

مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر آنزیم ترانس گلوتامیناز میکروبی و کنسانتره پروتئینی آب پنیر بر ویژگی‌های بافت کیک اسفنجی براساس پردازش تصویر

حسین جوینده^{۱*}، سامان آبدانان مهدی‌زاده^۲، سارا صنیعی^۳

۱. استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۲. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۳. کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱)

چکیده

ارزیابی کیک‌ها بر اساس پردازش تصویر، امکان سنجش عینی و تکرارپذیر ویژگی‌های ظاهری از قبیل یکنواختی رنگ و شاخص‌های بافت را فراهم می‌سازد و در نتیجه، زمینه را برای اعمال کنترل دقیق‌تر و ساده‌تر بر کیفیت محصول مهیا می‌کند. هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر افزودنی‌های آنزیم ترانس گلوتامیناز (TG) و کنسانتره پروتئینی آب پنیر (WPC) بر ویژگی‌های بافتی کیک اسفنجی با توجه به ویژگی‌های رنگ محصول بود. در این پژوهش، اثر تیمار آنزیمی TG (۰، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۰٪) و افزودن WPC (۰، ۱۰، ۲۰٪) بر بهبود ویژگی‌های یکنواختی، همگنی و کیفیت بافت کیک اسفنجی بر اساس ارزیابی تغییرات ساختاری به روش ماتریس هم‌وقوع سطوح خاکستری (GLCM) مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن بود که TG با ایجاد پیوندهای کووالانسی باعث کاهش کنتراست و افزایش همبستگی و نظم در بافت شد؛ درحالی‌که WPC با تشکیل اتصالات هیدروژنی و هیدروفوبی، کاهش برجستگی، انرژی و کنتراست بیشتری در مقایسه با TG به همراه داشت. تیمارهای حاوی درصد‌های بالاتر TG و WPC از یکنواختی بیشتری برخوردار بودند و در این میان، تیمارهای T27 و T36 بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. اگرچه مقادیر مربوط به برخی از جداول از نظر آماری معنادار نبود، روند بهبود تدریجی به وضوح قابل مشاهده بود و WPC تأثیر قوی‌تری در کاهش تغییرات بافتی ایفا نمود. این یافته‌ها با مطالعات پیشین هم‌خوانی داشت و کاهش کنتراست و انرژی و افزایش همبستگی با افزودن TG و WPC مورد تأیید قرار گرفت. در نهایت، ترکیب این دو افزودنی به عنوان ابزاری مؤثر برای بهبود کیفیت بافت کیک معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های رنگ، TG، WPC، GLCM، زمان نگهداری

۱. مقدمه

مولکول‌های گلوتن و سایر پروتئین‌ها، انسجام و یکنواختی شبکه پروتئینی را بهبود می‌بخشد و می‌تواند بر بافت، ماندگاری و یکنواختی رنگ کیک تأثیر مثبت بگذارد [۱۷]. بنابراین، ترکیب این دو افزودنی می‌تواند به بهبود رنگ طلایی و قهوه‌ای طبیعی در کیک و همچنین افزایش جذابیت بصری و طعم آن کمک کند.

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه به‌کارگیری جداگانه یا توأم دو ماده پودر کنسانتره پروتئینی آب‌پنیر (WPC) و آنزیم ترانس‌گلوتامیناز (TG) بر خواص کیفی محصولات پخت منجمله کیک اسفنجی انجام شده است. گزارش شده است که استفاده همزمان پودر آب‌پنیر و ترانس‌گلوتامیناز علاوه بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی محصولات پخت، خصوصیات حسی را نیز ارتقا می‌دهد و آن را برای مصرف‌کنندگان جذاب‌تر و دلپذیرتر می‌سازد [۱۸]. ارتقاء رایحه، طعم و رنگ پوسته محصولات پخت از طریق افزودن پودرهای پروتئینی آب‌پنیر به دلیل وجود اسیدهای آمینه و لاکتوز در آب‌پنیر و در نتیجه تقویت واکنش میلارد طی فرایند پخت است [۱۹]. Redd و همکاران [۲۰] در تحقیقی در مورد استفاده از آنزیم ترانس‌گلوتامیناز در نان‌های تهیه‌شده با آرد بدون گلوتن گزارش دادند که این آنزیم موجب بهبود ویژگی‌های نان نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود. باباخانی و همکاران گزارش نمودند که افزودن بیش از حد پودر پروتئین ماهی سبب افزایش تیرگی رنگ کیک گردید و آن‌ها برای برطرف کردن این مشکل و بهبود کیفیت کیک از آنزیم ترانس‌گلوتامیناز استفاده کردند [۲۱]. Alp و Bilgiçli تأثیر افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز (۰٪ و ۰/۰۹٪) بر خواص خمیر و کیک تهیه‌شده با منابع پروتئینی مختلف (شیر خشک بدون چربی، آرد سویا و شیر سویا) و انواع آرد (نوع A با ۱۱/۴٪ پروتئین و نوع B با ۸/۶٪ پروتئین) را بررسی کردند [۲۲]. نتایج این محققین نشان داد که شیر خشک بدون چربی قرمزی پوسته و روشنی مغز را بیشتر از سایر منابع پروتئینی افزایش داد و افزودن آنزیم TG به‌طور قابل توجهی بر حجم، نرمی، پوسته و رنگ مغز نمونه‌های کیک تأثیر گذاشت. به‌علاوه، ترکیب آنزیم TG و آرد B با پروتئین کمتر، نمونه‌های کیک پف‌کرده‌تر، متقارن‌تر و نرم‌تری ایجاد کرد.

با وجود تأثیر WPC و آنزیم TG بر کیفیت کیک

کیک اسفنجی به‌عنوان یکی از محبوب‌ترین و پراستفاده‌ترین محصولات قنادی، در بسیاری از فرهنگ‌ها به‌دلیل بافت نرم و هوادهی بالا مورد توجه قرار گرفته است [۱ و ۲]. ویژگی‌های منحصر به فرد این کیک، از جمله بافت سبک و طعم دلپذیر، آن را به انتخابی مطلوب برای مصرف‌کنندگان تبدیل کرده است. در بازار رقابتی امروز، موفقیت محصولات قنادی نه‌تنها به کیفیت ظاهری و بافت بلکه به طعم و قابلیت نگهداری آن‌ها نیز وابسته است [۳]. بنابراین، تولیدکنندگان کیک همواره در جستجوی روش‌ها و مواد افزودنی جدیدی هستند که به بهبود کیفیت و حفظ ارزش تغذیه‌ای محصولات کمک کنند [۴]. در این راستا، دو افزودنی مهم که اخیراً توجه ویژه‌ای را جلب کرده‌اند، پودر آب‌پنیر و آنزیم ترانس‌گلوتامیناز هستند. پروتئین‌های آب‌پنیر به‌دلیل خواص عملکردی که از خود نشان می‌دهند، می‌توانند نقش اساسی در فرآوری مواد غذایی ایفا کنند و برای مثال می‌توانند به‌عنوان جایگزین چربی [۵]، پوشش‌دهنده / تشکیل‌دهنده فیلم [۶ و ۷] و بهبوددهنده ویژگی‌های حسی و بافتی مواد غذایی [۸] به‌کار روند. پودر آب‌پنیر که به‌عنوان یک محصول جانبی از فرآیند تولید پنیر به‌دست می‌آید، به‌خاطر ترکیبات غنی از پروتئین‌های باکیفیت مانند لاکتالبومین و بتا-لاکتوگلوبین، به‌عنوان یک ماده کاربردی در صنعت پخت و پز به‌شمار می‌رود [۱۰-۸]. این پودر حاوی پروتئین‌های باکیفیت از جمله لاکتالبومین و بتا-لاکتوگلوبین است که به بهبود خواص فیزیکی و تغذیه‌ای محصولات غذایی کمک می‌کند و می‌تواند بر رنگ و بافت نهایی کیک تأثیر بگذارد [۱۱ و ۱۲]. به‌ویژه، ترکیبات پودرهای آب‌پنیر می‌توانند با تشدید واکنش مایلارد طی فرآیند پخت (واکنش بین قندها و آمینواسیدها) سبب تغییر و بهبود رنگ کیک به سمت قهوه‌ای-طلایی شود. درهرحال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش مقدار پودر آب‌پنیر می‌تواند شدت این واکنش را افزایش دهد و منجر به تیرگی بیشتر رنگ کیک شود [۱۳]. آنزیم ترانس‌گلوتامیناز، با قابلیت ایجاد پیوندهای کووالانسی میان پروتئین‌ها، نقش مهمی در بهبود ساختار و پایداری مواد غذایی پروتئینی ایفا می‌کند [۱۴-۱۶]. این آنزیم با ایجاد پیوندهای متقابل میان

توسط ترازو توزین شد. سپس شکر و تخم‌مرغ به مدت ۳ دقیقه با دور بالای همزن زده شد و مخلوط به حالت خامه‌ای درآمد. در مرحله بعد آرد، بکینگ‌پودر و آنزیم (در ۳ سطح ۰/۰، ۰/۰۱ و ۰/۰۵) که پس از توزیع به‌خوبی با یکدیگر مخلوط شدند به آن‌ها اضافه گردید و با دور پایین همزن به مدت ۳ دقیقه مخلوط شد. در پایان روغن به آرامی به مخلوط اضافه شد و خمیر با استفاده از یک قاشق پلاستیکی مخلوط شد. پس از آماده‌نمودن خمیر کیک، به‌منظور تهیه تیمارها، کنسانتره پودر آب پنیر و و آنزیم ترانس گلوتامیناز به خمیر اضافه گردید. خمیرهای تهیه‌شده در قالب‌ها و کاغذهای مخصوصی که درون آن‌ها قرار داده شده بود، ریخته شده و به مدت ۳۰-۲۵ دقیقه در فر با دمای 190° - 180° گردید. کیک‌ها در کیسه‌های پلی اتیلنی زیپ‌دار بسته‌بندی و در دمای اتاق تا انجام آنالیزهای بعدی نگهداری شدند.

