مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال بیست و یکم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، صفحات ۱۱۱-۹۹

استفاده از آنزیم ترانس گلوتامیناز و آرد گندم سیاه به عنوان جایگزین آرد گندم در فرمولاسیون بیسکویت

شیرین محمدی نیا [۱]، حجت کاراژیان [۲]

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

۲- نویسنده مسئول: گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران. پست الکترونیکی: hojjat.karazhiyan@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: بیسکویت به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین فرآورده‌های غلات در جهان، سهم مهمی در سبد غذایی افراد دارد. در سال‌های اخیر، افزایش آگاهی عمومی نسبت به پیامدهای مصرف گلوتن، سبب رشد تقاضا برای محصولات فاقد گلوتن گردیده است.

مواد و روش‌ها: سطوح مختلف آرد گندم سیاه (۰ تا ۶۰٪) و آنزیم ترانس گلوتامیناز صفر درصد تا ۰/۳ ٪ در فرمولاسیون مورد استفاده قرار گرفت. آزمون‌های شیمیایی (اندازه‌گیری رطوبت، پروتئین، چربی و خاکستر)، فیزیکی (فعالیت آبی، رنگ‌سنجی و بافت‌سنجی) و ارزیابی حسی (روش هدونیک پنج‌نقطه‌ای) انجام گرفت.

یافته‌ها: با افزایش درصد آرد گندم سیاه، میزان پروتئین بیسکویت افزایش یافت. سطح چربی در نمونه‌ها بالاتر رفت که بخشی از این تغییر به توانایی نگهداری روغن در آرد گندم سیاه نسبت داده شد. ارزیابی فعالیت آبی بیانگر کاهش تدریجی آن با افزایش آرد گندم سیاه و آنزیم ترانس گلوتامیناز بود. از نظر ویژگی‌های بافتی، استفاده از آرد گندم سیاه منجر به افزایش سفتی نمونه‌ها گردید؛ هرچند افزودن آنزیم ترانس گلوتامیناز تا حدودی این اثر را تعدیل کرد. بررسی رنگ‌سنجی نشان داد افزایش سطح آرد گندم سیاه موجب کاهش روشنایی و افزایش تیرگی محصول شد. نمونه شاهد (۱۰۰٪ آرد گندم) بالاترین امتیاز را در ارزیابی های حسی کسب کرد، اما برخی تیمارهای حاوی ترکیب آرد گندم سیاه و آنزیم همچنان پذیرش قابل‌توجهی داشتند.

نتیجه‌گیری: به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از آرد گندم با آرد گندم سیاه همراه با آنزیم ترانس گلوتامیناز می‌تواند به تولید بیسکویت‌های کم گلوتن با ارزش تغذیه‌ای بالاتر و کیفیت قابل قبول کمک نماید.

واژگان کلیدی: بیسکویت بدون گلوتن، آرد گندم سیاه،آنزیم ترانس‌گلوتامیناز، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، ارزیابی حسی

پیام‌های اصلی

- حساسیت و عدم تحمل گلوتن عمدتاً به گلیادین گندم مربوط بوده و جایگزینی آرد گندم با آردهای فاقد گلوتن و غنی از ریزمغذی‌ها، راهکار مؤثر تولید محصولات ایمن و با ارزش تغذیه‌ای بالاتر است.
- آرد گندم سیاه به‌دلیل فقدان گلیادین و دارا بودن ریزمغذی‌ها و پروفایل اسیدآمینه متعادل، ارزش بیولوژیکی بالایی داشته و گزینه‌ای مناسب در فرمولاسیون نان‌ها و بیسکویت‌های کم‌گلوتن یا بدون‌گلوتن است.
- افزودن بهبود دهنده‌ها در فرمولاسیون محصولات کم‌گلوتن به تقلید خواص ویسکوالاستیک گلوتن کمک می‌کند و در بیسکویت کم‌گلوتن، آنزیم ترانس‌گلوتامیناز با ایجاد شبکه شبه‌گلوتنی موجب افزایش نگهداری آب، ویسکوزیته، استحکام و حفظ حجم در پخت می‌شود.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

• مقدمه

بیسکویت به عنوان یکی از پرطرفدارترین و پرمصرف‌ترین فرآورده‌های غلات در سطح جهان، جایگاه ویژه‌ای در سبد غذایی خانواده‌ها به ویژه کودکان و نوجوانان دارد. این محصول که با تنوع گسترده‌ای در طعم، بافت، شکل و اندازه تولید می‌شود، نه‌تنها به عنوان یک میان وعده سریع و دلپذیر، بلکه به عنوان بخشی از فرهنگ غذایی ملل مختلف در سراسر جهان شناخته می‌شود (۱).

بیماری سلیاک یک اختلال خودایمنی است که در افراد مستعد ژنتیکی، در اثر مصرف گلوتن، پروتئین موجود در گندم، جو و چاودار ایجاد می‌شود، در این بیماری سیستم ایمنی بدن به گلوتن واکنش نشان داده و منجر به آسیب پرزهای رودۀ کوچک، التهاب و سوء جذب مواد مغذی می‌شود (۲). افزایش آگاهی عمومی نسبت به بیماری سلیاک، حساسیت به گلوتن و سایر اختلالات مرتبط با مصرف گلوتن، تقاضا برای فرآورده‌های غذایی با کاهش گلوتن یا بدون گلوتن را به طور چشمگیری افزایش داده است (۳). توجه به فرمولاسیون‌های جدید برای تولید محصولات کم‌گلوتن یا فاقد گلوتن، همواره مورد توجه محققان صنعت غذایی است (۴).

با توجه به این نیاز رو به رشد و اهمیت یافتن رژیم‌های غذایی خاص، صنعت غذا به دنبال یافتن راهکارهای نوآورانه برای تولید فرآورده‌های جایگزین و غنی شده است که علاوه بر کاهش یا حذف گلوتن، از نظر ارزش غذایی نیز غنی باشند و بتواند نیازهای تغذیه‌ای را برآورده سازند (۵). یکی از این رویکردها، استفاده از غلات فاقد گلوتن یا کم گلوتن می‌باشد، مانند گندم سیاه، برنج سفید، ذرت، ارزن و برنج قهوه ای، آمارانت، سورگوم وآرد حبوبات و... که می‌تواند به عنوان جایگزین در تولید فرآورده‌های غلات مصرف شوند (۶).

گندم سیاه، علیرغم نامش، از خانواده غلات نیست و یک شبه غله است. این گیاه از نظر ارزش غذایی بسیار غنی بوده و حاوی مقادیر قابل توجهی از پروتئین، فیبر، مواد معدنی ضروری (مانند منیزیم، آهن، روی و مس) است، همچنین دارای آنتی‌اکسیدان‌های قوی مانند روتین و کوئرسیتین است که برای حفظ سلامتی مفیدند (۷).

آنزیم ترانس گلوتامیناز جزء آنزیم‌های تراتسفرازی پروتئینی می‌باشد و به ترانس گلوتامیناز معروف است، که قابلیت اتصال مجدد با پیوندهای ضعیف شبکه گلوتن را داراست و به بهبود ویژگی‌های بافت، کیفیت و ماندگاری محصول کمک می‌کند (۸). آنزیم ترانس گلوتامیناز با افزایش ظرفیت نگهداری آب و تقویت ساختار شبکه پروتئینی، می‌تواند ویژگی‌های مشابه با محصولات دارای گلوتن را ایجاد نماید، این شبیه‌سازی موجب بهبود الاستیسیته، حجم، پوکی، ماندگاری و پذیرش حسی خوب از طریق مصرف کنندگان می‌شود (۹).

