱۶c&b).

#### مدل‌سازی رفتار رهایی تنش

در کرنش‌های پایین (در دامنه ویسکوالاستیک خطی)، رفتار خمیر مواد غذایی را می‌توان به خوبی با مدل‌های مکانیکی مانند فنر و ضربه‌گیر (ماکسول و مدل ماکسول تعمیم‌یافته) تخمین زد و در کرنش‌های بالا (در دامنه ویسکوالاستیک غیرخطی) مدل دو پارامتری پلگ-نورمند برای تفسیر داده‌های رهایی تنش مناسب‌تر بوده و با دقت بالاتری می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را مورد برازش قرار دهد (وو و همکاران ۲۰۱۲). در این مطالعه از دو مدل پلگ-نورمند و ماکسول تعمیم‌یافته برای برازش داده‌های رهایی تنش استفاده شد. معادله مربوط به مدل تعمیم‌یافته ماکسول با فنر اضافی توسط رابطه زیر ارائه می‌شود (وو و همکاران ۲۰۱۲):

$$F(t) = F_1 \exp(-t / \lambda_1) + F_2 \exp(-t / \lambda_2) + F_3 \exp(-t / \lambda_3) + F_4 \quad [1]$$

مدل دوپارامتری پلگ-نورمند به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود (وو و همکاران ۲۰۱۲):

$$\frac{F_0 t}{F_0 - F(t)} = k_1 + k_2 t \quad [2]$$

$F_0$  نیروی اولیه،  $F(t)$  نیروی لحظه‌ای در زمان  $t$  و  $k_1$  (ثانیه) و  $k_2$  (بدون بعد) ثابت‌های معادله هستند. مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب عرض از مبدأ و شیب نمودار نرمال شده نیرو و زمان می‌باشند. عبارت اول مدل پلگ-نورمند به عنوان نیروی نرمال شده بیان می‌شود.

نیروی نسبی نیز برای داده‌های تجربی رهایی تنش از طریق رابطه ۳ محاسبه شد.  $F_0$  نیروی اولیه و  $F(t)$  نیروی لحظه‌ای در هر زمان می‌باشد.

$$\text{Relative force (RF)} = \frac{F(t)}{F_0} \quad [3]$$

همچنین درصد رهایی تنش (%SR) از طریق رابطه ۴ محاسبه شد (وو و همکاران ۲۰۱۲):

رطوبت و اکسیژن نگهداری شدند (صالحی و همکاران ۲۰۱۶c).

#### آزمون رهایی تنش

برای انجام آزمون رهایی تنش از دستگاه بافت سنج (TA-XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK) و نرم‌افزار مربوطه (Texture Expert 1.05) استفاده شد. جهت انجام آزمون رهایی تنش، نمونه‌ها به روش آزمون فشاری و با پروب با قطر ۱۰۰ میلی‌متر (P/100)، با سرعت ۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۵۰ درصد کرنش به مدت ۶۰ ثانیه تحت تنش قرار گرفتند. دستگاه با ثابت نگه‌داشتن مقدار تغییر شکل ایجادشده در نمونه، مقدار نیروی متناظر با آن (نیروی اعمال از سمت کیک به پروب دستگاه) را به مدت ۶۰ ثانیه ثبت و منحنی نیرو در برابر زمان رسم شد. در این آزمون اثر جایگزینی قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در روزهای اول و چهاردهم بر منحنی رهایی تنش و

هر کدام از جملات مدل با اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. تابع زمانی تنش حاصل جمع سه جمله‌ای، ۱، ۲، ۳ و یک عدد ثابت ( $F_4$ ) مربوط به فنر اضافی است. به دلیل اینکه جمله‌ی اول در مدل سه‌جزئی ماکسول بیش‌ترین سهم را در توصیف رفتار مدل دارد، مقادیر جزء الاستیک و زمان رهایی ( $F$  و  $\lambda$ ) مربوط به آن در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است (حسن و همکاران ۲۰۰۵؛ کامپوس و همکاران ۲۰۱۰).

جمله‌ای که دارای بیش‌ترین مقدار جزء الاستیک و زمان رهایی به عنوان زمان رهایی تنش در نظر گرفته شد (کامپوس و همکاران ۲۰۱۰). بنابراین در این فرمول،  $F(t)$  مقدار نیرو در هر لحظه از زمان،  $F_4$  نشان‌دهنده تنش تعادلی یا تنش باقیمانده (مقدار تنش وقتی که  $t$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند)،  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  نیروهای کاهشی می‌باشند و  $\lambda_1$ ،  $\lambda_2$ ،  $\lambda_3$  زمان‌های رهایی می‌باشند.