۳.۲. اندازه‌گیری رنگ

آنالیز رنگ پوسته از طریق تعیین سه شاخص روشنایی (L^* ، دامنه‌ای از صفر تا ۱۰۰ را دارد)، قرمزی (a^*) و زردی (b^*) (دامنه‌ای از ۱۲۰- تا ۱۲۰+ دارد) انجام شد. برای اندازه‌گیری این شاخص‌ها ابتدا برشی به ابعاد 2×2 سانتیمتر از پوسته نان با استفاده از چاقو اره‌ای برقی ۱۲۰ وات و مدل HP Scanjet ۴۱۶۰۰ تهیه گردید و به وسیله اسکنر (مدل: HP Scanjet G3010) با وضوح ۳۰۰ پیکسل تصویربرداری شد. سپس تصاویر در اختیار نرم‌افزار ایمج جی^۱ قرار گرفت. با فعال کردن فضای LAB در بخش Plugins، شاخص‌های فوق محاسبه شد [۲۳].

۴.۲. پردازش تصویر و استخراج ویژگی‌های بافتی

بعد از اخذ تصاویر نمونه‌ها توسط دوربین دیجیتال، تصاویر به رایانه منتقل شدند (شکل ۱). سپس به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های بافت (سطح و مغز نان)، تصاویر از رنگی به سطح خاکستری تبدیل و لبه‌های تصاویر برجسته گردیدند [۲۴]. در ادامه ماتریس هم‌رخدادی سطح

اسفنجی، تاکنون تحقیقی در این زمینه انجام نشده است. بنابراین، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر WPC و آنزیم TG بر تغییرات رنگ کیک اسفنجی و شناسایی ارتباط بین استفاده از این افزودنی‌ها و بهبود کیفیت ظاهری کیک، به‌ویژه از نظر رنگ و جذابیت بصری می‌باشد. این مطالعه از آن جهت اهمیت دارد که استراتژی‌های فرمولاسیون مبتنی بر آنزیم و پروتئین را با آنالیز پردازش تصویر عینی ترکیب می‌کند تا تغییرات مواد تشکیل‌دهنده را به‌صورت کمی به بافت کیک اسفنجی مرتبط کند و کیفیت محصول پایدارتر، نتایج حسی بهبودیافته و بهینه‌سازی مبتنی بر داده در فرمولاسیون پخت را امکان‌پذیر سازد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل آرد گندم تهیه‌شده از شرکت خوزستان، روغن مایع بهار، شکر، تخم‌مرغ، بکینگ‌پودر و وانیل جهت تولید کیک از فروشگاه‌های سطح شهر اهواز تهیه گردید. کنسانتره پودر آب پنیر WPC35 (حاوی ۳۴/۱۱٪ پروتئین، ۵۱/۳۸٪ لاکتوز، ۷/۵۵٪ خاکستر، ۲/۱۶٪ چربی و ۴/۸۰٪ رطوبت) از شرکت FDCM لهستان خریداری گردید. همچنین از آنزیم ترانس گلوتامیناز میکروبی (TG) تهیه‌شده از میکروپ *Streptovorticillium morbaeense* با نام تجاری ACTIVA YG (شرکت Ajinomoto، فرانسه) استفاده شد. میزان فعالیت هر گرم پودر این آنزیم، ۱۰۰ واحد به‌ازای هر گرم پروتئین و ترکیبات آن شامل لاکتوز، عصاره مخمر، مالتودکسترین، روغن گیاهی و آنزیم ترانس گلوتامیناز بود.

۲.۲. آماده‌سازی نمونه‌های کیک

به‌منظور تهیه خمیر کیک اسفنجی از فرمولاسیون ارائه‌شده توسط Campbell و همکاران [۱۷]، با اندکی تغییر استفاده گردید که به شرح زیر می‌باشد: آرد گندم ۱۰۰ g، پودر WPC (۰/۰، ۱۰٪ و ۲۰٪)، جایگزینی با آرد بصورت وزنی/وزنی، شکر ۱۱۰ g، تخم‌مرغ ۱۴۰ g، روغن ۳ g، وانیل ۲ g، بکینگ‌پودر ۴ g. در این مرحله تمام مواد اولیه

ماتریس محاسبه می‌شود. در این تحقیق ۶ ویژگی بافت و ویژگی‌های بافتی آنتروپی (Entropy)، کنتراست (Contrast)، همبستگی (Correlation)، انرژی (Energy)، همگنی (Homogeneity) و برجستگی (Prominence) استخراج شدند. شایان ذکر در این پژوهش میانگین جهت‌های چهارگانه به منظور حذف نویزهای احتمالی مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی پردازش‌های مربوط به این بخش در نرم افزار پایتون ۳.۱۰.۹ صورت پذیرفت.

خاکستری (GLCM) تشکیل گردید. به‌طور کلی این روش مبتنی بر تخمین توابع چگالی احتمال شرطی $P(i, j; d, \theta)$ است. تابع $P(i, j; d, \theta)$ احتمال همسایگی دو پیکسل با سطوح شدت خاکستری i و j می‌باشد که در فاصله از پیش تعریف شده d نسبت به یکدیگر و در جهت θ قرار دارند. ابعاد این ماتریس برابر با سطوح خاکستری تصویر است. بدین ترتیب ۴ ماتریس هم وقوعی در جهت‌های چهارگانه (0° ، 45° ، 90° و 135°) و در فاصله $d = 1$ به دست می‌آیند. سپس ماتریس برآیند $P(i, j)$ از طریق جمع این چهار

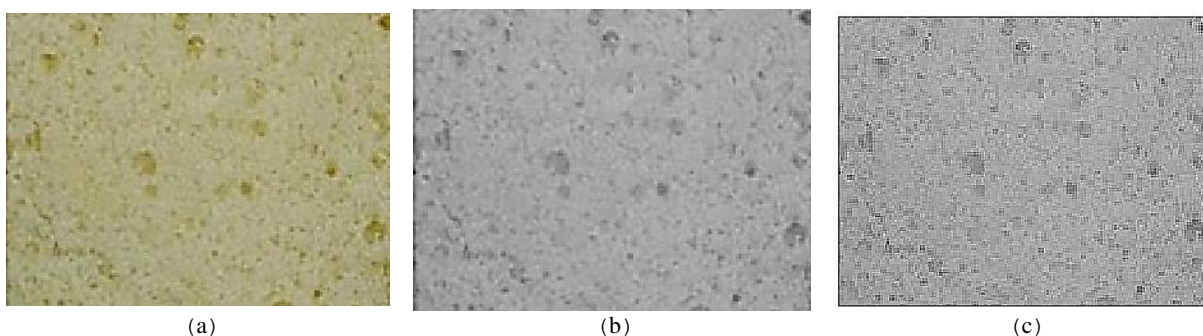


Fig. 1. Image processing steps: a) original image, b) grayscale image, c) edge enhancement.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. شاخص‌های رنگ

نتایج تجزیه واریانس مربوط به پارامترهای رنگ L^* ، a^* ، b^* پوسته و مغز نمونه‌های کیک، در سیستم رنگی هانتر لب در جدول (۱) نشان داده شده است. مطابق این جدول هر ۳ متغیر پودر آب پنیر، تیمار آنزیمی و زمان نگهداری اثر معنی‌داری بر پارامترهای رنگ ایجاد نمودند ($P < 0.001$). همچنین بررسی اثرات متقابل در پوسته و مغز کیک، اثر معنی‌داری را بر پارامترهای رنگ L^* ، a^* ، b^* نشان داد.

۵.۲. تجزیه آماری

در این پژوهش با توجه به دو متغیر کنسانتره پودر آب پنیر در سطوح (۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪) و ترانس گلوتامیناز در سه سطوح (۰٪، ۰.۰۵٪ و ۰.۱٪)، تعداد ۹ تیمار کیک اسفنجی تولید گردید. داده‌ها از طریق آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط برنامه SPSS ویرایش ۲۳ آنالیز و میانگین داده‌ها با کمک آزمون دانکن در سطح ۵٪ مقایسه شدند. تمامی تیمارها در ۳ تکرار تولید شدند و ویژگی‌های رنگ‌سنجی، پردازش تصویر کیک اسفنجی در ابتدا و انتهای دوره نگهداری (۱ و ۱۴ روز) ارزیابی گردیدند.

Table 1. Analysis of variance of Color parameters of sponge cake sample.