اعتماد و همکاران (۱۰)، تولید بیسکویت بدون گلوتن از آرد جودوسر غنی‌شده با پودر گالانگال را مورد بررسی قرار دادند. شوشیان و همکاران (۱۱)، اثر بخشی استفاده از بذر اوکارا و جک‌فروت را در تولید بیسکویت بدون گلوتن مورد ارزیابی قرار دادند. کوهلی و همکاران (۱۲)، جهت تهیه بیسکویت بدون گلوتن از آردهای بدون گلوتن نظیر برنج، سورگوم و ذرت در غلظت‌های مختلف استفاده نمودند. آکتر و همکاران (۱۳)، با جایگزینی آرد ارزن و هیدروکلوئید کربوکسی متیل سلولز، خواص بیسکویت بدون گلوتن تولید شده را مورد بررسی قرار دادند. کرونل و همکاران (۱۴)، پیش مخلوطهایی را مبنی بر مخلوط آرد گندم سیاه و آرد دانه چیا برای بالابردن ارزش تغذیه‌ای در فرمولاسیون نان بدون گلوتن تهیه کردند. قاسمی و همکاران (۱۵)، اثر آنزیم ترانس گلوتامیناز و صمغ زانتان را بر روی پاستای فرمی بدون گلوتن مورد بررسی قرار دادند. شاهسونی و همکاران (۱۶)، اثر جایگزینی آرد چاودار در حضور آنزیم ترانس گلوتامیناز را در تولید نودل بررسی کردند. صفوی و همکاران (۱۷)، تأثیر افزودن کارئینات سدیم و آنزیم ترانس‌گلوتامیناز را بر خواص رئولوژیکی، فیزیکی و حسی نان بدون گلوتن بر پایه آرد ذرت ارزیابی کردند. سعیدی و همکاران (۱۸)، ویژگی‌های فیزیکی کیک بدون گلوتن حاوی پودر هسته انار و آنزیم ترانس گلوتامیناز را مورد بررسی قرار دادند.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی امکان تولید بیسکویت با گلوتن کاهش یافته و استفاده از جایگزینی آرد گندم سیاه و آنزیم ترانس گلوتامیناز است.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

• مواد و روش‌ها

مواد

آرد گندم سفید مخصوص بیسکویت، از شرکت آرد خوشه طلایی سپید (نام تجاری پردل، مشهد)، گندم سیاه روسی (شرکت توسعه تجارت سبز ایلیا، مشهد)، آنزیم ترانس گلوتامیناز (ویموهوب ساخت کشور بلغارستان از شرکت شیمیاگران تجارت مطهر)، شیرخشک (برند کانیار محصول فرآورده‌های لبنی یکدانه شرق، قوچان) خریداری شدند. سایر مواد مورد استفاده در تهیه بیسکویت (تخم‌مرغ، شکر، روغن قنادی، بیکینگ‌پودر و نمک) از فروشگاه‌های معتبر در سطح شهر خریداری شد.

تهیه بیسکویت

ابتدا روغن قنادی را با همزن زده تا کمی نرم شود، سپس شکر را افزوده و هم‌زدن را ادامه می‌دهیم تا مخلوط کاملاً پوک و سفید شود و در مرحله بعدی تخم‌مرغ را اضافه نموده و هم می‌زنیم تا مخلوط کرم‌رنگ و غلیظ شود، مواد خشک شامل آرد گندم، بیکینگ‌پودر، نمک، شیرخشک را با هم مخلوط کرده و به مخلوط مایع افزوده و خمیر (جدول ۱) را ورز می‌دهیم تا یکنواخت و منسجم شود و خمیر لطیف بدست آمده را روی سطح صاف آرد پاشی شده به ضخامت (۲ـ۴) میلی‌متر پهن کرده و قالب زده و در سینی مخصوص فر چیده و به فر از قبل گرم شده با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت (۷ـ۱۲) دقیقه منتقل می‌کنیم. پس از تکمیل پخت و خنک شدن تیمارها، در ظروف درب‌دار پلی‌اتیلنی به منظور ارزیابی خصوصیات مورد نظر بسته‌بندی شده و در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و در غیاب نور نگهداری شد (۱۹).

جدول ۱- فرمولاسیون خمیر مورد استفاده در تهیه بیسکویت

جدول ۱. فرمولاسیون خمیر بیسکویت

نام ماده	درصد
آرد گندم	۵۵/۸۷
شکر	۱۹/۵۵
روغن قنادی	۱۱/۱۷
تخم مرغ	۱۱/۱۷
شیرخشک	۱/۱۲
بیکینگ‌پودر	۰/۵۶
نمک	۰/۵۶

با استناد به فرمولاسیون و روش تهیه بیسکویت، تیمارها با درصدهای ۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ درصد از گندم سیاه به عنوان جایگزین بخشی از آرد گندم و افزودن آنزیم گلوتامیناز در سه سطح ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ درصد تهیه شد.

آزمون‌ها

آزمون‌های فیزیکوشیمیایی آرد گندم معمولی ، آرد گندم سیاه و بیسکویت

میزان رطوبت ، درصد خاکستر، درصد پروتئین، میزان چربی، آزمون pH طبق استاندارد AACC (۲۰) تعیین شدند، فیبر خام طبق استاندارد AOAC (۲۱) و میزان کربوهیدرات قابل هضم طبق روش تفاضل انجام شد.

آزمون فعالیت آبی

فعالیت آبی نمونه‌ها، توسط دستگاه aw متر (Lab Master Neo, Nova Sina، سوئیس) اندازه‌گیری شد، نمونه‌های آسیاب شده در محفظه مخصوص قرار گرفت و فعالیت آبی در دمای ۲۵درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) خوانده شد (۲۲).

آزمون بافت

آزمون بافت سنجی توسط دستگاه آنالیز گر بافت (Stable micro system ، TA-XT plasc، انگلستان) و روش خمش ۳ نقطه‌ای استفاده شد. بیسکویت‌های سالم (بدون لب‌پریدگی یا شکستگی) انتخاب شدند، نمونه ها در زیر یک پروب استوانه ای با انتهای صاف و از جنس آلومینیوم و با قطر ۲۵ میلی متر و با سرعت ۲ میلی‌متر برثانیه فشرده شدند. حداکثر نیروی موردنیاز جهت اعمال این فشردگی به عنوان شاخصی از میزان سفتی نمونه برحسب کیلوگرم گزارش شد (۲۳).

آزمون رنگ

اندازه گیری رنگ از طریق تعیین سه شاخص*L (شدت روشنایی) ، *a (شدت قرمزی) و*b (شدت زردی) صورت پذیرفت. در عمل برای اندازه گیری این شاخص‌ها ابتدا میزان مشخصی از نمونه به درون یک پلیت تمیز و شفاف ریخته شد. تصویربرداری بوسیله اسکنر (HP Scanjet مدل G3010، چین) در رزولوشن (Resolution) ۳۰۰ dpi و با انتخاب یک زمینه ۴۰×۴۰ میلی متری از قسمت مرکزی نمونه انجام گرفت. تصاویر تهیه شده با فرمت و ابعاد معین ذخیره و سپس در اختیار نرم افزار Image J (نسخه 1.40g) قرار گرفتند. با تبدیل

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

فضای رنگی RGB به LAB ، شاخص‌های فوق محاسبه شدند (۲۴).

ارزیابی حسی

روش آزمون ارزیابی حسی، هدونیک پنج نقطه‌ای بود. ۱۵ نفر که پیش از آزمون با شیوه امتیازدهی و نحوه تکمیل فرم‌ها آشنا شدند، انتخاب شدند. ارزیابان براساس پارامترهای خواسته شده شامل (طعم و مزه، عطر و بو، رنگ، بافت و پذیرش کلی) به نمونه‌های تهیه شده از ۱ تا ۵ (۵ عالی و ۱ نامطلوب) امتیاز دادند.

• یافته‌ها

بررسی ویژگی‌های شیمیایی آردهای مصرفی

میزان ترکیبات شیمیایی آرد گندم و آرد گندم سیاه در جدول ۲، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود میزان پروتئین، چربی، فیبرخام، خاکستر و pH در آرد حاصل از گندم سیاه (گندم سیاه) نسبت به آرد گندم بیشتر می‌باشد و بین میزان کربوهیدرات خام دو نمونه آرد مورد بررسی اختلاف معناداری وجود نداشت.

جدول ۲- مقایسه ویژگی‌های شیمیایی آرد گندم و آرد گندم سیاه مصرفی در تهیه فرمولاسیون بیسکویت

بررسی ویژگی‌های شیمیایی بیسکویت فاقد گلوتن حاوی سطوح مختلف آنزیم و گندم سیاه

میزان رطوبت در نمونه‌های بیسکویت

جدول ۳، ویژگی‌های شیمیایی بیسکویت طی جایگزینی آرد گندم با آرد گندم سیاه و آنزیم ترانس گلوتامیناز را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مقایسه میانگین بین تیمارهای مختلف حاکی از معناداری میزان رطوبت در سطوح مختلف آرد گندم سیاه و آنزیم ترانس گلوتامیناز جایگزین شده در سطح مورد بررسی بود ($p<۰/۰۵$). با افزایش سطوح آرد گندم سیاه و آنزیم گلوتامیناز در سطح احتمال ۹۵ درصد میزان رطوبت، روند کاهشی داشت ($p<۰/۰۵$)؛ بالاترین میزان رطوبت به نمونه شاهد تعلق داشت.

تغییرات pH نمونه‌های بیسکویت

با توجه به جدول ۳، تاثیر سطوح مختلف گندم سیاه و آنزیم در سطح مورد بررسی معنا دار نگردید ($p>۰/۰۵$).