۱ گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد جایگزینی قارچ دکمه‌ای، مقدار نیروی اولیه کاهش یافته است که به دلیل نرم‌تر شدن بافت کیک با افزودن قارچ به فرمولاسیون است (صالحی و همکاران ۲۰۱۶). با افزایش درصد جایگزین قارچ دکمه‌ای از ۰ به ۱۵ درصد، مقدار نیروی اولیه روز اول، هفتم و چهاردهم به ترتیب از ۱۷/۵۴ به ۱۲/۸۳ نیوتن، از ۲۵/۶۷ به ۱۷/۷۶ نیوتن و از ۲۶/۷۹ به ۲۴/۱۴ نیوتن کاهش یافت که حاکی از نرم شدن بافت کیک با افزودن قارچ دکمه‌ای به فرمولاسیون کیک اسفنجی است. همچنین با گذشت زمان کیک‌ها سفت‌تر شد که مقدار نیروی اولیه به دست آمده نیز این افزایش را نشان می‌دهد. با افزایش مدت نگهداری کیک تا دو هفته، مقدار نیروی اولیه کیک اسفنجی حاوی ۱۵ درصد قارچ دکمه‌ای از ۱۲/۸۳ نیوتن به ۲۴/۱۴ نیوتن افزایش یافت. کاهش  $F_0$  با افزایش جایگزینی قارچ دکمه‌ای، به دلیل افزایش تشکیل حفرات ریز، کاهش ضخامت دیواره‌های سلولی، افزایش خلل و فرج در ساختمان کیک و کاهش مقاومت لایه‌ها در برابر نیروی وارده است. با گذشت زمان نیز به دلیل بیاتی و افزایش مقاومت لایه‌های درونی کیک، مقدار  $F_0$  افزایش یافته است.

$$\%SR = \frac{F_0 - F_{t=20}}{F_0} \times 100 \quad [4]$$

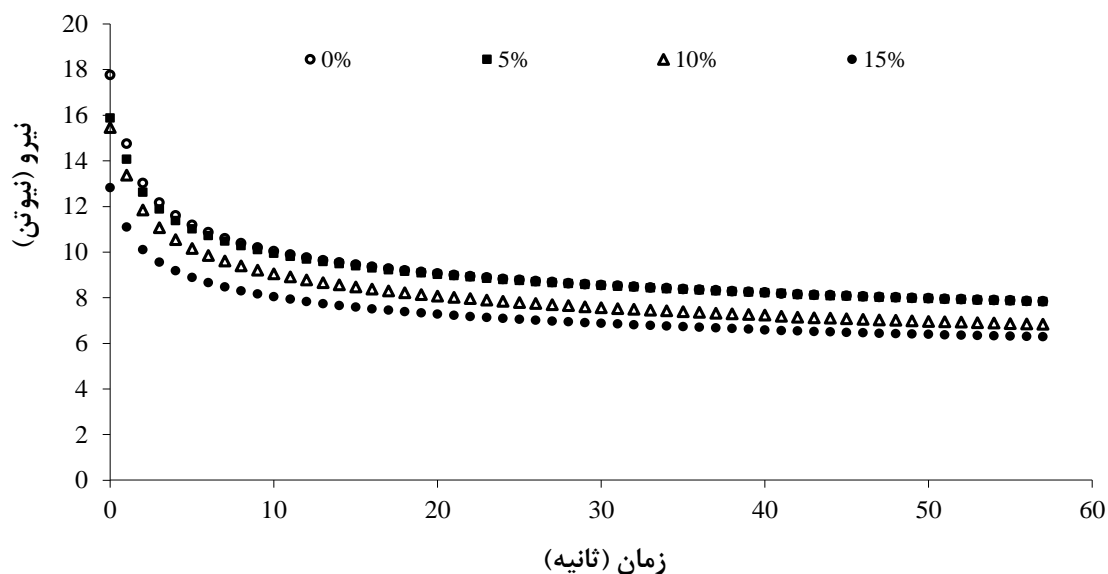
در این رابطه،  $F_0$  نیروی اولیه،  $F_{t=20}$  نیرو در ۲۰ ثانیه بعد از اعمال کرنش اولیه می‌باشد. به منظور مدل کردن داده‌های آزمایشگاهی از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ استفاده شد.

## نتایج و بحث

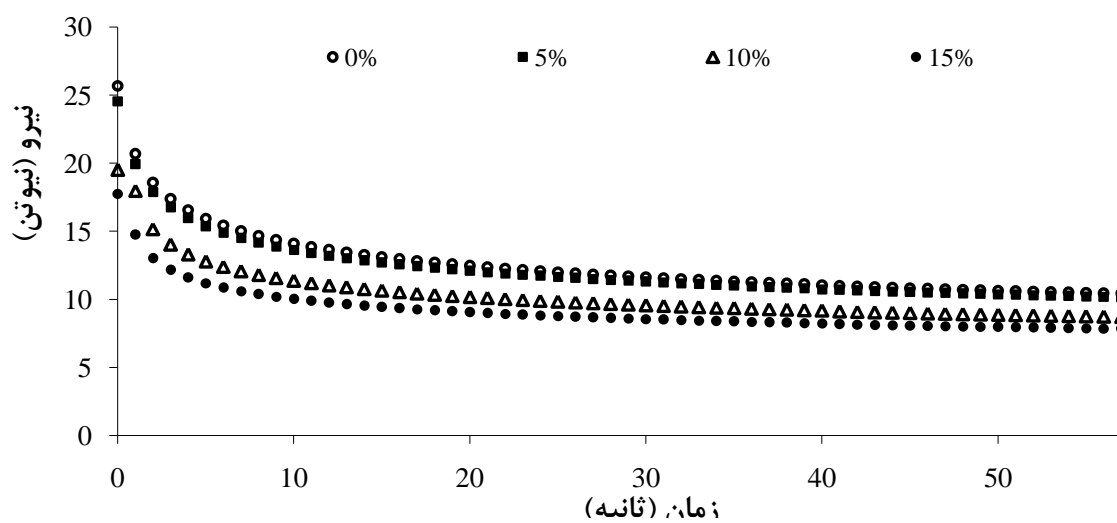
### اثر زمان و جایگزینی قارچ دکمه‌ای بر مقدار نیروی اولیه