Resources of changes	df	Mean Square					
		Crust color			Crumb color		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
Whey	2	136.85***	13.71***	186.08***	73.69***	0.64***	14.09***
Enz	2	89.05***	3.36***	27.77***	14.75***	0.15***	2.29***
Day	2	404.62***	18.47***	293.23***	76.79***	1.87***	64.76***
Whey * Enz	4	0.82*	0.01*	0.25*	0.09*	0.16***	0.01*
Whey * Day	4	2.79***	0.47***	3.11***	4.10***	0.02*	0.83**
Enz * Day	4	1.11**	0.01*	0.12*	0.14*	0.07***	0.01*
Whey * Enz * Day	8	0.84*	0.04*	0.24*	0.11*	0.05**	0.04*
Error	27	0.27	0.04	0.28	0.65	0.01	0.18

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-significance

مغز نمونه‌های کیک کاهش یافت که این کاهش شدت سبزی در نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ آنزیم در مقایسه با نمونه کنترل معنی‌دار نبود و شاخص b^* نمونه‌ها در پوسته و مغز کیک با افزایش درصد آنزیم کاهش یافت. این آنزیم از طریق اتصالات عرضی که بین اسید آمینه‌های لایزین و گلوتامین ایجاد می‌کند باعث کاهش میزان لایزین قابل دسترس و کاهش واکنش مایلارد می‌شود و در نتیجه باعث افزایش شاخص L^* ، کاهش a^* و b^* می‌گردد. Moradi و همکاران [۲۸] در مورد افزودن آنزیم ترانس گلوتامیناز، صمغ گوار و کازئینات سدیم به نان تافتون فاقد گلوتن بر پایه پودر سیب‌زمینی به نتایج مشابهی دست یافتند. Meybodi و همکاران [۲۹] در بررسی افزودن اثر آسکوربیک اسید و آنزیم ترانس گلوتامیناز میکروبی بر کیفیت نان بربری بیان کرد که با افزایش درصد آنزیم ترانس گلوتامیناز، به علت کمتر شدن احتمال وقوع واکنش قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی میزان روشنایی نمونه‌های نان افزایش یافت. نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان نگهداری شدت روشنایی پوسته و مغز نمونه‌های کیک در مقایسه با نمونه کنترل کاهش و شدت زردی افزایش یافت، به گونه‌ای که رنگ پوسته و مغز نمونه‌های کیک در روز چهاردهم نسبت به روز اول نگهداری تیره‌تر و زردتر بود. با افزایش مدت زمان نگهداری در بررسی تغییرات رنگ پوسته شاخص a^* یا همان شدت قرمزی و همچنین شدت سبزی مغز نمونه‌ها افزایش یافت به گونه‌ای که در روز هفتم نگهداری شاخص a^* مغز نمونه‌های کیک در مقایسه با نمونه‌های روز چهاردهم نسبت به نمونه کنترل

در بررسی تغییرات رنگ پوسته و مغز، نتایج نشان داد که با افزایش سطوح جایگزینی کنسانتره پروتئین آب‌پنیر، شاخص روشنایی L^* روند نزولی داشت (شکل ۲). علت آن را می‌توان به انجام واکنش قهوه‌ای شدن مایلارد در اثر لاکتوز موجود در کنسانتره نسبت داد. Maravić و همکاران [۲۵]، با بررسی تاثیر کنسانتره پروتئین آب‌پنیر و خمیر ترش بر خصوصیات رنگی کیک اسفنجی گزارش دادند که با افزایش کنسانتره پروتئین آب‌پنیر میزان روشنایی، به علت واکنش مایلارد کاهش یافت. همچنین Ghaemi و همکاران [۲۶]، نتایج مشابهی را در بررسی افزودن پروتئین آب‌پنیر و ایزوله پروتئین سویا به همراه صمغ دانه ریحان بر کیک، گزارش دادند. با افزایش درصد کنسانتره پروتئین آب‌پنیر شدت قرمزی (a^*) و زردی (b^*) در پوسته نمونه‌های کیک نسبت به نمونه کنترل به طور معنی‌داری افزایش یافت. در مورد مشتقات شیر که تحت دما با درجه حرارت بالا قرار می‌گیرند، لاکتوز به عنوان قند احیاکننده با عامل آمینی آزاد اسید آمینه لیزین ترکیب شده و منجر به تشکیل ملانوییدین‌های قهوه‌ای می‌گردد. این نتایج مشابه نتایج Krupa-Kozak و همکاران [۲۷] بود. در بررسی مغز نان با افزایش سطوح جایگزینی کنسانتره پروتئین آب‌پنیر، شدت زردی نمونه‌ها افزایش یافت و شدت سبزی مغز نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل کاهش یافت و با نتایج Maravić و همکاران [۲۵] مطابقت داشت. در بررسی اثر آنزیم ترانس گلوتامیناز، با افزایش درصد آنزیم، شاخص روشنایی در پوسته و مغز کیک افزایش و شدت قرمزی در پوسته و همچنین شدت سبزی در

سبزتر بود. در این پژوهش تمامی اثرات متقابل معنی‌دار بود. با توجه به شکل (۲) بیش‌ترین میزان روشنایی مغز و پوسته یک در روز اول نگهداری و در تیمار حاوی ۰٪ آب‌پنیر و ۱٪ آنزیم مشاهده گردید و تیمار حاوی ۲۰٪ آب‌پنیر و ۰٪ آنزیم در روز ۱۴ نگهداری کمترین روشنایی را در پوسته و مغز داشت.

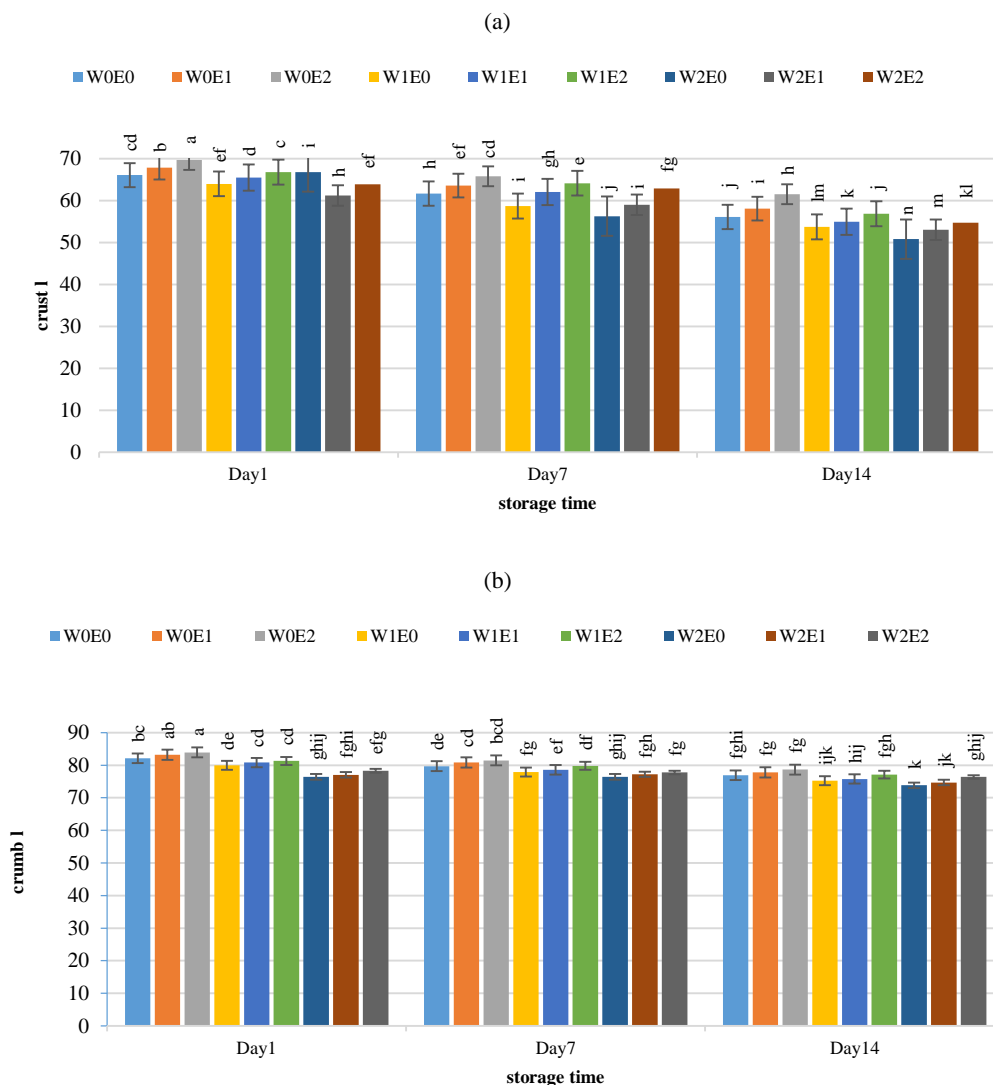


Fig. 2. The interaction effects of whey protein concentrate (W) and enzyme (E) and storage time on brightness (L* value) of sponge cake crumbs.

با توجه به شکل (۳-۳a) تیمار حاوی ۲۰٪ آب‌پنیر و ۰٪ آنزیم در روز ۱۴ نگهداری بیشترین میزان قرمزی و تیمار حاوی ۰٪ آب‌پنیر و ۱٪ آنزیم در روز اول نگهداری کمترین میزان قرمزی را در پوسته داشت. در بررسی مغز نمونه‌های یک با توجه به شکل (۳-۳b)، تیمار حاوی ۰٪ آب‌پنیر و ۱٪ آنزیم در روز ۷ نگهداری شدت سبزی بیش‌تری نسبت سایر نمونه‌ها و نمونه کنترل داشت و در روز اول نگهداری تیمار حاوی ۲۰٪ آب‌پنیر و ۰٪ آنزیم از میزان سبزی کمتری برخوردار بود.