خاکستر نمونه‌های بیسکویت

همان‌طور که در جدول ۳، نشان داده شده است متغیرهای مستقل آنزیم ترانس گلوتامیناز و آردگندم سیاه تاثیر معنا داری بر روند تغییرات خاکستر داشتند ($p<۰/۰۵$). به‌طوری‌که با افزایش غظت از صفر تا ۶۰ گرم آرد گندم سیاه جایگزین شده با آرد گندم، بر میزان خاکستر افزوده شد و همچنین با افزایش سطح آنزیم نیز بر میزان خاکستر نمونه‌های مورد بررسی افزوده شد و در این میان کمترین و بیشترین میزان خاکستر به ترتیب به نمونه شاهد و نمونه حاوی۶۰ گرم آرد گندم سیاه به همراه ۰/۳ گرم آنزیم بود (۰/۵۴۵ و ۱/۵۲۲درصد).

میزان پروتئین نمونه‌های بیسکویت

همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می شود، افزودن سطوح مختلف ترکیبات بر میزان پروتئین نمونه های مورد بررسی معنی دار گردید ($p<۰/۰۵$). بین کلیه ی نمونه های مورد بررسی با یکدیگر و نمونه شاهد اختلاف آماری معنا داری وجود داشت. ($p<۰/۰۵$). همان طوری که ملاحظه می‌گردد با افزایش سطوح آرد گندم سیاه به همراه آنزیم بر میزان پروتئین نمونه ها افزوده شد ($p<۰/۰۵$) و در بین نمونه ها کمترین و بیشترین میزان پروتئین به ترتیب به نمونه شاهد و نمونه حاوی۶۰ گرم آرد گندم سیاه به همراه۰/۳ گرم آنزیم تعلق داشت (به ترتیب ۸/۰۸ و ۱۱/۷۹ درصد).

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های شیمیایی آرد گندم و آرد گندم سیاه مصرفی در تهیه فرمولاسیون بیسکویت

فاکتورهای شیمیایی / نمونه آرد	فیبرخام	پروتئین	چربی	خاکستر	کربوهیدرات قابل هضم	pH
آرد گندم	۲/۱۸±۰/۰۳^{a}	۱۱/۵۰±۰/۱۱^{a}	۱/۶۸±۰/۰۱^{a}	۱/۸۰±۰/۰۰۳^{a}	۷۳/۸۴±۰/۳۸^{ab}	۶/۳۰±۰/۰۸^{b}
آرد گندم سیاه	۳/۱۷±۰/۰۴^{b}	۱۴/۱۰±۰/۲۴^{b}	۴/۱۰±۰/۰۴^{b}	۲/۲۰±۰/۰۸^{ab}	۷۰/۹۳±۰/۳۸^{a}	۵/۸۶±۰/۰۳^{a}

± انحراف حاصل از معیار

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح مورد بررسی ($p<۰/۰۵$)

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

میزان چربی نمونه‌های بیسکویت

نظر به اینکه میزان چربی در نمونه آرد مصرفی نسبت به آرد گندم بالاتر و در حدود ۴/۱۰درصد محاسبه گردید (جدول۲)، بنابراین همین عامل در افزایش میزان چربی در نمونه بیسکویت تاثیر گذار می باشد و بر این اساس با توجه به جدول ۳، میزان چربی در نمونه‌های بیسکویت با افزایش درصد آرد گندم سیاه افزایش معنا داری پیدا کرد (p<۰/۰۵)، به طوری که نمونه شاهد کمترین و نمونه ۶۰ گرم آرد گندم سیاه بالاترین میزان چربی را به خود اختصاص داد.

میزان فعالیت آبی نمونه‌های بیسکویت

نتایج جدول ۳ نشان داد که افزودن سطوح مختلف آرد گندم سیاه و آنزیم بر میزان فعالیت آبی در سطح مورد بررسی تاثیر معنی داری داشت (p<۰/۰۵). با توجه به جدول مقایسه میانگین بین تیمارهای مورد بررسی (جدول۳)، با افزایش سطوح جایگزینی آرد گندم سیاه و افزودن آنزیم، میزان فعالیت آبی در نمونه‌ها کاهش یافت (p<۰/۰۵).

میزان سفتی بافت بیسکویت حاوی سطوح مختلف آنزیم و گندم سیاه

پارامتر سفتی عنوان اصلی‌ترین شاخص بافت به عنوان معیاری از ماتریکس ساختاری شناخته می‌شود، مقاومت مغز بیسکویت در برابر تغییر شکل، ویژگی بافتی است که به عنوان سفتی یا سختی شناخته می‌شود و عامل مهمی در محصولات نانوایی است زیرا با درک مصرف‌کنندگان از تازگی بیسکویت مرتبط است. (۲۶، ۲۵).

با توجه به جدول ۴، با افزایش درصد آرد گندم سیاه و آنزیم بر میزان سفتی بافت بیسکویت‌های تولیدی (برحسب گرم) افزوده شد که این افزایش در سطح مورد بررسی معنی‌دار گردید (p<۰/۰۵).

جدول ۳. تأثیر سطوح مختلف آنزیم ترانس گلوتامیناز و جایگزینی آرد گندم سیاه بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه‌های بیسکویت

تیمارهای موردبررسی	رطوبت(٪)	pH	خاکستر(٪)	پروتئین(٪)	چربی(٪)	فعالیت آبی
شاهد	۵/۰±۴۷/۰۳^{ef}	۶/۰±۲۴/۱۲^{ab}	۰/۰±۵۴۵/۷^{a}	۸/۰±۰۸/۸۲^{c}	۱۲/۰±۸۷/۴۸^{c}	۰/۰±۶۵/۰۸^{c}
گندم سیاه۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۱٪	۵/۰±۰۴/۳^{e}	۶/۰±۱۳/۵^{ab}	۱/۰±۰۳/۴۶^{b}	۹/۰±۲۳/۷^{ab}	۱۰/۰±۸۶/۷^{ab}	۰/۰±۶۱/۰۳^{c}
گندم سیاه۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۲٪	۴/۰±۷۱/۰۴^{cd}	۶/۰±۱۷/۵^{ab}	۱/۰±۳۰۴/۶۲^{c}	۹/۰±۶۹/۹۵^{ab}	۱۲/۰±۵۶/۲۵^{ab}	۰/۰±۵۷/۰۵^{bc}
گندم سیاه۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۳٪	۴/۰±۶۰/۴^{c}	۶/۰±۱۵/۴^{ab}	۱/۰±۳۲۹/۰۲^{cd}	۹/۰±۹۱/۰۴^{ab}	۱۳/۰±۶۱/۳۴^{ab}	۰/۰±۶۰/۰۴^{c}
گندم سیاه۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۱٪	۵/۰±۳۰/۱۴^{e}	۶/۰±۰۷/۰۹^{a}	۱/۰±۳۰۹/۲^{c}	۱۰/۰±۵۳/۹^{ab}	۱۳/۰±۵۴/۰۶^{ab}	۰/۰±۵۳/۰۶^{b}
گندم سیاه۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۱٪	۵/۰±۰۰/۰۲^{e}	۶/۰±۱۸/۰۱^{ab}	۱/۰±۴۵/۳۲^{d}	۱۰/۰±۸۳/۸۱^{ab}	۱۳/۰±۴۸/۸^{ab}	۰/۰±۴۷/۰۱^{a}
گندم سیاه۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۱٪	۴/۰±۸۹/۱۲^{d}	۶/۰±۵۶/۰۸^{b}	۱/۰±۵۱۹/۴۱^{de}	۱۱/۰±۰۲/۳^{b}	۱۳/۰±۶۸/۳^{b}	۰/۰±۵۰/۳^{b}
گندم سیاه۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۱٪	۴/۰±۱۴/۰۶^{ab}	۶/۰±۲۹/۱^{ab}	۱/۰±۴۶۶/۷^{d}	۱۰/۰±۹۹/۱۱^{ab}	۱۳/۰±۸۴/۳۴^{ab}	۰/۰±۵۸/۳۴^{b}
گندم سیاه۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۲٪	۴/۰±۱۱/۰۵^{ab}	۶/۰±۳۱/۱۴^{ab}	۱/۰±۴۹۶/۷^{d}	۱۱/۰±۵۱/۵^{b}	۱۴/۰±۶۱/۵^{b}	۰/۰±۵۲/۵^{b}
گندم سیاه۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۳٪	۴/۰±۰۲/۰۲^{a}	۶/۰±۵۱/۰۷^{b}	۱/۰±۵۲۸/۷^{de}	۱۱/۰±۸۷/۷^{b}	۱۴/۰±۸۱/۲۷^{b}	۰/۰±۴۲/۰۱^{a}