در مواد غذایی جامد و نیمه جامد، بعد از اعمال یک کرنش ثابت، یک کاهش در مقدار نیرو در طی زمان مشاهده می‌شود. اثر جایگزینی قارچ دکمه‌ای در فرمولاسیون کیک اسفنجی بر تغییر نیروی آزمون رهایی تنش در روزهای اول، هفتم و چهاردهم به ترتیب در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ به نمایش در آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بعد از اعمال یک کرنش ثابت، مقادیر نیروی حاصل از رهایی تنش در طی زمان کاهش یافته است. مقدار نیروی مشاهده‌شده در کیک قارچ دکمه‌ای در طول رهایی تنش با افزایش درصد جایگزینی کاهش یافته است. با افزودن قارچ دکمه‌ای به فرمولاسیون کیک اسفنجی، حجم کیک‌ها افزایش یافته و کیک‌ها نرم‌تر می‌شوند (صالحی و همکاران ۲۰۱۶)؛ لذا با افزایش درصد جایگزینی، مقدار نیروی اندازه‌گیری شده کاهش یافته است. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱، ۲ و ۳، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر نیروی اندازه‌گیری شده برای تمامی درصدها با گذشت زمان افزایش یافته است که این به دلیل بیاتی و سفت شدن بافت کیک در طی زمان می‌باشد.

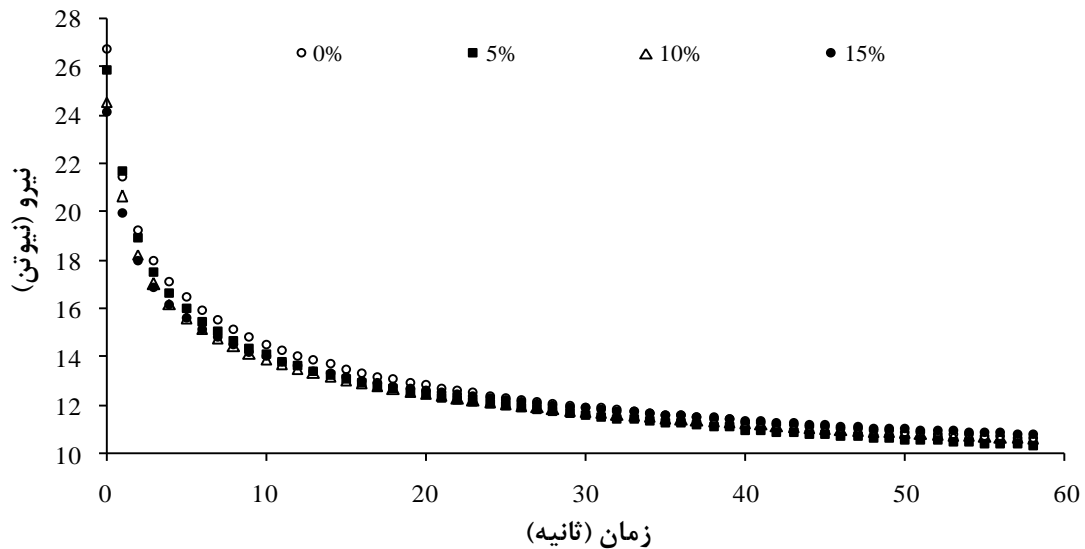
مقدار نیروی اولیه مربوط به داده‌های آزمایش رهایی تنش نمونه‌های کیک قارچ دکمه‌ای در روز اول، هفتم و چهاردهم و در درصد جایگزینی‌های مختلف در جدول



شکل ۱- اثر جایگزینی پودر قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰ (○)، ۵ (■)، ۱۰ (Δ) و ۱۵ (●) درصد بر تغییر نیروی آزمون رهایی تنش (روز اول)



شکل ۲- اثر جایگزینی پودر قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰ (○)، ۵ (■)، ۱۰ (Δ) و ۱۵ (●) درصد بر تغییر نیروی آزمون رهایی تنش (روز هفتم)



شکل ۳- اثر جایگزینی پودر قارچ دکمه‌ای در چهار سطح ۰ (○)، ۵ (■)، ۱۰ (Δ) و ۱۵ (●) درصد بر تغییر نیروی آزمون رهایی تنش (روز چهاردهم)

جدول ۱- مقادیر نیروی اولیه ( $F_0$ ) به دست آمده از آزمون رهایی تنش کیک قارچ دکمه‌ای

$F_0(N)$	درصد جایگزینی	زمان
۱۷/۵۴	٪ ۰	روز اول
۱۵/۸۸	٪ ۵	
۱۵/۴۶	٪ ۱۰	
۱۲/۸۳	٪ ۱۵	
۲۵/۶۷	٪ ۰	روز هفتم
۲۴/۵۵	٪ ۵	
۱۹/۵۲	٪ ۱۰	
۱۷/۷۶	٪ ۱۵	
۲۶/۷۹	٪ ۰	روز چهاردهم
۲۵/۸۸	٪ ۵	
۲۴/۵۷	٪ ۱۰	
۲۴/۱۴	٪ ۱۵	