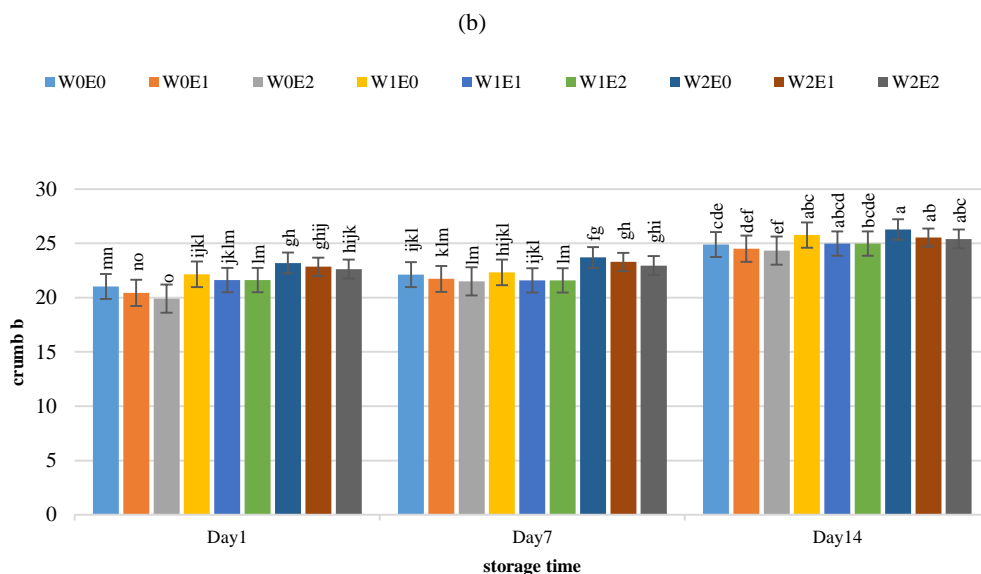


Fig. 4. The Interaction effects of whey protein concentrate (W) and enzyme (E) and storage time on b^* value of sponge cake crumb .

که نشان‌دهنده رابطه مثبت و قابل توجه با انرژی است. در نهایت، تحلیل داده‌های GLCM نشان می‌دهد که نمونه‌ها از لحاظ ویژگی‌های بافتی متفاوت هستند و این تفاوت‌ها ممکن است به تفاوت‌های زیرساختاری و ترکیبی زیربنایی بین نمونه‌ها بازگردد. تیمارهای T6 و T8 به‌طور کلی بافت همگن و یکدست‌تری را نشان می‌دهند، در حالی که T5 و T1 بافت پیچیده‌تر و متنوع‌تری دارند. این تفاوت‌ها می‌تواند به دلایل مرتبط با توانایی آنزیم در ایجاد اتصالات بین پروتئین‌ها و تشکیل یک شبکه پیوسته‌تر بازگردد.

تحلیل داده‌های GLCM بر روی بافت پوسته و مغز کیک اسفنجی نشان می‌دهد که تیمارهای مختلف تأثیرات مختلفی بر روی ویژگی‌های بافتی دارند. بر اساس این ویژگی‌ها در روز اول (جدول ۲)، تیمارهای T6 و T8 عموماً بافت همگن و یکدست‌تری را نشان می‌دهند، در حالی که T5 و T1 بافت پیچیده و متنوع‌تری دارند. تیمار T6 بالاترین مقدار Contrast را نشان داده و تأثیر قوی‌تری نسبت به دیگر تیمارها دارد، در حالی که تیمار T5 پایین‌ترین مقدار Contrast را داشته و عملکرد ضعیف‌تری دارد. همچنین، اثر تیمارهای T2 و T6 نیز دارای بر ویژگی انرژی معناداری بوده

Table 2. GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) characteristics of cake crust on the first day.

Treatment	Contrast	Energy	Correlation	Entropy	homogeneity	Prominence
T1	0.742***	0.271 ^{ns}	0.006 ^{ns}	169***	0.237 ^{ns}	0.567**
T2	0.572**	0.715**	0.044 ^{ns}	0.226*	0.418*	0.166 ^{ns}
T3	0.686**	0.481 ^{ns}	0 ^{ns}	0.530*	0.298 ^{ns}	0.345 ^{ns}
T4	0.708**	0.538 ^{ns}	0.063 ^{ns}	0.419 ^{ns}	0.271 ^{ns}	0.298 ^{ns}
T5	0.313 ^{ns}	1***	0.097*	0 ^{ns}	0.677**	0 ^{ns}
T6	1***	0.677**	1***	1*	0 ^{ns}	0.980***
T7	0.794***	0.193 ^{ns}	0.044 ^{ns}	0.494 ^{ns}	0.193 ^{ns}	0.387 ^{ns}
T8	0 ^{ns}	1***	0.172**	0.601**	1***	0.612**
T9	0.716**	0.255 ^{ns}	0.044 ^{ns}	0.935**0.	0.255 ^{ns}	1***

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-Significance

(T1)WP 0%-TG 0%, (T2)WP 0%-TG 0.05%, (T3) WP 0%-TG 0.1%, (T4)WP 10%-TG 0%, (T5)WP 10%-TG 0.05%, (T6)WP 10%-TG 0.1%, (T7)WP 20%-TG 0%, (T8)WP 20%-TG 0.05%, (T9)WP 20%-TG 0.1%.

همچنین، تیمارهای T11 و T14 بالاترین مقدار پرومیننس را دارند که نشان‌دهنده اهمیت و برجستگی آن‌ها در نتایج است. تحلیل داده‌های GLCM نشان می‌دهد که افزودن آنزیم ترانس گلوتامیناز (TG) نسبت به کنسانتره پروتئینی آب پنیر (WPC) باعث بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک در روز هفتم شده است. به‌ویژه، عملکرد موثرتری در افزایش همبستگی، برجستگی و کاهش آشفتنگی بافت نشان داده است، که این ممکن است به دلیل توانایی بیشتر TG در ایجاد اتصالات بین پروتئین‌ها و تشکیل یک شبکه پیوسته‌تر باشد.

با بررسی دقیق داده‌های GLCM برای روز هفتم نمونه‌های کیک (جدول ۳)، تیمارهای T10 و T11 نشان‌دهنده ویژگی‌های معنادار بالا بوده و توانایی بالایی در تولید ویژگی‌های مطلوب دارند. همچنین، تیمار T18 بالاترین مقدار Entropy، نشان‌دهنده تنوع بالاست، اما این تنوع به معنای عدم قطعیت و پیچیدگی بیشتر است. تیمارهای T14، T15، T16، T17 و T13 به دلیل داشتن مقادیر غیرمعنادار، تأثیر مثبتی ندارند. در مقایسه با تیمار T10 که بیشترین مقدار را دارد، تیمار T14 به وضوح کمترین کنتراست را دارد و نشان‌دهنده ناپایداری است.

Table 3. GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) characteristics of cake crust on the seventh day

تیمار	Contrast	energy	Correlation	Entropy	homogeneity	Prominence
T10	0.898***	0.701 ***	0.002 ***	0.142 **	0.931 **	0.791**
T11	0.826**	0.771 **	0.003 ***	0.032 **	0.942 ***	0.753***
T12	0 **	0.537 **	0.003**	0.062 **	0.915 **	0.911 **
T13	0.738 **	0.600 ^{ns}	0.002 **	0.028 **	0.955 **	0.860***
T14	0.497 ^{ns}	0.620 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.039 ^{ns}	1 ^{ns}	0.845**
T15	0.687 ^{ns}	0.561 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.513 ^{ns}	0.965 **	0.894 ^{ns}
T16	0.503 ^{ns}	1 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0 ^{ns}	0.998 ^{ns}	0.658 ^{ns}
T17	0.860 ^{ns}	0.452 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.075 ^{ns}	0.934 ^{ns}	1 ^{ns}
T18	0.501 ^{ns}	0.661 ^{ns}	0 ^{ns}	0.026 ^{ns}	0.999 ***	0.816 ***

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-Significance (T10)WP 0%-TG 0%, (T11)WP 0%-TG 0.05%, (T12) WP 0%-TG 0.1%, (T13)WP 10%-TG 0%, (T14)WP 10%-TG 0.05%, (T15)WP 10%-TG 0.1%, (T16)WP 20%-TG 0%, (T17)WP 20%-TG 0.05%, (T18)WP 20%-TG 0.1%.

است. بالاترین همبستگی در نمونه T19 مشاهده می‌شود. با افزایش TG و WPC، همبستگی افزایش یافته است. مقدار برجستگی در نمونه T19 بالاترین است. با افزایش درصد TG برجستگی کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد WPC کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که هر دو افزودنی، به ویژه WPC، توانسته‌اند برجستگی بافت را کاهش داده و یکنواخت‌تر کنند. با افزایش درصد TG کاهش یافته است. انتروپی پایین‌تر نشان می‌دهد که بافت پوسته کیک همگن‌تر و منظم‌تر شده است.