± انحراف حاصل از معیار

حروف بالانویس متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح موردبررسی است (p<۰/۰۵)

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

جدول ۴. تأثیر سطوح مختلف آنزیم ترانس گلوتامیناز و جایگزینی آرد گندم سیاه بر ویژگی‌های بافتی نمونه‌های بیسکویت

تیمارهای موردبررسی	سفتی(g)
شاهد	۳۴۸۴/۲۰±۰۰/۰۳^{gh}
گندم سیاه ۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۱۳۴۷/۱۱±۸۱/۳^{a}
گندم سیاه ۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۲٪	۱۸۱۱/۱۷±۰۰/۰۴^{c}
گندم سیاه ۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۳٪	۲۲۴۶/۱۰±۰۰/۴^{e}
گندم سیاه ۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۱۵۶۶/۸±۳۰/۱۴^{b}
گندم سیاه ۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۲۱۰۳/۶±۶۶/۱۲^{de}
گندم سیاه ۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۳۱۱۰/۳۷±۱۹/۱۲^{d}
گندم سیاه ۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۱۹۸۱/۱۷±۱۶/۰۶^{d}
گندم سیاه ۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۲٪	۲۷۸۱/۳۲±۱۱/۰۵^{f}
گندم سیاه ۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۳٪	۳۳۵۵/۱۹±۲۲/۴۷^{g}

± انحراف حاصل از معیار

حروف بالانویس متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح موردبررسی است ($p<0/05$)

میزان رنگ بیسکویت حاوی سطوح مختلف آنزیم و گندم سیاه

میزان روشنایی (L*) در بیسکویت

هر قدر میزان L* بیشتر باشد نشان‌دهنده روشن‌تر بودن رنگ محصول می‌باشد. جدول ۵ نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان تغییرات شاخص‌های رنگی در بیسکویت حاوی آرد گندم سیاه به همراه آنزیم را نشان می‌دهد ($p <0/05$).

میزان زردی (b*) در بیسکویت

شاخص b* نشان‌دهنده رنگ آبی تا زرد می‌باشد و ازلحاظ عددی در محدودی ۱۲۰- (آبی مطلق) تا ۱۲۰+ (زرد مطلق) است. با توجه به جدول ۵ بیشترین میزان زردی مربوط به نمونه شاهد (۳۶/۴۶) و کمترین میزان آن مربوط به نمونه حاوی ۶۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۳٪ آنزیم (۲۰/۸۸) بود؛ بنابراین با توجه به جدول ۵ می‌توان بیان کرد که بین تیمارهای حاوی سطوح بالاتر آرد گندم سیاه به همراه آنزیم با نمونه شاهد اختلاف آماری معناداری در سطح موردبررسی وجود داشت؛ اما بین نمونه‌های حاوی سطوح مختلف آرد گندم سیاه به همراه آنزیم ترانس گلوتامیناز اختلاف آماری معنا داری بین سطوح مورد بررسی دیده نشد.

میزان قرمزی (a*) در بیسکویت

شاخص a* بیانگر سبزی تا قرمزی است و ازلحاظ عددی در بازه‌ی ۱۲۰- (سبزی مطلق) الی ۱۲۰ (قرمز مطلق) است. نتایج حاصل از بررسی میزان قرمزی تیمارهای موردبررسی حاکی از آن بود که افزودن سطوح مختلف آرد آرد گندم سیاه به همراه آنزیم بر میزان قرمزی معنادار گردید ($p<0/05$). به‌طوری‌که با افزایش سطح آرد گندم سیاه و آنزیم بر میزان قرمزی نمونه‌ها افزوده شد($p<0/05$).

با توجه به جدول ۵، نمونه شاهد کمترین میزان قرمزی (۴/۷۹) و نمونه حاوی ۶۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۳٪ آنزیم، بالاترین میزان قرمزی را دارا بود (۱۴/۲۸)؛ که احتمالاً دلیل این افزایش را بتوان به واکنش مایلارد نسبت داد چراکه در تهیه محصولات پخت انجام واکنش مایلارد به میزان رطوبت، دما و نوع قند مصرفی بستگی دارد (۲۷).

جدول ۵. تأثیر سطوح مختلف آنزیم ترانس گلوتامیناز و جایگزینی آرد گندم سیاه بر ویژگی‌های رنگی نمونه‌های بیسکویت

تیمارهای موردبررسی	L*	b*	a*
شاهد	۷۷/۰±۶۶/۸^{d}	۳۶/۱±۴۶/۱۲^{c}	۴/۱±۷۹/۰۲^{a}
گندم سیاه ۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۵۳/۲±۶۲/۸^{c}	۲۲/۱±۶۹/۲^{b}	۱۲/۰±۸۶/۴۲^{b}
گندم سیاه ۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۲٪	۵۵/۲±۵۵/۶^{b}	۲۲/۰±۱۱/۹۵^{a}	۱۲/۱±۹۲/۲۲^{c}
گندم سیاه ۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۳٪	۵۹/۲±۷۶/۹^{a}	۱۹/۳±۷۹/۵۴^{a}	۱۳/۱±۹۶/۲^{c}
گندم سیاه ۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۵۴/۲±۶۲/۸^{c}	۲۲/۱±۷۴/۱۹^{ab}	۱۳/۰±۳۵/۳۲^{b}
گندم سیاه ۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۵۶/۲±۵۵/۶^{b}	۲۲/۰±۳۰/۷۱^{ab}	۱۳/۰±۵۸/۵۱^{c}
گندم سیاه ۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۶۲/۲±۷۶/۹^{a}	۲۱/۰±۷۶/۴۵^{ab}	۱۳/۰±۷۹/۷۶^{cd}
گندم سیاه ۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۱٪	۵۱/۰±۰۶/۸۶^{b}	۲۳/۱±۵۰/۳۱^{ab}	۱۳/۰±۴۹/۵۵^{c}
گندم سیاه ۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۲٪	۵۳/۰±۹۰/۷۳^{ab}	۲۱/۳±۰۰/۰۴^{ab}	۱۴/۰±۰۰/۹^{d}
گندم سیاه ۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز ۰/۳٪	۵۶/۱±۴۷/۸^{ab}	۲۰/۱±۸۸/۲۴^{ab}	۱۴/۰±۲۸/۳۱^{e}

± انحراف حاصل از معیار

حروف بالانویس متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح موردبررسی است ($p<0/05$)

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

خصوصیات حسی بیسکویت حاوی آرد گندم سیاه و آنزیم ترانس گلوتامیناز

با توجه به جدول۶، مشخص گردید که نمونه شاهد (نمونه حاوی ۱۰۰٪ آرد گندم) بالاترین امتیاز را به لحاظ بررسی ویژگی‌های حسی به خود اختصاص داده است (۴/۷)؛ که احتمالاً دلیل آن را می‌توان به تولید ترکیبات مولد عطروطعم ناشی از واکنش مایلارد و تولید ملانوئیدین و بتالائین نسبت داد (۲۸).

نتایج امتیاز شاخص حسی طعم نمونه‌های بیسکویت حاکی از آن بود که با افزایش سطح آرد گندم سیاه و آنزیم ، میزان عطر و آروما نمونه کاسته شد، به‌طوری‌که بعد از نمونه شاهد (۴/۷)، نمونه حاوی ۳۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۳٪ آنزیم، کمترین امتیاز را به دلیل شاخص عطر و طعم به خود اختصاص داد (۲/۹۲).