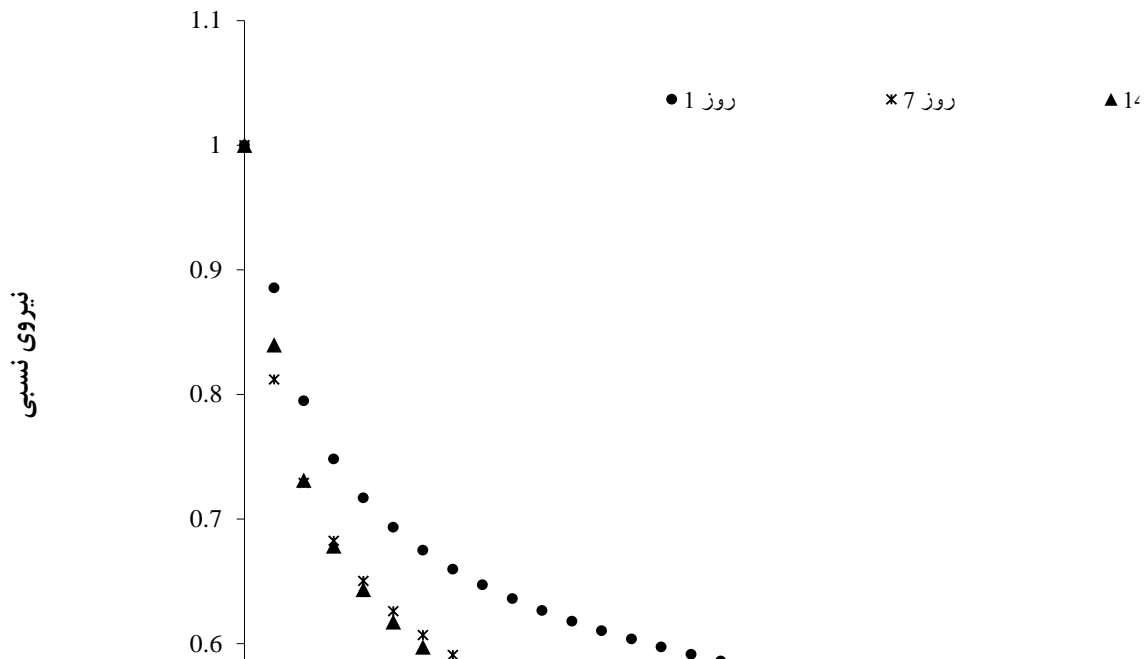
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بعد از اعمال یک کرنش ثابت، مقادیر نیروی نسبی در طی زمان کاهش یافته است. همچنین مقادیر نیروی نسبی در کیک قارچ دکمه‌ای در طول رهایی تنش در طی زمان نگهداری کاهش یافته است و اعداد به دست آمده برای روز

اثر زمان و جایگزینی قارچ دکمه‌ای بر مقدار نیروی نسبی

شکل ۴ نشان‌دهنده مقدار نیروی نسبی به دست آمده از منحنی‌های رهایی تنش کیک اسفنجی حاوی ۵ درصد قارچ دکمه‌ای در روزهای اول، هفتم و چهاردهم است.

مشاهده شد.

چهاردهم کمتر از روز اول و هفتم است. برای سایر درصدهای جایگزینی (۰، ۱۰ و ۱۵٪) نیز رفتار مشابهی



شکل ۴- اثر زمان نگهداری روز اول (●)، روز هفتم (×) و روز چهاردهم (▲) بر تغییر مقادیر نیروی نسبی (۵ درصد قارچ دکمه‌ای)

جدول ۲ گزارش شده است. با استفاده از اعداد گزارش شده در این جدول می‌توان مقدار تنش مشاهده شده در کیک در زمان‌های مختلف را پیش‌بینی نمود. ضریب تبیین ( $r$ ) بالا و خطای استاندارد<sup>۱</sup> (SE) پایین محاسبه شده حاکی از مناسب بودن مدل پلگ-نورمند جهت بررسی رفتار رهایی از تنش کیک اسفنجی غنی شده با قارچ دکمه‌ای می‌باشد. در این جدول مشاهده می‌شود که با گذشت زمان، مقادیر  $k_1$  و  $k_2$  که به ترتیب نشان‌دهنده شیب و عرض از مبدأ نمودار نیروی نرمال شده در برابر زمان هستند، کاهش یافته‌اند اما بین درصدهای مختلف جایگزینی روند مشخصی مشاهده نمی‌شود.