داده‌های GLCM برای روز چهاردهم (جدول ۴) نمونه‌های پوسته کیک تیمار T27 در روز چهاردهم، در تمامی ویژگی‌ها بهترین عملکرد را از خود نشان داده و در بالاترین سطح قرار دارد. تیمارهای T23 تا T26 نیز دارای معناداری متغیر و در سطح معنادار بالاتری قرار دارند. از

داده‌های GLCM برای روز چهاردهم نمونه‌های پوسته کیک، تیمار T27 در تمامی ویژگی‌ها معنادار و در بالاترین سطح است. تیمارهای T23 تا T26 دارای معناداری متغیر (معنادار و معنادار بالاتر) هستند. تیمارهای T19 تا T22: غیرمعنادار هستند. تیمار T27 در تمام ویژگی‌ها دارای بالاترین مقادیر و معناداری بالا است، که نشان‌دهنده عملکرد قوی آن است. تیمار T19 در همه ویژگی‌ها کمترین مقادیر را دارد و غیرمعنادار است، که نشان‌دهنده ضعف آن در این ویژگی‌ها است. سایر تیمارها نیز به ترتیبی در بین T19 و T27 قرار دارند و نشان‌دهنده بهبود تدریجی در ویژگی‌ها هستند. مقدار کنتراست با افزایش درصد آنزیم ترانس گلوتامیناز (TG)، همچنین با افزایش درصد پروتئین آب پنیر، کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که افزودن هر دو ترکیب، به‌ویژه TG، منجر به افزایش همگنی بافت شده



افزایش می‌یابد، در مورد برجستگی، مشاهده می‌شود که در نمونه T19 بالاترین مقدار برجستگی وجود دارد. با افزایش درصد TG، برجستگی کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش درصد WPC نیز برجستگی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که هر دو افزودنی، به‌ویژه WPC، توانسته‌اند برجستگی بافت را کاهش داده و یکنواختی را بیشتر کنند. همچنین، با افزایش درصد TG، انتروپی پایین‌تر نشان می‌دهد که بافت پوسته کیک همگن‌تر و منظم‌تر شده است.

سوی دیگر، تیمارهای T19 تا T22 غیرمعنادار هستند و بهبود کمتری نشان می‌دهند. تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش درصد آنزیم ترانس گلوتامیناز (TG) و درصد پودر کنسانتره پروتئینی آب پنیر (WPC) مقدار کنتراست کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که افزودن هر دو ترکیب، به‌ویژه TG، منجر به افزایش همگنی بافت می‌شود. همچنین، بالاترین همبستگی در نمونه T19 مشاهده می‌شود، به‌طوری که با افزایش TG، WPC، همبستگی به‌طور چشمگیری

Table 4. GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) characteristics of cake crust on the fourteenth day.

تیمار	Contrast	Energy	Correlation	entropy	homogeneity	Prominence
T19	0.542 ^{ns}	0.890 ^{ns}	0 ^{ns}	0.015 ^{ns}	0.015 ^{ns}	0.626 ^{ns}
T20	1 ^{ns}	0.434 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.068 ^{ns}	0.068 ^{ns}	0.911 ^{ns}
T21	0.621 ^{ns}	0.833 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	0.0179 ^{ns}	0.017 ^{ns}	0.647 ^{ns}
T22	0.707 ^{ns}	0.579 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.058 ^{ns}	0.058 ^{ns}	0.783*
T23	0.497*	1*	0.001*	0*	0*	0.590*
T24	0.745**	0.366**	0.0006**	0.936**	0.093**	1**
T25	0.528**	0.885***	0.0004**	0.016**	0.016**	0.627**
T26	0.635**	0.414**	0.0006**	0.082**	0.082**	0.937**
T27	0.769***	0.434***	0.0007***	0.076***	0.076***	0.911***

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-Significance (T19)WP 0%-TG 0%, (T20)WP 0%-TG 0.05%, (T21) WP 0%-TG 0.1%, (T22)WP 10%-TG 0%, (T23)WP 10%-TG 0.05%, (T24)WP 10%-TG 0.1%, (T25)WP 20%-TG 0%, (T26)WP 20%-TG 0.05%, (T27)WP 20%-TG 0.1%.

افزایش TG، همبستگی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در مقابل، با افزایش WPC، همبستگی تنها به افزایش یافته است. در مورد برجستگی، مشاهده شده است که نمونه‌های T28 و T29 دارای بالاترین مقادیر برجستگی هستند. با افزایش درصد TG، برجستگی کاهش یافته، همچنین با افزایش درصد WPC نیز برجستگی کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که هر دو افزودنی، به‌ویژه WPC، توانسته‌اند برجستگی بافت را کاهش داده و یکنواخت‌تر کنند. همچنین، انتروپی پایین‌تر نشان می‌دهد که بافت کیک همگن‌تر و منظم‌تر شده است.

با بررسی دقیق داده‌های GLCM برای روز اول نمونه‌های مغز کیک، با توجه به جدول (۵)، مشخص گردید که تیمار T36 در روز اول نمونه‌های مغز کیک، در تمامی ویژگی‌ها بالاترین مقادیر را دارد و در ویژگی‌های Contrast، Correlation و Homogeneity معنادار است. از سوی دیگر، تیمار T29 کمترین مقادیر را دارد و در تمامی ویژگی‌ها غیرمعنادار است. بر اساس مقادیر مورد بررسی، تیمار T36 بهترین عملکرد را از خود نشان داده و سایر تیمارها به تدریج از نظر معناداری بهبود می‌یابند. با افزایش درصد آنزیم ترانس گلوتامیناز (TG)، مشاهده شده است که مقدار کنتراست کاهش یافته، به همین ترتیب با افزایش درصد پودر کنسانتره پروتئینی آب پنیر (WPC) نیز کنتراست کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که افزودن هر دو ترکیب، به‌ویژه TG، منجر به افزایش همگنی بافت شده است. همچنین، بالاترین همبستگی در نمونه‌های T28 و T29 مشاهده می‌شود و با

Table 5. GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) characteristics of cake crumb on the first day.

تیمار	Contrast	energy	Correlation	entropy	homogeneity	Prominence
T28	0.842 ns	0.479ns	0.003 ns	0.0829 ns	0.917 ns	0.918 ns
T29	0.842*	0.407ns	0.003 ns	0.0829 ns	0.0917 ns	0.918 ns
T30	1**	0.407 ns	0 ns	0.096 ns	0.898 ns	1 ns
T31	0.166**	0.919 ns	0.036 ns	0.013 ns	1 ns ns	0.631 ns
T32	0.188***	1 ns	0.031 *	0 ns	0.997 ns	0.674 ns
T33	0.232***	0.872 ns	0.018* *	0.023 ns	0.992 ns	0.979 ns
T34	0.866***	0.423 ns	0.057**	0.099 ns	0.914 ns	0.647 ns
T35	0.256***	0.941 ns	0.044***	0.008 ns	0.989 ns	0.648 ns
T36	0.503***	0.728 ns	0.047***	0.043 ns	0.958 ns	0.739 ns

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-Significance
(T28)WP 0%-TG 0%, (T29)WP 0%-TG 0.05%, (T30) WP 0%-TG 0.1%, (T31)WP 10%-TG 0%, (T32)WP 10%-TG 0.05%, (T33)WP 10%-TG 0.1%,
(T34)WP 20%-TG 0%, (T35)WP 20%-TG 0.05%, (T36)WP 20%-TG 0.1%.

WPC بر همبستگی کمتر از TG بوده است. با افزایش درصد TG از ۰٪ به ۱۰٪، همبستگی کاهش یافته است، که نشان از تأثیر مثبت اضافه کردن هر دو ترکیب بر بافت است. در مورد برجستگی، دیده شده است که مقادیر برجستگی در نمونه‌های T28 و T29 بالاترین است. با افزایش درصد TG از ۰٪ به ۱۰٪، برجستگی کاهش یافته است. همچنین، با افزایش درصد WPC نیز برجستگی کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که هر دو افزودنی، به ویژه WPC، توانسته‌اند برجستگی بافت را کاهش داده و آن را یکنواخت‌تر کنند. انروپی پایین‌تر نیز نشان از همگنی و منظم‌تر شدن بافت است. بنابراین، تحلیل داده‌های GLCM بر روی نمونه‌های مغز کیک در روز هفتم نشان می‌دهد که هر دو افزودنی TG و WPC توانسته‌اند بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک را تحقق بخشند، اما تأثیر WPC در کاهش برجستگی و انرژی، قوی‌تر از TG بوده است. این موضوع تطابقی با یافته‌های روزهای قبل را نشان می‌دهد، که افزودن WPC تأثیر قوی‌تری نسبت به آنزیم TG بر بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک داشته است.

تحلیل داده‌های GLCM در روز هفتم نمونه‌های مغز کیک، مشاهده‌ها نشان می‌دهند که تیمار T45 در تمامی ویژگی‌ها بالاترین مقادیر را دارد، اما همه مقادیر غیرمعدنادر هستند (جدول ۶). از سوی دیگر، تیمار T37 کمترین مقادیر را دارد و تمامی مقادیر نیز غیرمعدنادر هستند. تیمارهای T38 تا T44 به تدریج در حال بهبود هستند، اما هنوز به سطح معدناداری نرسیده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که تأثیر معدناداری در کلیت تیمارها وجود ندارد. مشاهده مقدار کنتراست بالاترین در نمونه T37 با مقدار ۱ بوده است. با افزایش درصد آنزیم ترانس گلوتامیناز (TG) از ۰٪ به ۱۰٪، کنتراست کاهش یافته است، که نشان می‌دهد TG توانسته است بافت را همگن‌تر کند. همچنین، با افزایش درصد پودر کنسانتره پروتئینی آب پنیر (WPC) نیز کنتراست کاهش یافته است، که نشان از تأثیر مثبت WPC بر همگنی بافت است. در مورد همبستگی، مشاهده شده است که بالاترین همبستگی در نمونه‌های T28 و T29 دیده شده و با افزایش TG به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. همچنین، با افزایش WPC، همبستگی نیز افزایش یافته است. تأثیر

Table 6. GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) characteristics of cake crumb on the seventh day.