جدول ۶. تأثیر سطوح مختلف آنزیم ترانس گلوتامیناز و جایگزینی آرد گندم سیاه بر ویژگی‌های حسی نمونه‌های بیسکویت

تیمارهای مورد بررسی	عطروطعم	آروما	رنگ	بافت	پذیرش کلی
شاهد	۴/۰±۷/۰۶^{f}	۴/۰±۵۳/۱۲^{f}	۴/۰±۳۰/۰۲^{e}	۴/۰±۶۲/۸۲^{e}	۴/۰±۸۷/۸۸^{e}
گندم سیاه۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۱٪	۳/۰±۷۰/۸^{d}	۳/۰±۶۰/۲۲^{d}	۳/۰±۳۵/۴۶^{b}	۳/۰±۱۰/۷^{ab}	۳/۰±۷۰/۷^{c}
گندم سیاه۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۲٪	۳/۰±۵۰/۶^{cd}	۳/۰±۲۷/۹۵^{b}	۳/۰±۲۵/۶۲^{ab}	۳/۰±۲۰/۹۵^{b}	۳/۰±۷۰/۲۵^{c}
گندم سیاه۴۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۳٪	۳/۰±۰۰/۹^{a}	۳/۰±۰۰/۵۴^{a}	۳/۰±۱۵/۲^{ab}	۳/۰±۲۷/۰۴^{b}	۳/۰±۲۵/۳۴^{ab}
گندم سیاه۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۱٪	۴/۰±۰۷/۱۲^{e}	۳/۰±۶۲/۱۹^{d}	۳/۰±۶۰/۳۲^{c}	۴/۰±۰۰/۹^{d}	۳/۰±۸۰/۰۶^{cd}
گندم سیاه۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۱٪	۳/۰±۸۶/۰۸^{de}	۴/۰±۱۷/۵۱^{fe}	۳/۰±۷۵/۴۱^{d}	۳/۰±۷۲/۸۱^{cd}	۴/۰±۰۰/۸^{d}
گندم سیاه۵۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۱٪	۳/۰±۴۵/۰۷^{cd}	۴/۰±۰۰/۴۵^{e}	۳/۰±۷۵/۷^{d}	۳/۰±۶۲/۳^{c}	۴/۰±۱۸/۳^{d}
گندم سیاه۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۱٪	۳/۰±۳/۰۶^{c}	۳/۰±۴۵/۳۱^{c}	۳/۰±۲۵/۰۵^{ab}	۳/۰±۲/۰۱^{b}	۳/۰±۵۰/۳۴^{b}
گندم سیاه۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۲٪	۳/۰±۱۰/۳^{b}	۳/۰±۰۲/۰۴^{a}	۳/۰±۱۷/۸^{ab}	۳/۰±۰۰/۵^{ab}	۳/۰±۲۰/۵^{ab}
گندم سیاه۶۰٪ + آنزیمترانس گلوتامیناز۰/۳٪	۳/۰±۰۲/۳^{a}	۳/۰±۰۰/۰۷^{a}	۳/۰±۰۰/۷^{a}	۲/۰±۸۷/۷^{a}	۳/۰±۱۲/۲۷^{a}

± انحراف حاصل از معیار

حروف بالانویس متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار در سطح موردبررسی است ($p<0/05$)

• بحث

با توجه به مطالعات انجام گرفته بر روی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آرد گندم سیاه، این آرد دارای میزان پروتئین بالایی می‌باشد و از آن به عنوان افزودن ارزش غذایی و کیفیت تغذیه‌ای یاد می‌کنند (۳۱-۲۹).

مطالعات نشان داده است که محتوای پروتئین آرد گندم سیاه سرشار از آلبومین و گلوبولین می‌باشد، اما میزان پرولامین و گلوتلین کمتری نسبت به آرد گندم دارد، در پروتئین گندم سیاه، میزان لیزین تقریباً دو برابر پروتئین گندم است و درصد سایر اسیدهای آمینه ضروری بیشتر یا نزدیک به پروتئین گندم است. پروتئین گندم سیاه دارای ارزش بیولوژیکی بالایی بوده که ناشی از تعادل ترکیب آمینو اسیدهای آن می‌باشد (۳۲).

میزان خاکستر در نمونه آرد گندم سیاه (گندم سیاه) نسبت به آرد گندم بالاتر بود؛ این ممکن است به محتوای مواد معدنی محصول و همچنین حضور عناصر حیاتی مانند روی، مس، منگنزو سلنیوم نسبت داده شود که به لحاظ حضور فیبرهای رژیمی موجود در آن، منبع بسیار عالی بویژه برای بیماران سلیاکی است (۳۳).

فرهادی و همکاران (۳۳)، بیان داشتند محتویات چربی موجود در آرد گندم سیاه به دلیل حضور اسیدهای چربی غیر اشباع بویژه از گروه اسید لینولئیک و لینولنیک (۴۰٪) از لحاظ حضور اسیدهای چرب نسبت به سایر غلات و شبه غلات پیشتاز است.

با توجه به جدول ۳، و با توجه به سایر گزارشات با افزایش میزان آرد گندم سیاه انتظار می‌رفت که میزان رطوبت به دلیل افزایش فیبر و پروتئین کاهش یابد؛ که این اتفاق در نمونه‌هایی با میزان آرد گندم سیاه بالاتر دور از انتظار نبود، همچنین به دلیل استفاده از آنزیم گلوتامیناز، که به عنوان یک آنزیم ترانسفراز می‌باشد و بین اسید آمینه‌ی گلوتامین از یک پروتئین و لایزین از پروتئین دیگر اتصالات عرضی برقرار کرده و همچنین از طریق برقراری پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی با پروتئین و فیبر موجود در آرد گندم و گندم سیاه (برقراری پیوند بین

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

اسید آمینه لایزین و گلوتامین) موجود و سایر ترکیبات موجود در فرمولاسیون، میزان رطوبت موجود در ترکیب نهایی کاهش یافته است و بنابراین در نمونه‌های دارای درصد بالای گندم سیاه و آنزیم به دلیل جذب رطوبت توسط فیبر و پروتئین موجود بر میزان رطوبت موجود در محیط غلبه کرده است.

میزان رطوبت نهایی محصول رابطه‌ی مستقیمی با وزن مولکولی، نوع عوامل آب‌گریز و آب‌دوست، تعداد پیوندهای موجود بین ترکیبات دارد. بنابراین برقراری پیوندهای عرضی از نوع کووالانسی و هیدروژنی درون و برون مولکولی بین اسیدهای آمینه گلوتامین و لایزین منجر به تشکیل پروتئین‌هایی با وزن مولکولی بالا گردید و می تواند به طور موثری ظرفیت نگهداری آب را افزایش دهد و این مورد دور از انتظار نبود اما به دلیل بکار بردن همزمان آرد گندم سیاه در سطوح ۴۰-۶۰ گرم احتمالا به دلیل پروتئین و فیبر بالای آرد نسبت به آرد گندم به دلیل برقراری پیوندهای کووالانسی درون مولکولی، منجر به محبوس شدن آب (رطوبت) در درون مولکول گردیده و از این رو احتمال می‌رود که این عامل منجر به کاهش میزان رطوبت گردیده است. قابل ذکر است که به دلیل عدم حضور شبکه گلوتنی قوی و مناسب در آرد گندم سیاه، بنابراین از توانایی کمتری جهت تشکیل ساختمان سه بعدی و در نهایت از ظرفیت پایین تری جهت نگهداری آب برخوردار است، پس دور از انتظار نخواهد بود که با افزایش میزان درصد آرد گندم سیاه، از میزان رطوبت نمونه ها کاسته شد. بنابراین در طول پخت سرعت خروج رطوبت از سطح بیسکویت بیشتر خواهد بود و در نهایت رطوبت نهایی محصول کمتر خواهد شد. از سوی دیگر فرایند پخت در دمای بالاتر از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نیز به دلیل خروج رطوبت به سطح محصول نیز می تواند در کاهش میزان رطوبت نقش داشته باشد.

پدرو و همکاران (۳۴) در بررسی تاثیر خمیر ترش و ترانس گلوتامیناز بر کیفیت نان گندم سیاه بدون گلوتن به نتایج مشابهی دست یافتند و مشخص شد که آنزیم میزان رطوبت را کاهش می‌دهد.

افزایش میزان خاکستر کل در نمونه بیسکویت احتمالا به مواد اولیه‌ی مصرفی بستگی داشته باشد؛ چرا که آرد گندم سیاه به علت حضور مواد معدنی بالا حاوی میزان خاکستر بالایی می‌باشد. از سوی دیگر حضور یون کلسیم در آنزیم به نظر می‌رسد که افزایش غلظت آن نیز منجر به افزایش خاکستر نمونه‌ها گردیده است (۳۵). از طرف دیگر تاثیر مواد معدنی موجود در سایر ترکیبات فرمولاسیون بیسکویت نیز بر افزایش خاکستر دور از انتظار نبود.

ناصری و همکاران (۳۶) بررسی آنزیم ترانس گلوتامیناز و فراصوت دهی بر خصوصیات کیفی نان پرداختند و توتونکو و کنور (۳۷)، بیان کردند شبه غلاتی مانند آمارانت، کینوا و گندم سیاه غنی از مواد معدنی هستند و افزودن آنها به فرمولاسیون غذایی منجر به افزایش خاکستر در آن‌ها می گردد؛ صابری و همکاران (۳۸) نیز در بررسی سه نوع شبه غله کینوا، چیا و گندم سیاه بیان داشتند که میزان خاکستر گندم سیاه نسبت به نمونه شاهد در قاووت بیشتر بود؛ که با نتایج این بررسی هم‌خوانی داشت.