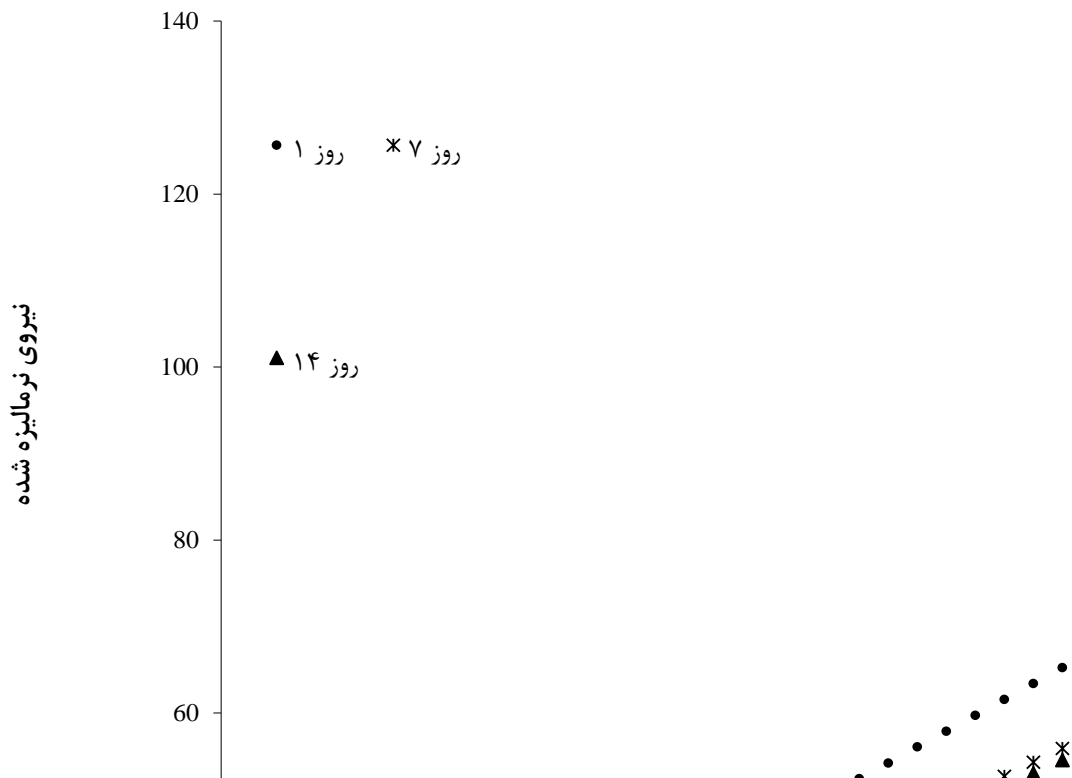
#### اثر زمان و جایگزینی قارچ دکمه‌ای بر پارامترهای مدل پلگ-نورمند

جهت محاسبه ضرایب مربوط به مدل پلگ-نورمند ابتدا نیروی نرمال شده محاسبه گردید و سپس مقادیر  $k_1$  و  $k_2$  از روی عرض از مبدأ و شیب آن‌ها محاسبه گردید. مقادیر مربوط به نیروی نرمال شده برای روزهای اول، هفتم و چهاردهم در شکل ۵ به نمایش درآمده است. با افزایش زمان نگهداری کیک قارچ دکمه‌ای مشاهده می‌شود که نیروی نرمال شده کاهش یافته است. در سایر درصدهای جایگزینی قارچ دکمه‌ای در فرمولاسیون کیک اسفنجی (۰، ۱۰ و ۱۵٪) نیز رفتار مشابهی مشاهده شد و شیب به دست آمده برای روز چهاردهم کمتر از روز اول و هفتم بود.

پارامترهای برازش شده مدل پلگ-نورمند با استفاده از داده‌های رهایی تنش کیک قارچ دکمه‌ای در درصدهای جایگزینی مختلف و در روز اول، هفتم و چهاردهم در

1 - Standard error





شکل ۵- اثر زمان نگهداری روز اول (●)، روز هفتم (✱) و روز چهاردهم (▲) بر نیروی نرمال شده (۵ درصد قارچ دکمه‌ای).

مقدار بالای  $k_1$  نشان‌دهنده رفتار الاستیک در مواد غذایی است. لذا با توجه به اینکه مقادیر  $k_1$  در روز اول بیشتر از روز چهارم است، رفتار الاستیک در روز چهاردهم به دلیل بیاتی و سفت شدن کیک، کاهش یافته است. با جایگزینی قارچ دکمه‌ای با آرد گندم در فرمولاسیون کیک، پیوستگی و انسجام بافت افزایش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار  $k_1$  مربوط به کیک با ۱۵ درصد قارچ دکمه‌ای که حالت الاستیکی بیشتری از خود نشان‌داده و بر اساس نتایج گزارش‌شده در جدول ۱ مشاهده گردید که نرم‌تر نیز می‌باشد و توانایی بیشتری برای حفظ تنش ناشی از اعمال کرنش از خود نشان‌داد. مقدار  $k_2$  نشان‌دهنده درجه جامد بودن یک ماده غذایی است و مقدار آن بین ۱ تا بی‌نهایت متغیر است. برای مواد مایع واقعی مقدار آن برابر با یک و برای الاستیک ایده‌آل برابر بی‌نهایت است. با توجه به اینکه نمونه‌های روز اول حالت الاستیک بیشتری از خود نشان داده‌اند

مقادیر  $k_1$  (بالا)، مقادیر  $k_2$  به دست آمده برای آن‌ها نیز نسبت به روز چهاردهم بالاتر است. سینگ و همکاران (۲۰۰۶) عنوان کردند که مقدار  $k_2$  معرف بهتری برای طبیعت الاستیک مواد غذایی است. مقدار  $k_2$  همچنین نشان‌دهنده درجه استحکام و به هم پیوستگی بافت نیز می‌باشد (وو و همکاران ۲۰۱۲).