تیمار	Contrast	energy	Correlation	entropy	homogeneity	Prominence
T37	1 ns	0.360 ns	0.000 ns	0.107 ns	0.907 ns	0.589 ns
T38	0.126 ns	1 ns	0.000	1 ns	1 ns	0.787 ns
T39	0.764 ns	0.569 ns	0.000	0.082 ns	0.932 ns	0.738 ns
T40	0.657 ns	0.644 ns	0.000	0.062 ns	0.943 ns	0.737 ns
T41	0.689 ns	0.650 ns	0	0.066 ns	0.941 ns	0.653 ns
T42	0.287 ns	0.819 ns	0.000	0.038 ns	0.983 ns	0.653 ns



T43	0.455 ns	0.740 ns	0.000	0.045 ns	0.964 ns	0.687 ns
T44	0.446 ns	0.775 ns	0.000	0.041 ns	0.965 ns	0.671 ns
T45	0.607 ns	0.606 ns	0.000	0.065 ns	0.948 ns	0.762 ns

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-significance (T37)WP 0%-TG 0%, (T38)WP 0%-TG 0.05%, (T39) WP 0%-TG 0.1%, (T40)WP 10%-TG 0%, (T41)WP 10%-TG 0.05%, (T42)WP 10%-TG 0.1%, (T43)WP 20%-TG 0%, (T44)WP 20%-TG 0.05%, (T45)WP 20%-TG 0.1%.

تطابقی با یافته‌های روزهای قبل را نشان می‌دهد، که افزودن WPC تأثیر قوی‌تری نسبت به آنزیم TG بر بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک داشته است. با افزایش درصد TG از ۰٪ به ۱۰٪، کنتراست کاهش یافته و با افزایش درصد WPC نیز کنتراست کاهش یافته است. همچنین، بالاترین همبستگی در نمونه T46 مشاهده شده و با افزایش TG به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش WPC، همبستگی نیز افزایش یافته است. تأثیر WPC بر همبستگی کمتر از TG بوده است. در مجموع، این تحلیل نشان می‌دهد که افزودن هر دو ترکیب TG و WPC به تدریج باعث بهبود خصوصیات بافتی می‌شود.

تمام مقادیر در جدول (۷) به‌صورت غیرمعنادار (ns) هستند. تیمار T54 به‌طور کلی بالاترین مقادیر را در تمامی ویژگی‌ها دارد. تیمار T46 کمترین مقادیر را دارد. در مجموع، هیچ‌یک از تیمارها به سطح معناداری نرسیده‌اند، اما روند افزایش در تیمارهای مختلف نشان‌دهنده بهبود تدریجی در خصوصیات بافتی است. نتایج حاکی از آن هستند که افزودن ترکیبات به تدریج باعث بهبود خصوصیات بافتی می‌شود. با توجه به تحلیل داده‌های GLCM برای روز چهاردهم نمونه‌های مغز کیک، مشاهده‌ها نشان می‌دهند که هر دو افزودنی TG و WPC توانسته‌اند بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک را تحقق بخشند. اما تأثیر WPC در کاهش برجستگی و انرژی، قوی‌تر از TG بوده است. این موضوع

Table 7. GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) characteristics of cake crumb on the fourteenth day.

تیمار	Contrast	energy	Correlation	entropy	homogeneity	Prominence
T46	0.427	0.830	0.001	0.034	0.981	0.859
T47	0.166	0.982	0.009	0.004	0.996	0.788
T48	1	0.617	0.001	0.074	0.948	1
T49	0.589	0.798	0.007	0.040	0.971	0.876
T50	0.325	0.922	0.005	0.017	0.987	0.814
T51	0.512	0.795	0.007	0.045	0.976	0.878
T52	0.110	1	0.001	0	1	0.781
T53	0.286	0.927	0.001	0.016	0.989	0.811
T54	0.420	0.828	0	0.035	0.981	0.859

* Significance level $p < 0.05$, ** Significance level $p < 0.01$, *** Significance level $p < 0.001$, ns Non-significance (T46)WP 0%-TG 0%, (T47)WP 0%-TG 0.05%, (T48) WP 0%-TG 0.1%, (T49)WP 10%-TG 0%, (T50)WP 10%-TG 0.05%, (T51)WP 10%-TG 0.1%, (T52)WP 20%-TG 0%, (T53)WP 20%-TG 0.05%, (T54)WP 20%-TG 0.1%.

با ایجاد اتصالات هیدروژنی و هیدروفوبی بین زنجیره‌های پروتئینی، یک شبکه پیوسته‌تر و منسجم‌تر در بافت تشکیل می‌دهد. این شبکه قوی‌تر باعث کاهش تغییرات محلی شدت پیکسل‌ها (تباین) و افزایش همبستگی فضایی بین پیکسل‌ها می‌شود. همچنین، WPC با ایجاد ساختار منظم‌تر، باعث کاهش شدید انرژی سیستم و افزایش همگنی بافت می‌شود. به‌طور خلاصه، TG و WPC هر دو نقش بسیار مهمی در بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک ایفا می‌کنند. اما تأثیر WPC در ایجاد یک شبکه پروتئینی قوی‌تر و همگن‌تر،

با تحلیل دقیق‌تر، می‌توان نقش هر یک از افزودنی‌ها، TG و WPC، در بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک را بهتر درک کرد. TG با ایجاد اتصالات کووالانسی بین زنجیره‌های پروتئینی، منجر به تشکیل یک ساختار شبکه‌ای قوی‌تر در بافت می‌شود. این ساختار پیوسته‌تر باعث کاهش تغییرات محلی شدت پیکسل‌ها (کنتراست) و افزایش همبستگی فضایی بین پیکسل‌های مجاور می‌شود [۳۰]. همچنین، TG با ایجاد این ساختار منظم‌تر، انرژی سیستم را کاهش داده و بافت را همگن‌تر می‌کند. از سوی دیگر، WPC

منظم‌تر، باعث کاهش شدید انرژی سیستم و افزایش همگنی بافت می‌گردد. علاوه بر این، مطالعه Soeda و همکاران [۳۷] نشان داد که WPC توانایی بیشتری نسبت به TG در کاهش برجستگی بافت دارد که به همگنی و یکنواختی آن کمک می‌کند. در مجموع، مطالعات پیشین مؤید این یافته است که هر دو افزودنی TG و WPC نقش مهمی در بهبود خصوصیات بافتی محصولات غذایی دارند. اما تأثیر WPC در ایجاد یک شبکه پروتئینی قوی‌تر و همگن‌تر، قابل توجه‌تر از TG بوده است که با پژوهش ما مطابقت دارد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج کلی این مطالعه نشان داد که استفاده از آنزیم ترانس‌گلوتامیناز (TG) و کنسانتره پروتئینی آب‌پنیر (WPC) تأثیر قابل توجهی بر بهبود خصوصیات بافتی مغز و پوسته کیک اسفنجی دارد. آنزیم ترانس‌گلوتامیناز TG با ایجاد پیوندهای کووالانسی، باعث کاهش کنتراست، افزایش همبستگی فضایی و ایجاد نظم بیشتر در ساختار بافت شد، در حالی که WPC با ایجاد اتصالات هیدروژنی و هیدروفوبی، تأثیر قوی‌تری در کاهش برجستگی، انرژی و کنتراست داشت و موجب یکنواخت‌تر شدن بافت شد. تیمارهای T36 (روز اول مغز کیک) و T27 (روز چهاردهم پوسته کیک) به‌عنوان بهترین تیمارها از نظر تمامی ویژگی‌های بافتی شناسایی شدند. اگرچه در برخی جداول مقادیر غیرمعنادار بودند، اما روند بهبود تدریجی در تمامی ویژگی‌ها از جمله همگنی، همبستگی و کاهش آشفستگی مشهود بود. افزایش TG و WPC به‌طور همزمان باعث کاهش کنتراست و انرژی و افزایش همبستگی شد، که نشان‌دهنده افزایش نظم و همگنی در ساختار بافت کیک بود. مقایسه این دو افزودنی نشان داد که WPC تأثیر قوی‌تری نسبت به TG در کاهش برجستگی بافت و افزایش یکنواختی دارد، در حالی که TG در افزایش همبستگی و کاهش کنتراست عملکرد برجسته‌ای داشت. در نهایت، این مطالعه تأیید کرد که ترکیب TG و WPC ابزاری مؤثر برای بهبود کیفیت بافت کیک است، به‌طوری که با کاهش کنتراست و انرژی و افزایش همبستگی و همگنی، ساختاری منظم‌تر و یکنواخت‌تر ایجاد شد که منجر به بهبود کیفیت کلی کیک‌های اسفنجی شد. نتایج این

به نسبت به TG، قابل توجه‌تر است. این موضوع در کاهش کنتراست، افزایش همبستگی، کاهش انرژی و کاهش برجستگی بافت به وضوح مشهود است. منظور از این موارد این است که هر دو افزودنی TG و WPC نقش بسیار مهمی در بهبود خصوصیات بافتی نمونه‌های کیک دارند، اما تأثیر WPC در ایجاد یک شبکه پروتئینی قوی‌تر و همگن‌تر، به‌طور قابل توجه‌تر از TG است. مطالعه Amani و همکاران [۳۱] نیز ارزیابی غیرمخرب پارامترهای پخت را روی بافت پوگاسا^۱ نشان داد. پارامترهای پروفایل بافت همبستگی قوی ($p < 0.01$) را با پارامترهای الگوی تصویر در گروه‌های مختلف پوگاسا نشان داد. صمغی بودن همبستگی قوی با کنتراست (0.503)، همبستگی (0.498) و همگنی (0.401) نشان داد. سختی نیز با کنتراست (0.517)، آنترویی (0.341) و همبستگی (0.476) همبستگی نشان داد. هنگام استفاده از زمان‌ها و دماهای مختلف، تخلخل تغییرات مشخصی را در ساختار خرده نان نشان داد. تکنیک مبتنی بر GLCM پتانسیل استفاده به‌عنوان یک روش غیر مخرب برای ارزیابی سریع کیفیت پوگاسا را دارد.

