مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

ارزیابی تأثیر تیمار آنزیمی آلفاآمیلاز و ترانس‌گلوتامیناز بر خواص رئولوژیکی خمیر و برخی ویژگی‌های پخت نان همبرگر تهیه شده از آرد کامل گندم

رقیه حسن‌بیگی[۱]، حسین جوینده[۲*]، محمد حجتی[۲]، حسن برزگر[۳]

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران.

۲- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم دامی و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

کلمات کلیدی:

آلفاآمیلاز،

اکستنسوگراف،

ترانس‌گلوتامیناز میکروبی،

فارینوگراف،

نان.

DOI:10.48311/fsct.2026.117111.82898

* مسئول مکاتبات:

hosjooy@asnrukh.ac.ir

چکیده

نان به‌عنوان بخش اصلی رژیم غذایی در بسیاری از کشورها، نیازمند بهینه‌سازی کیفیت در صنعت نانوایی است. نان سفید با ظاهر و بافت مطلوب، محبوبیت بالایی دارد، اما حذف سبوس در تولید آن موجب کاهش فیبر، ویتامین‌ها و املاح می‌شود. در مقابل، آرد کامل ارزش تغذیه‌ای بالاتری دارد ولی موجب افت حجم نان، کاهش تخلخل و افزایش سرعت بیاتی می‌گردد. برای رفع این چالش، در پژوهش حاضر تأثیر دو آنزیم آلفاآمیلاز (در سطح ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) و ترانس‌گلوتامیناز میکروبی (در سطح ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد) بر ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر نان (جذب آب آرد، پایداری، درجه سست شدن، کشش‌پذیری و مقاومت به کشش) و همچنین تخلخل و حجم مخصوص نان تهیه شده از آرد کامل گندم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آلفاآمیلاز موجب افزایش حجم مخصوص و تخلخل نان گردید، در حالی‌که ترانس‌گلوتامیناز این پارامترها را کاهش داد ($p<0/001$). همچنین، آزمون‌های فارینوگراف و اکستنسوگراف نشان دادند که ترانس‌گلوتامیناز جذب آب را افزایش و درجه سستی را کاهش داد، در حالی‌که آلفاآمیلاز موجب کاهش پایداری و افزایش سستی ($p<0/05$) شد. نمونه شاهد نیز بالاترین کشش‌پذیری و پایداری را نشان داد. بنابراین، با به‌کارگیری این آنزیم‌ها در سطوحی مناسب در هنگام تولید نان از آرد کامل (۰/۱ درصد آلفاآمیلاز و ۰/۱۵ درصد ترانس-گلوتامیناز)، می‌توان محصولی با ارزش تغذیه‌ای بالاتر و ویژگی‌های رئولوژیکی قابل قبول تولید کرد.

۱-مقدمه

با وجود توسعه و رقابت گسترده در زمینه تولید انواع مواد غذایی، نان همچنان به‌عنوان یکی از ارکان اصلی جیره غذایی شناخته می‌شود [۱]. این محصول با غنای نسبی در مواد مغذی، قیمت مناسب و دسترسی گسترده، در بسیاری از مناطق جهان عمدتاً از آرد گندم تهیه می‌گردد [۲]. با این‌حال، حذف سبوس در فرایند تولید آرد منجر به کاهش محتوای فیبر، ویتامین‌ها و عناصر معدنی در نان می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از آردهای سبوس‌دار نیز به‌دلیل وجود غلظت بالای اسید فیتیک، جذب عناصر ضروری همچون آهن، روی و کلسیم را با مشکل مواجه می‌سازد و می‌تواند زمینه‌ساز بروز برخی اختلالات تغذیه‌ای گردد. در این راستا، تلاش برای ارتقای ارزش تغذیه‌ای نان از طریق افزودن ترکیبات مفید به آرد، همچنان مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران حوزه غذایی قرار دارد [۳-۵]. نان‌های صنعتی به‌واسطه کیفیت مطلوب پخت، تنوع گسترده محصول، ماندگاری مناسب و انجام کامل مرحله تخمیر، جایگاه قابل‌توجهی در تأمین غذای روزانه کسب کرده‌اند [٦]. امروزه استفاده از افزودنی‌های غذایی در صنعت نانوایی، به‌عنوان روشی رایج برای بهبود کیفیت، افزایش ماندگاری و ارتقای خواص تغذیه‌ای نان محسوب می‌شود [۷]. این ترکیبات می‌توانند به تولید نان‌های با طعم‌های متنوع‌تر، ارزش تغذیه‌ای بالاتر و کیفیت پایدارتر کمک نمایند [۳ و ۸].