جدول ۲- پارامترهای برآزش شده مدل پلگ- نورمند با استفاده از داده‌های رهایی تنش کیک قارچ دکمه‌ای

SE	r	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub> (S)	درصد جایگزینی	زمان
۱/۲۶	۰/۹۹۹	۱/۶۹	۸/۲۱	٪ ۰	روز اول
۱/۶۴	۰/۹۹۸	۱/۸۴	۱۰/۷۲	٪ ۵	
۱/۵۱	۰/۹۹۸	۱/۶۷	۹/۷۴	٪ ۱۰	
۱/۶۸	۰/۹۹۸	۱/۸۲	۱۱/۰۲	٪ ۱۵	
۱/۲۶	۰/۹۹۸	۱/۵۸	۸/۳۲	٪ ۰	روز هفتم
۱/۲۸	۰/۹۹۸	۱/۶۰	۸/۴۶	٪ ۵	
۲/۲۸	۰/۹۹۶	۱/۶۷	۱۰/۱۹	٪ ۱۰	
۱/۲۶	۰/۹۹۹	۱/۶۹	۸/۲۵	٪ ۱۵	
۱/۲۴	۰/۹۹۸	۱/۵۶	۸/۱۹	٪ ۰	روز چهاردهم
۱/۲۵	۰/۹۹۸	۱/۵۷	۸/۲۹	٪ ۵	
۱/۳۲	۰/۹۹۸	۱/۶۶	۸/۶۷	٪ ۱۰	
۱/۳۶	۰/۹۹۸	۱/۷۰	۸/۹۴	٪ ۱۵	

کاهش تنش در مواد ویسکوالاستیک به تدریج صورت گرفته و بسته به ساختار مولکولی ماده در یک زمان معین متوقف می‌شود. این کاهش نیرو تا یک تنش یا نیروی تعادلی ( $F_4$ ) که بزرگتر از صفر می‌باشد، ادامه می‌یابد. مقدار زمان رهایی بسته به سهم ویژگی ویسکوز یا الاستیک ماده متفاوت است به طوری که این زمان برای مواد جامد الاستیک طولانی و برای مواد ویسکوالاستیک بین کوتاه است. براساس نتایج جدول ۳، در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش مقدار تنش تعادلی بزرگتر از صفر می‌باشد؛ به عبارت دیگر تنشی در کیک اسفنجی باقی‌مانده که مقدار آن بعد از گذشت زمان نگهداری (۶۰ ثانیه) تقریباً ثابت می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که کیک مورد آزمایش همانند جامد ویسکوالاستیک رفتار می‌کند. با توجه به نتایج جدول ۳ مقدار نیروی تعادلی برای روز اول، هفتم و چهاردهم به ترتیب در محدوده ۷/۲۲ تا ۵/۸۴ نیوتن، ۹/۶۲ تا ۷/۲۳ نیوتن و ۹/۸۴ تا ۱۰/۰۱ نیوتن می‌باشد و اعداد محاسبه‌شده برای تمامی درصدها در روز چهاردهم، از روز اول و هفتم بیشتر است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی قارچ دکمه‌ای در روز اول و هفتم مقدار

#### اثر زمان و جایگزینی قارچ دکمه‌ای بر پارامترهای مدل ماکسول

مدل مکانیکی ماکسول تعمیم‌یافته برای بررسی و مقایسه رفتار رهایی تنش کیک اسفنجی حاوی قارچ دکمه‌ای استفاده و ضرایب مربوطه بعد از برآزش مدل با داده‌های آزمایشگاهی رهایی تنش، در جدول ۳ گزارش شد. عناصر الاستیک در المان‌های ماکسول را می‌توان توسط نیروهای کاهشی ( $F_1, F_2, F_3$ ) نشان داد که به طور غیرمستقیم جامدیت (سختی) ماده مورد آزمایش را نشان می‌دهند. زمان‌های رهایی ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) به عنوان زمان‌هایی تعریف می‌شوند که طول می‌کشد تا ماکرو مولکول‌ها بعد از تغییر شکل منبسط شوند. زمان‌های رهایی عبارت‌اند است از نسبت ویسکوزیته جزء دشیپات به مدول الاستیسیته جزء فنر. براساس نتایج جدول ۳ در تمام نمونه‌ها، با افزایش درصد جایگزینی، مجموع نیروهای کاهشی ( $F_1 + F_2 + F_3$ ) کاهش یافته است. وو و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کرده‌اند که کاهش مجموع مقادیر  $F_1, F_2$  و  $F_3$  به عنوان اجزاء الاستیک در مدل ماکسول، ناشی از افزایش ویژگی الاستیسیته ماده‌ی تحت آزمایش است.

(جدول ۳ و ۴)، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو مدل جهت بررسی رفتار رهایی تنش کیک قارچ دکمه‌ای مناسب می‌باشند و اما با توجه به تئوری مطرح شده، ماکسول تعمیم‌یافته و پارامترهای موجود در این مدل، استفاده از این مدل جهت بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک کیک قارچ دکمه‌ای توصیه می‌شود. سایر محققان نیز در بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک کیک و نان گزارش نموده‌اند که مدل ماکسول تعمیم‌یافته به خوبی خواص ویسکوالاستیک مواد غذایی را پیش‌بینی می‌نماید و برازش خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد (حسن و همکاران ۲۰۰۵؛ وزاری و مزاروس ۲۰۰۷).