مطالعه Kuraishi و همکاران [۳۲]، نشان داد که TG با ایجاد پیوندهای کووالانسی بین زنجیره‌های پروتئینی، باعث تشکیل یک ساختار شبکه‌ای قوی‌تر در بافت می‌شود. طبق پژوهش Motoki و Seguro [۳۳]، این شبکه پیوسته‌تر منجر به کاهش تغییرات محلی شدت پیکسل‌ها (کنتراست) و افزایش همبستگی فضایی بین پیکسل‌های مجاور شد. مطالعه Arrizubieta [۱] نشان داد که TG با ایجاد این ساختار منظم‌تر، انرژی سیستم را کاهش داده و باعث همگنی بیشتر بافت می‌شود. طبق تحقیق Dannenberg و Kessler [۳۴]، WPC با ایجاد اتصالات هیدروژنی و هیدروفوبی بین زنجیره‌های پروتئینی، یک شبکه پیوسته‌تر و منسجم‌تر در بافت تشکیل داد. پژوهش Kumar و همکاران [۳۵] نشان داد که این شبکه قوی‌تر باعث کاهش تغییرات محلی شدت پیکسل‌ها (کنتراست) و افزایش همبستگی فضایی بین پیکسل‌ها می‌شود. همچنین طبق پژوهش Purwandari و همکاران [۳۶]، WPC با ایجاد این ساختار

1. Pogacsa



تحقیق مؤید آن بود که با کمک پردازش تصویر، امکان بررسی شاخص‌های بافت کیک اسفنجی امکان‌پذیر است و به این ترتیب می‌توان کارایی کنترل کیفیت را افزایش و وابستگی به بازرسی حسی ذهنی محصول را کاهش داد.

تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و برگرفته از طرح شماره ۱۴۰۲/۲۱ انجام شده است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده

منابع

- [1] Arrizubieta, M. J. (2007). Transglutaminases. In: *Industrial enzymes: Structure, function and applications* (pp. 567-581). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-5377-0_32
- [2] Najjaa, H., Ben Arfa, A., Elfalleh, W., Zouari, N., & Neffati, M. (2020). Jujube (*Zizyphus lotus* L.): Benefits and its effects on functional and sensory properties of sponge cake. *PloS one*, 15(2), e0227996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227996>
- [3] Taghdiri, S., Emtiazjoo, M., Azizi, M. H., Ariaai, P., & Sedaghati, M. (2024). The effect of hydrolyzed protein obtained from *Chlorella vulgaris* on the shelf life and quality of oil cake during the storage period. *J. Food Meas. Charact.*, 18(1), 582-592. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02186-y>
- [4] Hidalgo, A., Lucisano, M., Mariotti, M., & Brandolini, A. (2019). Physico-chemical and nutritional characteristics of einkorn flour cookies. *J. Food Process. Preserv.*, 43(9), e14079. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14079>
- [5] Jooyandeh, H., Goudarzi, M., Rostamabadi, H., and Hojjati, M. (2017). Effect of Persian and almond gums as fat replacers on the physicochemical, rheological, and microstructural attributes of low-fat Iranian White cheese. *Food Sci. Nutr.*, 5, 669-677. <https://doi.org/10.1002/fsn.3446>
- [6] Kouravand, F., Jooyandeh, H., Barzegar, H., & Hojjati M. (2020). Mechanical, barrier and structural properties of whey protein isolate-based films treated by microbial transglutaminase. *Journal of Microbiology, Biotechnol. Food Sci.*, 9(5), 960-964. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.5.960-964>
- [7] Jooyandeh, H. (2011). Whey protein films and coatings: A review. *Pak. J. Nutr.*, 10(3), 296-301. <https://doi.org/10.3923/pjn.2011.296.301>
- [8] Jooyandeh, H., Minhas K.S. & Kaur A. (2009). Sensory quality and chemical composition of wheat breads supplemented with fermented whey protein concentrate and whey permeate. *J. Food Sci. Technol.*, 46(2), 146-148.
- [9] Krupa-Kozak, U., Drabińska, N., Bączek, N., Šimková, K., Starowicz, M., & Jeliński, T. (2021). Application of broccoli leaf powder in gluten-free bread: An innovative approach to improve its bioactive potential and technological quality. *Foods*, 10(4), 819. <https://doi.org/10.3390/foods10040819>
- [10] Alimoradi, F., Hojati, E., Jooyandeh, H., Zehni-Moghadam, S.A.H. & Moludi, J. (2016). Whey proteins: Health benefits and food applications. *J. Int. Res. Med. Pharm. Sci.*, 9(2), 63-73. <https://ikpress.org/index.php/JIRMEPS/article/view/2740>
- [11] Hajas, L., Benedek, C., Csajbókné Csobod, É., & Juhász, R. (2022). Development of protein-and fiber-enriched, sugar-free lentil cookies: impact of whey protein, inulin, and xylitol on physical, textural, and sensory characteristics. *Foods*, 11(23), 3819. <https://doi.org/10.3390/foods11233819>
- [12] Jooyandeh, H., & Minhas, K.S. (2021). Utilization of fermented whey protein concentrate and whey permeate in beard loaf making. *J. Food Bioprocess Eng.*, 4(2), 186-192. <https://doi.org/10.22059/JFABE.2021.335604.1102>
- [13] Camargo, L. R., Silva, L. M., Komerowski, M. R., Kist, T. B., Rodrigues, C. E., Rios, A. d. O., et al. (2018). Effect of whey protein addition on the nutritional, technological and sensory quality of banana cake. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 53(11), 2617-2623. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13857>
- [14] Rahim Monfared, M., Nouri, L., & Mohammadi Nafchi, A. (2023). The effects of sesame protein isolate and transglutaminase enzyme on the quality characteristics of gluten-free batter and cake. *J. Food Meas. Charact.*, 17(5), 4881-4891. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01975-9>
- [15] Torabi, F., Jooyandeh, H., Noshad, M. &