افزایش میزان پروتئین در بیسکویت را می توان به بالابودن میزان پروتئین آرد گندم سیاه نسبت داد و همچنین به دلیل اینکه آنزیم مصرفی پیوندهای درون و برون مولکولی با اتصالات عرضی برقرار می کند که می‌تواند بر تشکیل پیوند های آمیناسیون در بین ترکیبات مصرفی دخالت داشته و به ایجاد شبکه‌ی پروتئینی قوی‌تری منجر شود و از این طریق باعث افزایش پروتئین نهایی محصول می گردد.

احتمالا دلیل افزایش چربی را بتوان به گروه‌های کربونیکی و کربوکسیلی آزاد در محیط نسبت داد که در طی فرمولاسیون با آنزیم ترکیب گشته (تغییر حالت کنفورماسیونی) و به دلیل فعل و انفعالات درون مولکولی منجر به افزایش چربی نهایی گردیده است و از سوی دیگر حضور چربی بالاتر در آرد گندم سیاه در این تغییرات تاثیر گذار باشد و این احتمالاً به دلیل توانایی حفظ روغن در آرد گندم سیاه در طول فرآیند پخت بود. این نتایج با گزارشات بالجیت و همکاران (۳۹) هم خوانی داشت.

ترکیبات کامپوزیت، تجمعاتی با تعداد بیشتری از مکان‌های آبدوست موجود تشکیل می‌دهند که برای آب آزاد محدود در خمیر بیسکویت رقابت می‌کنند و از این طریق از میزان فعالیت آبی کاسته شد (۴۰). تغییرات اندک رطوبت در بیسکویت می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر فعالیت‌های آبی داشته باشد و

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

برای ایمنی محصول با این فرمولاسیون، رطوبت نهایی بیسکویت‌ها باید کمتر از ۵٪ باشد (۴۰). از آنجا که رطوبت بیسکویت‌ها بر سختی آنها تأثیر می‌گذارد، ممکن است افزودن برخی ترکیبات که قادر به کاهش فعالیت آبی حتی در محتوای آب بالاتر هستند، ضروری باشد(۴۰).

ظرفیت جذب آب آرد گندم سیاه به طور قابل توجهی کمتر از آرد گندم است و آرد گندم سیاه به دلیل وجود اجزای آبدوست کمتر، فعالیت آبی کمتری نسبت به آرد گندم دارد (۴۱).

نظر به اینکه میزان فعالیت آبی به ترکیبات تشکیل دهنده محصول بستگی دارد و یک رابطه خطی بین ترکیبات وجود دارد بنابراین حضور پروتئین و چربی بالا به دلیل جذب آب بیشتر و استفاده از آنزیم گلوتامیناز به دلیل تشکیل شبکه پروتئینی می تواند بر روی میزان فعالیت آبی تاثیر گذار باشد و از سویی کاهش مقدار a_w با افزایش دمای پخت، برای برخی از مواد با وزن مولکولی پایین مانند شکر یا نمک کریستالی یا غذاهای حاوی مقادیر زیادی مواد محلول (مانند میوه‌های خشک) معمول است (۴۲). حاجی بکلو و همکاران (۴۳) در بررسی کاربرد شیره خرما و آنزیم ترانس گلوتامیناز بر خصوصیات کیفی بیسکویت بیان داشتند که با افزایش درصد شیره خرما و آنزیم از میزان فعالیت آبی کاسته شد که با نتایج این مطالعه هم راستا بود.

افزایش سفتی بافت بیسکویت با افزایش درصد آرد گندم سیاه (گندم سیاه) را بتوان به خاصیت درصد پروتئین و فیبر بالای موجود در آن نسبت داد. نظر به اینکه سفتی بافت تا حدودی تحت تأثیر قابلیت برقراری پیوند بین آب و سایر ترکیبات موجود می‌باشد (۴۴)، پس می‌توان بیان کرد که عدم حضور شبکه گلوتنی آرد گندم سیاه جایگزین شده با آرد گندم، موجب آن شده که توسعه شبکه گلوتنی در نمونه‌های مورد بررسی محدود شود و گروه‌های پروتئینی و فیبری به برقراری پیوندهای قوی هیدروژنی و کووالانسی (ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های آمید-هیدروکسیل و هیدروکسیل-کربونیل و سایر گروه‌های قطبی موجود در اجزای تشکیل دهنده بیسکویت) می‌پردازند، لذا منجر به سفت شدن بافت می‌گردد. تفاوت در میزان رطوبت خمیر می‌تواند بر میزان سفتی بافت نهایی بیسکویت تأثیرگذار باشد. هنگامی که آرد گندم سیاه جایگزین آرد گندم گردید؛ احتمالاً میزان جذب آب افزایش می‌یابد و این امر منجر به افزایش میزان رطوبت خمیر می‌گردد و در نهایت طی فرایند پخت مقداری از رطوبت از سطح نمونه خارج شده و منجر به سفت‌تر شدن بافت می‌شود (۴۵). همچنین با افزایش میزان پروتئین فرمول بیسکویت به دلیل وجود آرد گندم سیاه، حباب‌های کوچک‌تر و فشرده‌تری در ساختار خمیر ایجاد شود و در مقابل گاز تورم نامناسب ایجاد شود و در نتیجه باعث سختی بیسکویت شود. از سوی دیگر حضور آنزیم نیز به دلیل ایجاد اتصالات عرضی منجر به افزایش سفتی بافت گردید. آنزیم از طریق تشکیل شبکه پروتئینی به برقراری پیوندهای عرضی قوی پرداخته و مانع از باز شدن شبکه در طول وارد آمدن نیرو شده و سفتی بافت نهایی افزایش می‌یابد (۴۶). از سوی دیگر استفاده از آنزیم ترانس گلوتامیناز به دلیل ایجاد ترکیبات با وزن مولکولی بالا توانسته منجر به سفتی بافت محصول نهایی گردد (۴۷). در اثر حرارت ساختار آمیلوز به ساختار مارپیچی (هلیکس) تغییر ماهیت می‌دهد. کمپلکس‌های شکل گرفته با ایجاد ممانعت فضایی منجر به عدم شکل‌گیری اتصالات میان ساختاری و در نتیجه توسعه سفتی در فراورده پخت می‌شود. در تایید این نتایج، رومی و همکاران (۸) و ناصری و همکاران (۳۶) نشان دادند که آنزیم ترانس گلوتامیناز تاثیر مثبتی بر بافت نمونه‌ها دارد.

تغییرات رنگ بیسکویت و سایر محصولات نانوایی در طی پخت ناشی از واکنش مایلارد یا واکنش‌های غیر آنزیمی می‌باشد. این واکنش در اکثر موارد نامطلوب بوده و علاوه بر ایجاد ظاهر نامطلوب در مواد غذایی، سبب کاهش ارزش غذایی پروتئینی بویژه لایزین هم می‌شود؛ طی فعل و انفعالات شیمیایی لایزین موجود در کمپلکس پروتئینی و در طی واکنش مایلارد در این مطالعه این اسید آمینه دست‌خوش تغییرات بیوشیمیایی گردیده که در طی آن از میزان روشنایی و زردی نمونه‌ها کاسته شده است. بنابراین با افزایش سطوح جایگزینی رنگ نمونه‌ها تیره‌تر گردید و از سوی دیگر افزایش حضور رنگدانه بیشتر در محصول نهایی بر میزان رنگ تیره نمونه‌ها افزوده گردید. مطابق نتایج محققان، شاخص*a دارای بالاترین میزان رنگ و مسبب ظهور رنگ قرمز تیره در فرآورده نهایی

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

گردید و با توجه به تجمع رنگدانه ها و سفتی بافت این شاخص افزایش یافت؛ اگر چه که حضور آنزیم منجر به کاهش این شاخص می‌گردد اما به دلیل حضور رنگدانه‌ها و انجام واکنش مایلارد این شاخص روند افزایشی داشت. حقایق (۴۸) در بررسی خود بیان داشت که با افزایش آرد آمارانت و گندم سیاه شاخص *a در پوسته نان روند افزایشی داشت.

در بررسی کاربرد آرد چیا بر خصوصیات کیفی نان بدون گلوتن بیان گردید که با افزایش درصد آرد چیا در فرمولاسیون، میزان طعم مورد پسند از نظر ارزیاب ها کاسته شد که با نتایج این بررسی هم خوانی داشت (۳۳).

در بین ارزیاب‌های حسی، ازنظر آروما نمونه‌های نمونه حاوی ۵۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۳٪ آنزیم، و نمونه حاوی ۵۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۲٪ آنزیم، حتی نسبت به شاهد نمره‌ی بالاتری دریافت کردند (۴ و ۳/۷) که احتمالاً به دلیل برقراری باندهای هیدروکسیلی و هیدروفوبیک و تشکیل حلقه‌های آروماتیکی تولید کننده عطروطعم باشد. همچنین می توان علت این امر را به عطروطعم خاص آرد حاصل از گندم سیاه نسبت داد که این ویژگی عطروطعم خاص، برای ارزیاب‌ها مطلوب بود.