نیروی تعادلی کاهش یافته است. روند تغییرات نیروی تعادلی ( $F_4$ ) هم‌راستا با نیروی اولیه ( $F_0$ ) بوده که نشان‌دهنده این است که با کاهش نیروی اولیه جهت ایجاد کرنش ثابت در کیک، مقدار نیروی تعادلی ذخیره کاهش می‌یابد.

بررسی خصوصیات ویسکوالاستیک مواد غذایی به روش رهایی تنش توسط سایر محققان نیز بررسی شده است. حسن و همکاران (۲۰۰۵) گزارش نمودند که مدل ماکسول تعمیم‌یافته برای پیشگویی داده‌های تجربی رفتار ویسکوالاستیک مواد غذایی مناسب می‌باشد. با توجه به ضرایب تبیین و خطای پایین محاسبه‌شده با استفاده از مدل‌های پلگ-نورمند و ماکسول تعمیم‌یافته

جدول ۳- پارامترهای برازش شده مدل ماکسول با استفاده از داده‌های رهایی تنش در کیک قارچ دکمه‌ای

زمان	درصد جایگزینی	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	r	SE
روز اول	٪ ۰	۳/۰۵	۲/۸۴	۴/۶۴	۷/۲۲	۳۵/۶۸	۵/۷۷	۱/۲۶	۰/۹۹	۰/۰۱
	٪ ۵	۳/۴۷	۱/۵۸	۱/۶۳	۷/۳۲	۳/۹۸	۳۰/۳۲	۳۱/۰۴	۰/۹۹	۰/۰۳
	٪ ۱۰	۴/۲۲	۳/۲۸	۳/۰۴	۶/۲۷	۰/۹۳	۳۲/۱۸	۴/۷۴	۰/۹۹	۰/۰۱
	٪ ۱۵	۲/۲۷	۲/۶۴	۲/۳۱	۵/۸۴	۴/۶۳	۳۱/۶۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۱
روز هفتم	٪ ۰	۵/۳۷	۵/۵۰	۵/۱۶	۹/۶۲	۰/۸۴	۲۹/۴۹	۴/۴۱	۰/۹۹	۰/۰۱
	٪ ۵	۴/۸۷	۵/۰۸	۵/۱۸	۹/۳۹	۴/۴۵	۰/۸۸	۲۹/۹۳	۰/۹۹	۰/۰۱
	٪ ۱۰	۲/۴۱	۲/۸۴	۶/۸۶	۷/۶۷	۶۲/۹۵	۱۵/۳۳	۲/۳۹	۰/۹۹	۰/۱۳
	٪ ۱۵	۳/۰۵	۲/۸۴	۴/۶۳	۷/۲۳	۳۵/۴۵	۵/۷۵	۱/۲۶	۰/۹۹	۰/۰۱
روز چهاردهم	٪ ۰	۵/۶۲	۵/۸۲	۵/۴۹	۹/۸۴	۰/۷۹	۲۹/۲۴	۴/۳۵	۰/۹۹	۰/۰۱
	٪ ۵	۵/۷۶	۵/۴۵	۵/۱۲	۹/۵۳	۱/۰۸	۳۰/۵۸	۴/۷۰	۰/۹۹	۰/۰۱
	٪ ۱۰	۴/۴۹	۴/۰۸	۶/۴۱	۹/۵۸	۳۹/۲۰	۶/۳۳	۱/۳۷	۰/۹۹	۰/۰۲
	٪ ۱۵	۴/۸۹	۴/۵۲	۴/۶۹	۱۰/۰۱	۰/۹۵	۴/۶۸	۳۲/۱۴	۰/۹۹	۰/۰۱

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش خصوصیات ویسکوالاستیک کیک اسفنجی غنی‌شده با قارچ دکمه‌ای خشک شده بررسی شد. نشان نشان‌داد که کیک اسفنجی غنی‌شده با قارچ دکمه‌ای یک جامد ویسکوالاستیک محسوب شده و خصوصیات ویسکوز و الاستیک آن از تغییرات ایجاد شده در ترکیبات شیمیایی آن در اثر جایگزینی آرد گندم

با قارچ دکمه‌ای و زمان نگهداری تأثیر می‌پذیرد. بعد از اعمال یک کرنش ثابت، مقادیر نیرو حاصل از رهایی تنش در طی زمان کاهش یافت و مقدار آن با افزایش درصد جایگزینی کاهش یافت. مقادیر نیروی نسبی در کیک قارچ دکمه‌ای در طول رهایی تنش در طی زمان نگهداری کاهش یافت و اعداد به دست آمده برای روز چهاردهم کمتر از روز اول و هفتم بود. با توجه به نتایج

به دست آمده، درجه الاستیسیته کیک قارچ دکمه‌ای در طی زمان کاهش یافت. با توجه به ضرایب تبیین بالا، خطای استاندارد پایین و پارامترهای موجود در مدل ماکسول تعمیم‌یافته، استفاده از این مدل جهت بررسی رفتار رهایی تنش و خصوصیات ویسکوالاستیک کیک قارچ دکمه‌ای توصیه می‌شود.