- Barzegar, H. (2019). Modeling and optimization of physicochemical and organoleptical properties and *Lactobacillus acidophilus* viability in ultrafiltrated synbiotic cheese, containing microbial transglutaminase enzyme, whey and inulin. *Res. Innov. Food Sci. Technol.*, 8(2), 137-150. (In Persian)
<https://doi.org/10.22101/JRIFST.2019.07.22.823>
- [16] Jooyandeh, H., Danesh, E., & Goudarzi, M. (2019). Influence of transglutaminase treatment on proteolysis and lipolysis of low-fat white-brined cheese incorporated with whey proteins during ripening. *J. Food Technol. Nutr.*, 15(4), 31-44. (In Persian)
<https://sanad.iau.ir/en/Journal/DownloadFile/832461>
- [17] Campbell, L., Euston, S. R., & Ahmed, M. A. (2016). Effect of addition of thermally modified cowpea protein on sensory acceptability and textural properties of wheat bread and sponge cake. *Food Chem.*, 194, 1230-1237.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.002>
- [18] Jooyandeh, H. (2025). Composition of foods and their functions in human nutrition. 1st ed., Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University Press. (In Persian)
- [19] Nooshkam, M., Babazadeh A., and Jooyandeh, H. (2018). Lactulose: Properties, technofunctional food applications, and food grade delivery system. *Trends Food Sci. Technol.*, 80, 23-34.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.028>
- [20] Redd, A.J., Pike, O.A., and Ahlborn, G.J. (2024). Effects of microbial transglutaminase on gluten-free sourdough bread structure and loaf characteristics. *J. Cereal Sci.*, 115, 103833.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103833>
- [21] Babakhani, S., Moghaddaszadeh-Ahrabi, S., & Gharakhani, M. (2019). Physicochemical and sensory properties of cake enriched with fish protein powder (FPP) and transglutaminase enzyme. *J. Food Sci. Technol. (Iran)*, 16(95), 179-196. (In Persian)
<https://doi.org/10.29252/fsct.16.95.15>
- [22] Alp, H., & Bilgiçli, N. (2008). Effect of transglutaminase on some properties of cake enriched with various protein sources. *J. Food Sci.*, 73(5), 5209-5214.
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00760.x>
- [23] Bonnand-Ducasse, M., Della Valle, G., Lefebvre, J., & Saulnier, L. (2010). Effect of wheat dietary fibres on bread dough development and rheological properties. *J. Cereal Sci.*, 52(2), 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.05.006>
- [24] Abdanan Mahdizadeh, S., Noshad, M., & Noori, S.F. (2023). Non-destructive detection of bread staleness using hyperspectral images. *Innov. Food Technol.*, 10(4), 299-317. (In Persian)
<https://doi.org/10.22104/IFT.2023.6279.2142>
- [25] Maravić, N., Škrobot, D., Dapčević-Hadnađev, T., Pajin, B., Tomić, J., & Hadnađev, M. (2022). Effect of sourdough and whey protein addition on the technological and nutritive characteristics of sponge cake. *Foods*, 11(14), 1992.
<https://doi.org/10.3390/foods11141992>
- [26] Ghaemi, P., Arabshahi Delouee, S., Aalami, M., & Hosseini ghaboos, S. H. (2022). The effect of whey protein concentrate and soy protein isolate along with basil seed gum on some physicochemical and sensory properties of gluten-free dough and cake based on rice flour. *Iran. J. Food Sci. Technol.*, 19(127), 139-154. (In Persian)
<https://doi.org/20.1001.1.20088787.1401.19.127.18.1>
- [27] Krupa-Kozak, U., Bączek, N., & Rosell, C. M. (2013). Application of dairy proteins as technological and nutritional improvers of calcium-supplemented gluten-free bread. *Nutrients*, 5(11), 4503-4520.
<https://doi.org/10.3390/nu5114503>
- [28] Moradi, M., Bolandi, M., Karimi, M., Nahidi, F., & Begaei, H. (2021). Effect of microbial transglutaminase enzyme, guar gum, sodium caseinate additive on gluten-free tafton bread (based on Agria potato powder). *Iran. J. Food Sci. Technol.*, 18(116), 347-356. (In Persian)
<https://doi.org/10.52547/fsct.18.116.347>
- [29] Meybodi, N. M., Mirmoghtadaie, L., Sheidaei, Z., Arab, M., Nasab, S. S., Taslikh, M., & Mortazavian, A. M. (2021). Application of microbial transglutaminase in wheat bread industry: A review. *Curr. Nutr. Food Sci.*, 17(5), 450-457.
<https://doi.org/10.2174/1573401316999201001145814>
- [30] Kaić, A., Janječić, Z., Žgur, S., Šikić, M., & Potočnik, K. (2021). Physicochemical and sensory attributes of intact and restructured chicken breast meat supplemented with transglutaminase. *Animals*, 11(9), 2641.
<https://doi.org/10.3390/ani11092641>
- [31] Amani, H., Firtha, F., Jakab, I., Baranyai, L., & Badak-Kerti, K. (2021). Nondestructive evaluation of baking parameters on pogácsa texture. *J. Texture Stud.*, 52(4), 510-519.
<https://doi.org/10.1111/jtxs.12619>
- [32] Kuraishi, C., Yamazaki, K., & Susa, Y. (2001). Transglutaminase: its utilization in the food industry. *Food Rev. Int.*, 17(2), 221-246.
<http://dx.doi.org/10.1081/FRI-100001258>



- [33] Motoki, M., & Seguro, K. (1998). Transglutaminase and its use for food processing. *Trends Food Sci. Technol.*, 9(5), 204-210. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00038-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00038-7)
- [34] Dannenberg, F., & Kessler, H. G. (1988). Reaction kinetics of the denaturation of whey proteins in milk. *J. Food Sci.*, 53(1), 258-263. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb10223.x>
- [35] Kumar, C. T. M., Sabikhi, L., Singh, A., Raju, P. N., Kumar, R., & Sharma, R. (2019). Effect of incorporation of sodium caseinate, whey protein concentrate and transglutaminase on the properties of depigmented pearl millet based gluten free pasta. *LWT-Food Sci. Technol.*, 103, 19-26. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.12.071>
- [36] Purwandari, U., Khoiri, A., Muchlis, M., Noriandita, B., Zeni, N. F., Lisdayana, N. & Fauziyah, E. (2014). Textural, cooking quality and sensory evaluation of gluten-free noodle made from breadfruit, konjac, or pumpkin flour. *Int. Food Res. J.*, 21(4), 1623-1627.
- [37] Soeda, T., Sotozono, A., Kasaki, T., & Sakamoto, M. (2006). Physical modification of whey protein concentrates by microbial-derived transglutaminase. *J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol.*, 53(1), 74-79. <https://doi.org/10.3136/nskkk.53.74>

Research Article

Evaluation of the effect of microbial transglutaminase enzyme and whey protein concentrate on sponge cake texture characteristics based on image processing

Hossein Jooyandeh^{1*}, Saman Abdanan Mahdizadeh², Sara Saniee³

1*. Professor, Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2. Associate Professor, Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

3. MSc., Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(Received: 23 November 2025, Received in revised form: 02 January 2026, Accepted: 31 January 2026)

Introduction: In today's competitive market, the success of confectionery products depends not only on their appearance and texture but also on their taste and shelf life. Therefore, cake manufacturers are always looking for new techniques and materials that help improve the quality and maintain the nutritional value of the products. In this regard, two important additives that have recently attracted special attention are whey protein concentrate (WPC) and transglutaminase (TG) enzyme. WPC can play a fundamental role in food processing due to its functional properties. Transglutaminase also improves the correlation and uniformity of the protein network by creating cross-links between gluten molecules and other proteins and can positively affect the texture, shelf life, and color uniformity of the cake. Evaluation of cakes based on image processing provides the possibility of objective and reproducible measurement of appearance characteristics such as color uniformity and texture indicators, and as a result, it provides the basis for applying more precise and simple control over the quality of the product. The purpose of this study was to investigate the effect of addition of TG Enzyme and WPC powder on the textural characteristics of sponge cake according to the color characteristics of the product.

Material and methods: In this research, the effect of TG enzyme treatment (0%, 0.05% and 0.15%) and addition of WPC (0%, 10% and 20%, replaced with flour, w/w) on improving the uniformity, homogeneity and texture quality of sponge cake was analyzed based on the evaluation of structural changes using the gray level co-occurrence matrix (GLCM) method. Crust color analysis was performed by determining three indices: brightness (*L, range from 0 to 100), redness (*a), and yellowness (*b) (range from -120 to +120). To measure these indices, a 2×2 cm slice of bread crust was prepared using a 120-watt electric saw knife, model 41600, and imaged using a scanner (model: HP Scanjet G3010) with a resolution of 300 pixels. The images were then made available to Image J software. The above indices were calculated by activating the LAB space in the Plugins section. After transferring the images to the computer, in order to evaluate the texture characteristics (bread crust and crumb), the images were converted from color to grayscale and the edges of the images were highlighted. Then, a grayscale co-occurrence matrix (GLCM) was designed.

Results and discussion: The results of the analysis of variance related to the color parameters L*, a*, b* of the crust and crumb of the cake samples showed that all three variables (G, WPC, and storage time) had a significant effect on the color parameters (P<0.001). Moreover, the study of the interaction effects in the crust and crumb of the cake showed a significant effect on these color parameters. As the levels of WPC increased,

* Corresponding Author: hosjooy@asnruk.ac.ir



the lightness value decreased significantly. The reason for this can be attributed to the Maillard browning reaction caused by lactose in the concentrate. Furthermore, with increasing enzyme percentage, the lightness value in the crust and crumb of the cake increased and the intensity of redness in the crust and the intensity of green in the crumb of the cake samples decreased. However, the decrease in green intensity in the samples containing 0.05% enzyme was not significant compared to the control sample. Further, the b^* index of the samples in the crust and crumb of the cake decreased with increasing TG enzyme percentage. The reason for the color changes as a result of enzyme addition can be attributed to the crosslinking between the amino acids lysine and glutamine. In fact, the enzyme increases the L^* index and decreases a^* and b^* by reducing the amount of available lysine and reducing the Maillard reaction. Our findings indicated that TG reduced the contrast and increased correlation and texture arrangement by creating covalent bonds; while WPC, by forming hydrogen and hydrophobic bonds, reduced prominence, increased energy and contrast compared to TG. The treatments containing higher percentages of TG and WPC had more uniformity, and among them, treatments T36 and T27 showed the best performance. Although the values related to some tables were not statistically significant, the gradual improvement process was clearly visible and WPC played a stronger effect in reducing tissue changes. These findings were consistent with previous studies. In addition, the decrease in contrast and entropy and increase in correlation with the addition of TG and WPC were confirmed.

Conclusions: WPC contains high-quality proteins, including alpha-lactalbumin and beta-lactoglobulin, which help improve the physical and nutritional properties of food products. However, excessive addition of the powder can negatively affect the color and texture of the final cake, and therefore, using TG enzyme can compensate for this deficiency. This study confirmed that the combination of TG and WPC is an effective tool for improving the texture quality of cakes, so that by reducing contrast and energy and increasing correlation and homogeneity, a more regular and uniform structure was created, which led to an improvement in the overall quality of sponge cakes. The results of this study confirmed that with the help of image processing, it is possible to examine the texture parameters of sponge cakes, thus increasing the efficiency of quality control and reducing the dependence on subjective sensory inspection of the product.

Keywords: *Color characteristics, TG, WPC, GLCM, storage period.*