ازنظر بافت بعد از نمونه شاهد که بالاترین میزان مطلوبیت بافت را به خود اختصاص داد، نمونه حاوی ۵۰٪ آرد گندم سیاه جایگزین شده و به همراه۰/۲٪ آنزیم، نمونه حاوی ۵۰٪ آرد ۰/۳٪ آنزیم، بالاترین میزان مطلوبیت بافت را داشتند که ازنظر ارزیاب‌ها به نمونه شاهد نزدیک‌تر بودند، که این پذیرش را بتوان به میزان چربی موجود در آرد گندم سیاه نسبت داد چرا که در سطوح بالاتر آرد مصرفی، به دلیل حضور چربی بیشتر بافت چندان مورد پذیرش ارزیاب ها نبود و در سطوح کمتر میزان چربی چندان چشم گیر نبود؛ که ارزیاب‌ها اکثر نمونه‌ها را به لحاظ پذیرش رنگ مورد مقبولیت خود قراردادند و بیان داشتند رنگ کلیه‌ی تیمارها از یک حد مطلوب و موردپسند قرارگرفته است.

ازنظر پذیرش کلی نمونه‌های حاوی ۵۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۲ و ۰/۳ ٪ آنزیم، نزدیکی بیشتری به نمونه شاهد داشتند و حتی ارزیاب‌ها بیان داشتند که نمونه‌های فوق قابلیت جایگزینی و حتی رقابت با نمونه‌های بیسکویت تجاری را دارد.

پور اسماعیل و همکاران (۴۹) بیان داشتند با افزایش سطح آنزیم ترانس گلوتامیناز مصرفی از میزان پذیرش نان کاسته شد.

نتیجه گیری نهایی

میزان ترکیبات شیمیایی آرد گندم و آرد گندم سیاه با یکدیگر مقایسه شد؛ میزان پروتئین، چربی، فیبرخام، خاکستر و pH در آرد حاصل از گندم سیاه (گندم سیاه) نسبت به آرد گندم بیشتر بود و بین میزان کربوهیدرات خام دو نمونه آرد مورد بررسی اختلاف معناداری وجود نداشت. در فرمولاسیون بیسکویت، با افزایش سطوح آرد گندم سیاه و آنزیم ترانس گلوتامیناز میزان رطوبت و فعالیت آبی روند کاهشی داشت. بررسی متغیرهای مستقل آنزیم ترانس گلوتامیناز و آردگندم سیاه تاثیر معنا داری بر روند تغییرات خاکستر، میزان پروتئین، میزان چربی نشان دادند. به‌طوری‌که با افزایش غظت از صفر تا ۶۰ درصد آرد گندم سیاه و آنزیم بر میزان ترکیبات فوق افزوده شد. میزان سفتی بافت بیسکویت‌های تولیدی افزوده شد. نمونه شاهد بالاترین میزان روشنایی را به خود اختصاص داد و دارای اختلاف معناداری با سایر تیمارها بود. در بین نمونه‌های حاوی آرد گندم سیاه، تیرگی رنگ و به عبارتی کاهش روشنایی دیده شد، اما با افزودن آنزیم به نمونه ها بر میزان شدت روشنایی نمونه ها افزوده شد. بنابراین با توجه به نتایج، نمونه‌ی حاوی ۵۰٪ آرد گندم سیاه در سطح ۰/۲٪ آنزیم ترانس گلوتامیناز را می‌توان به عنوان بهترین نمونه معرفی کرد و سپس نمونه حاوی ۵۰٪ آرد گندم سیاه به همراه ۰/۳٪ آنزیم ترانس گلوتامیناز قرار داشت؛ چراکه نمونه‌های فوق در بررسی کلیه‌ی فاکتورهای کیفی و حسی بالاترین امتیاز را به خود اختصاص دادند؛ بنابراین می‌توان از آرد گندم سیاه در سطوح بالا (تا ۵۰٪) در فرمولاسیون بیسکویت به‌منظور بهبود ویژگی‌های کیفی و جبران نواقص تغذیه‌ای و از همه مهم‌تر ایجاد جایگاه ویژه برای بیماران سیلیاکی استفاده کرد.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

• References

1. Edward A. *Biscuits and cookies: A global history*. 2019; Reaction Books.

2. Aletaha N, Pourshams A, and Shahbazkhani B. Celiac Disease. *Journal of Medical Council of I.R.I.*2007; 25(2): 213–224.

3. Rezaei R, Moghimi M, and Amiri Aghdaei S.S. Study of Physicochemical, Rheological and Sensory Characteristics of Rice and Corn flour-based Gluten Free Biscuit Containing Resistant Starch. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*. 2024; 16(2): 91-109.

4. Foschia M, Stefani H, Arendt E. K, and Zannini, E. Nutritional therapy: Facing the gap between celiac disease and gluten-free food. *International Journal of Food Microbiology*. 2016; 239: 113–124.

5. MoeiniA, Shafafi Zenoozian M, Karazhiyan H, Elhami Rad AH, and Pedram Nia A. Wheat Flour Substitution in Production of Reduced Gluten Pound Cake Using Millets. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2021;18 (120): 133-151.

6. Wronkowska M, Haros M, and Soral-Śmietana M. Effect of starch substitution by buckwheat flour on gluten-free bread quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2013; 6(7): 1820–1827.

7. Alvarez-Jubete L, Arendt E K, and Gallagher E. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science & Technology*. 2010; 21: 106-113.

8. Romeih E, and Walker G. Recent advances on microbial transglutaminase and dairy application. *Journal of Trends in food science and technology*. 2017; 62: 133-140.

9. Dubois B, Didier B, Aurelie L, Chiron H, and Bouvier J M. Effect of transglutaminase on gluten-free dough properties and final baked products. *Food Science & Technology*. 2020; 55(12): 3386–3394.

10. Eatemad M, Essam E S, Elsebaie M, Hozifa Sh A, Fawzi M, EL-Farsy A, EL-Mesiry O M, Abd-El-Fattah S, Elmeslamy H A, Shaaf Y, Shehata R, A-Ahmad M, Lofry A, and Ibrahim S S. Preparation and quality assessment of innovative gluten-free biscuit enriched with galangal (*Alpinia galanga* L.) powder. *Food Research*. 2025; 5(1): 100746.

11. Shuxian G, Hasmadi M, Ahmad Hazim A. Valorization of agriculture byproduct: Development of gluten-free biscuit made from blends of okara and jackfruit seed flour. *Wast management bulletin*. 2024; 2(2): 59-65.

12. Kohli D, Jain A, Singh D, and Kumar S. Gluten-free approach of biscuits preparation. *Agriculture and Food Research*. 2023; 14: 10683.

13. Akter H R, MD-Jahnal A, Abu Rreq M A, Mohammad A S, and Tasnim F. Physicochemical and structural impact of CMC hydrocolloids on the development of gluten-free foxtail millet biscuits. *Food Science and Nutrition*. 2023; 9(6): e1716.

14. Coronel B E, Guitro E N, Aspiroz M C, Tomas M C, Molasco S M, and Capitani M I. Development of gluten-free premixes with buckwheat and chia flours: Application in a bread product. *LWT*. 2020; 141: 110916.

15. Ghassemi A, Emam-Djomeh Z, Mahasti Shotorbani P, Jouki M., and Behmadi H. Production and evaluation of color, texture, functional and sensory characteristics of gluten-free enzyme modified Fermi pasta. *Food Processing and Preservation Journal*. 2024; 16 (2): 41-52

16. Shahsavani L, and Hosseinmardi F. Study on the Replacement of Rye Flour with Wheat Flour in Improving the Quality and Physicochemical Properties of White Noodle in the Presence of the Transglutaminase Enzyme. *Food Technology & Nutrition*. 2017; 17 (2): 23-30

17. Safavi N, and Gharekhani, M. The Effect of Sodium Caseinate and Microbial Transglutaminase Enzyme on Rheological, Physical and Sensorial Properties of Corn-based Gluten Free Bread. *Research and Innovation in Food Science and Technology*. 2019; 7(4): 365-376.

18. Saeidi Z, Nasehi B, and Jooyandeh H. Evaluation of Physical properties of gluten-free cake containing pomegranate seeds powder and transglutaminase enzyme. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2019; 15(84): 315-324.

19. Sudha ML, Vetrimani R, and Leelavathi K. Influence of fiber from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food Chemistry*. 2007; 100: 1365-1370.