## منابع مورد استفاده

- Bhat M A, Bhat A, 2013. Study on Physico-Chemical Characteristics of Pumpkin Blended Cake. *Journal of Food Processing and Technology* 4(9): 4-9.
- Brennan M, Le Port G, Gormley R, 2000. Post-harvest treatment with citric acid or hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms. *LWT-Food Science and Technology* 33(4): 285-289.
- 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 (*Sparus aurata L.*) following high pressure treatment. *Journal of Food Engineering* 96(2): 192-198.
- Eliasson A-C, 1990. Rheological properties of cereal proteins, *Dough Rheology and Baked Product Texture*. Springer, pp. 67-110.
- Hassan B, Alhamdan A, Elansari A, 2005. Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity. *Journal of Food Engineering* 66(4): 439-445.
- Jeong C H, Shim K H, 2004. Quality characteristics of sponge cakes with addition of *Pleurotus eryngii* mushroom powders. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition* 33: 716-722.
- Lebesi D M, Tzia C, 2011. Effect of the addition of different dietary fiber and edible cereal bran sources on the baking and sensory characteristics of cupcakes. *Food and Bioprocess Technology* 4(5): 710-722.
- Nowak D, Lewicki P P, 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 5(3): 353-360.
- Peleg M, 1980. Linearization of relaxation and creep curves of solid biological materials. *Journal of Rheology (1978-present)* 24(4): 451-463.
- Rodríguez-Sandoval E, Fernández-Quintero A, Cuvelier G, 2009. Stress relaxation of reconstituted cassava dough. *LWT-Food Science and Technology* 42(1): 202-206.
- Sahin S, Sumnu S G, 2006. *Physical properties of foods*. Springer Science & Business Media.
- Salehi F, Kashaninejad M, Akbari E, Sobhani S M, Asadi F, 2016a. Potential of Sponge Cake Making using Infrared-Hot Air Dried Carrot. *Journal of Texture Studies* 47(1): 34-39.
- Salehi F, Kashaninejad M, Alipour N, 2016b. Evaluation of Physicochemical, Sensory and Textural Properties of Rich Sponge Cake with Dried Apples Powder, *Innovative Food Science and Technology* 11(3): 39-47
- Salehi F, Kashaninejad M, Asadi F, Najafi A, 2016c. Improvement of quality attributes of sponge cake using infrared dried button mushroom. *Journal of Food Science and Technology* 53(3): 1418-1423.
- Salehi F, Kashaninejad M, Sadeghi Mahoonak A, Ziaifar A M, 2016. Drying of Button Mushroom by Infrared-Hot Air System. *Iranian Journal of Food Science and Technology* 59(13): 151-159.
- Sathe S, Ponte J, Rangnekar P, Salunkhe D, 1981. Effects of addition of great northern bean flour and protein concentrates on rheological properties of dough and baking quality of bread. *Cereal Chemistry*. 58(2): 97-100.
- Singh H, Rockall A, Martin C, Chung O, Lookhart G, 2006. The analysis of stress relaxation data of some viscoelastic foods using a texture analyzer\*. *Journal of Texture Studies* 37(4): 383-392.
- Singh P, Ram H, 1990. Effect of phosphorus and sulphur application on protein and amino acid contents in chickpea. *Indian Journal of Pulses Research* 3(1): 36-39.
- Steffe J F, 1996. *Rheological methods in food process engineering*. Freeman press.

- Vozáry E, Mészáros P, 2007. Effect of mechanical stress on apple impedance parameters, *13th International Conference on Electrical Bioimpedance and the 8th Conference on Electrical Impedance Tomography*. Springer, 118-121.
- Wu M-Y, Chang Y-H, Shiau S-Y, Chen C-C, 2012. Rheology of Fiber-Enriched Steamed Bread: Stress Relaxation and Texture Profile Analysis. *Journal of Food & Drug Analysis* 20(1): 133-142.
- Yadav N, Roopa B, Bhattacharya S, 2006. Viscoelasticity of a simulated polymer and comparison with chickpea flour doughs. *Journal of Food Process Engineering* 29(3): 234-252.

## Effect of mushroom powder on viscoelastic properties of sponge cake using stress relaxation test

F Salehi <sup>1\*</sup> and M Kashaninejad <sup>2</sup>

Received: April 16, 2016

Accepted: July 2, 2017

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Food Industry Machines, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

\*Corresponding author, Email: F.Salehi@Basu.ac.ir

### Abstract

To investigate the effect of replacing dried mushroom on viscoelastic properties of sponge cake, stress relaxation test was done. Mushrooms were dried in optimal conditions, and then mushroom powder was used for enrichment of sponge cake at four levels of 0, 5, 10 and 15 % as substitute of wheat flour in the formulation. After preparing the samples, stress relaxation test was done by a texture analyzer in storage time and coefficients of the Peleg-Normand and the extended Maxwell models were calculated. The results showed that with increasing substitution of mushroom powder initial force and balance force values were decreased. During storage time of cake, initial force and balance force values were increased. The parameters of Peleg-Normand model include  $k_1$  and  $k_2$  decreased with time that indicating a reduced elasticity of the cake with the passage of time. The cakes show solid viscoelastic behavior and by increasing replacement, total reduced forces ( $F_1+F_2+F_3$ ) of generalized Maxwell model decreased that reflects the increasing of elasticity. The results of stress relaxation modeling of experimental data by Peleg-Normand and the extended Maxwell models showed that the Maxwell model has more efficient to evaluation of viscoelastic properties of rich sponge cake with mushrooms powder.

**Keywords:** Mushroom, Maxwell, Peleg-Normand, Stress relaxation, Texture