20. AACC. 2000. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th Ed., Vol. 2. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.

21. AOAC. 2000. Association of Analytical Communities Official Method. Cd 43-991.

22. Zoulias EL, Piknis S, and Oreopoulou V. Effect of sugar replacement by polyols and acesulfame-K on properties of low-fat cookies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2000; 80: 2049-2056.

23. Galla N R, Pamidighantam P R, Karakala B, Gurusiddaiah M R, and Akula S. Nutritional, textual and sensory quality of biscuits supplemented with spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Gastronomy and Food Science*. 2017; 7: 20–26.

24. Oladzad Abbasabadi N, Karazhiyan H, and Keyhani V. Addition of the chubak extract and egg white on biophysical properties of grape juice during evaporation process, *Journal of Food Process Engineering*. 2017;40(5):12538.

25. Gharehbazadeh S M T, Chronakis I S, and Antoniou S. Novel applications of microbial transglutaminase in development of healthy gluten-free bakery products. *Food Chemistry*. 2021; 364: 130457.

26. Indrani D, and Venkateswara Ra G. Rheological characteristics of wheat flour dough as influenced by ingredients of parotta. *Journal of Food Engineering*. 2007; 79(1): 100–105.

27. Pathare P B, Opara U L, and Al-Said F A J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013; 6(1): 36–60.

28. Vatankhah M, Elhami Rad AH, Yaghbani M, Nadian N, and Akbarian Meymand MJ. Study of Possibility Low Calorie Biscuit Production by Using Stevioside Sweetener. *Journal of Research and Innovative in Food Science & Technology*. 2014; 3(2): 157-170.

29. Yilmaz HÖ, Ayhan NY, and Meriç ÇS. Buckwheat: a useful food and its effects on human health. *Current Nutrition Food Science*. 2020;16: 29-34.

30. Bhavsar GJ, Sawate A R, Kshirsagar RB, Vijaykumar M, and Chappalwar N. Studies on Physico-Chemical Characteristics of Buckwheat and Its Exploration in Bread

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

as Functional Food. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013;2(11):3971-3981.

31. Ninomiya K, Yamaguchi Y, Shinmachi F, Kumagai H, and Kumagai H. Suppression of postprandial blood glucose elevation by buckwheat (*Fagpopyrum esculentum*) albumin hydrolysate and identification of the peptide responsible to the function Food. *Science Human Wellness*. 2022; 11 (4):992-998.

32. Costantini L, Luksic L, Molinari R, Kreft I, Bonafaccia G, Manzi L, and Merendino N. Development of gluten free bread using tartary buckwheat and chia flour rich in flavonoids and omega- 3 fatty acids as ingredients. *Food Chemistry*. 2014;165: 232–240.

33. Farhadi A, Peighambardoust S H, and Alirezalu K. Effect of adding different levels of water on rheological, technological and sensory characteristics of corn starch gluten-free bread enriched with buckwheat flour. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2019;16(90): 127-139.

34. Pedro S, Jaymi P, Feleke A, Bascom N, and Karkle E. Characterization and functionality of fermented sorghum and enset flours in a gluten-free deposited biscuit. *Journal of Cereal Science*. 2025; 122: 101106.

35. Ahvazi B, Boeshans K M, Idler,W, Baxa U, and Steinert P M. Roles of calcium ions in the activation and activity of the transglutaminase 3 enzyme. *Journal of Biological Chemistry*. 2003; 278(26): 23834-23841.

36. Naseri H, Fadavi A, and Sayyed-Alangi S Z. (2023). Investigating the effect of Transglutaminase enzyme and Ultrasonication on the properties of Barbari bread containing soybean meal. *Journal of food science and technology (Iran)*.2023; 20(137): 35-48.

37. Teutonico RA, and Knorr D. Amaranth and quinoa: Composition, Properties, and Applications of a Rediscovered Food Crop. *Food Technology*. 1985;39(4): 49-61.

38. Saberi F, Khorasani S, and shahdadi F. The effect of buckwheat, chia and quinoa on the physicochemical and antioxidant properties of ghavoot. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2021; 18(112): 237-245.

39. Baljeet SY, Ritika BY, and Roshan LY. Studies on functional properties and incorporation of buckwheat Four for biscuit making. *International Food Research Journal*.2010; 17: 1067-1076.

40. Cheratoiu CM, Ognean M, Ognean CF, andDanciu I. Corn and Buckwheat flour in gluten free biscuits. *Journal of Eco Agritourism*. 2018;14(2):5-10.

41. Ray A, Singh D, Raisley John A. Development and quality analysis of buckwheat flour biscuits. *International journal of creative research thoughts*. 2022; 10(7):939-944.

42. Cervenka L, Brozkova I, and Vytrasova J. Effects of the principal ingredients of biscuits upon water activity. *Journal of Food and Nutrition Research*. 2006;45 (1):39-43.

43. Hajibaklo O, Mohtarami F, Ghaitaranpour A, and Esmaiili M. 2025. Optimizing gluten-free biscuit formulation using date syrup and date kernel powder. *Journal of Food Science and Technology*. 2025; 161(22): 198-212.

44. Talebi A, Mohtarami F, and Pirsa S. The Effect of Carrot Pomace Powder on Physicochemical,Textural and, Sensory Properties ofGluten Free Bread. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2019;16(86): 373-385.

45. Juddikiene G, Balinskiene L, Schleining G, and Kunigelis S. Texture analysis of cookies by acoustic method: A comparison to mechanical method. In *Food science* (pp. 434–438). 2004; Woodhead Publishing.

46. Poormohammadi K, Alami M, Shahedi M, and Sadeghi Mahoonak AR. Effects of microbial transglutaminase on the quality of wheat bread supplemented with hull-less barley flour. *Food Processing and Preservation Journal*. 2012;2(2): 81-98.

47. Fazeli A, Mazaheri Tehrani M, Karimi M, Sadeghian A, and Koochaki A. The Effect of Xanthan, Guar and Transglutaminase on the Physicochemical and Textural Properties of Gluten-free Doughnut. *Journal of Research and Innovative in Food Science and Technology*. 2019; 8(1): 1-14.

48. Haghayegh G.H. Evaluation of Nutritional, Technological and Sensory Properties of Gluten free Rice Bread Containing Semi Cereal. *Journal of Food Science and Technology*. 2017; 69 (14): 283-294.

49. Pouresmaeil N, Azizi MH, and Abbasi S. Formulation of Gluten fress Bread Using Guar and Microbial Transglutaminase Enzyme. *Journal of Food Research (University of Tabriz)*. 2011; 21(1): 70-81.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]

Using Transglutaminase Enzyme and Buck wheat Flour as Substitute for Wheat Flour at Biscuit Formulation

Mohammadi Nia S[1], Karazhiyan H[2]*

1- Department of Food Science and Technology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

*2- *Corresponding author: Department of Food Science and Technology, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran*
Email: hojjat.karazhiyan@iau.ac.ir

Received 23 Jan, 2026 **Accepted 27 Apr, 2026**

Background and Objectives: Biscuits, as one of the most widely consumed cereal-based products worldwide, play an important role in the human diet. In recent years, the growing public awareness of the consequences of gluten consumption has led to an increased demand for gluten-free products.

Materials & Methods: Different levels of buckwheat flour (0–60%) and Transglutaminase (T.G.) enzyme (0–0.3%) were incorporated into the formulations. The samples were subjected to chemical analyses (moisture, protein, fat, and ash content), physical attributes (water activity, colorimetry, and texture analysis), and sensory characteristics (five-point hedonic scale).

Results: Protein content of the biscuits increased. Fat content was also higher in samples containing buckwheat flour, which was partly attributed to the oil-holding capacity of buckwheat. Water activity decreased progressively with the addition of buckwheat flour and T.G enzyme, with the lowest value observed in the sample containing 60% buckwheat flour and 0.3% enzyme. In terms of texture, the incorporation of buckwheat flour increased hardness, although the addition of T.G enzyme partially mitigated this effect. Color analysis indicated that higher levels of buckwheat flour decreased lightness and resulted in darker products. Sensory evaluation revealed that the control sample (100% wheat flour) received the highest scores, but some treatments containing combinations of buckwheat flour and enzyme still showed considerable consumer acceptance.

Conclusion: Findings suggest that partial substitution of wheat flour with buckwheat flour, combined with T.G enzyme, can lead to the production of gluten-free biscuits with higher nutritional value and acceptable quality.

Keywords: Gluten-free biscuit, Buckwheat flour, Transglutaminase enzyme, Physicochemical properties, Sensory evaluation

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.66224/nsft.21.3.99]