نقش آرد در کیفیت نان همواره مورد توجه صنعتگران این حوزه بوده است، چرا که آرد به دلیل داشتن نشاسته و ترکیبات پروتئینی اهمیت ویژه‌ای دارد. آرد گندم به خاطر ویژگی‌های ویسکوالاستیک پروتئین‌های گلوتن، قابلیت پخت و نانوایی بالایی دارد. ضعف گلوتن باعث می‌شود شبکه گلوتنی در خمیر نتواند گازهای تولید شده توسط مخمرها را به خوبی حفظ کند و در زمان تخمیر، ساختار خمیر از هم بپاشد. بنابراین، مقاومت و کشش خمیر دو پارامتر کلیدی و مهم برای ارزیابی کیفیت خمیر محسوب می‌شوند. برای رفع این مشکل، محققان به بررسی تأثیر افزودن ترکیبات مختلف به آردهای ضعیف پرداخته‌اند تا عوامل مؤثر و میزان بهینه استفاده از آن‌ها را تعیین کنند. از جمله این مواد بهبوددهنده می‌توان به آنزیم‌ها، صمغ‌های گیاهی و میکروبی، مواد اکسیدکننده، مونو و دی‌گلیسیریدها، فسفولیپیدها و استرول‌ها اشاره کرد [۹]. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود کیفیت گلوتن، استفاده از آنزیم‌ها است که این امر منجر به افزایش حجم، بهبود ساختار، افزایش ماندگاری و ارتقای طعم نان می‌شود. آنزیم‌ها به عنوان کاتالیزورهای زیستی عمل می‌کنند که برخلاف کاتالیزورهای شیمیایی، عملکرد بسیار تخصصی و هدفمندی دارند. آنزیم‌ها به طور کلی به عنوان ترکیبات طبیعی شناخته می‌شوند و با توجه به گرایش روزافزون صنایع غذایی به استفاده از مواد طبیعی و همچنین قوانین محدودکننده سازمان غذا و دارو درباره افزودنی‌های شیمیایی، کاربرد آنزیم‌ها در صنعت غذا روزبه‌روز اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱۰].

آنزیم آلفاآمیلاز به دلیل ایجاد قندهای قابل‌استفاده برای مخمرها و کمک به تولید گاز بیشتر در خمیر، سبب بهبود و افزایش حجم نان می‌گردد. آمیلاز با هیدرولیز پیوندهای $\alpha(1-4)$ گلیکوزیدی در مولکول‌های نشاسته، آن‌ها را به مالتودکسترین‌ها و الیگوساکاریدها تجزیه می‌کند. این فرآیند باعث می‌شود مخمرها به طور پیوسته فعالیت تخمیری داشته باشند و گاز CO_2 تولید کنند، که در نهایت منجر به افزایش حجم نان و بهبود بافت درونی آن می‌شود. علاوه بر این، قندهای ساده و الیگوساکاریدهای تولیدشده، واکنش‌های میلارد را تقویت می‌کنند؛ واکنش‌هایی که نقش مهمی در ایجاد رنگ قهوه‌ای مطلوب پوسته نان و طعم خاص محصول نهایی ایفا می‌کنند [۱۱]. آنزیم ترانس‌گلوتامیناز نیز قادر است ویژگی‌های عملکردی پروتئین‌ها را با ایجاد پیوندهای کووالانسی بین مولکولی و درون مولکولی تغییر دهد. مطالعات نشان داده‌اند که پیوندهای ایزوپپتیدی ایجاد شده توسط ترانس‌گلوتامیناز می‌توانند ویژگی‌های خمیر آردهای کم پروتئین، مانند آرد

گندم نرم و ترکیب‌های بدون گلوتن، را بهبود بخشند و در نهایت خواص نانوایی خمیر را ارتقا دهند [۱۲]. تحقیقات میرتس و همکاران [۱۳] و باگاگلی و همکاران [۱٤] نشان داده است که آنزیم‌های گلوکز اکسیداز و ترانس‌گلوتامیناز قادرند با تغییر ساختار شبکه گلوتنی ویژگی‌های ویسکوالاستیک آرد را بهبود بخشند، به‌طوری که استفاده از این آنزیم‌ها سبب تقویت خاصیت الاستیکی و استحکام بیشتر خمیر می‌شود.

امروزه مصرف نان تهیه شده از آرد کامل به‌دلیل خواص تغذیه‌ای بالا توصیه می‌شود. درهرحال، نان تهیه شده از چنین آردی از کیفیت پایینی برخوردار است، به‌طوری که مصرف کنندگان ترجیح می‌دهند بجای آن از نان تهیه شده از آرد سفید استفاده نمایند. از آنجایی که استفاده از آنزیم‌های تجزیه‌کننده پلی‌ساکاریدها مانند آلفاآمیلاز و همچنین آنزیم‌های ترانسفرازی مانند ترانس‌گلوتامیناز به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای ارتقای کیفیت نان در نظر گرفته می‌شود، در پژوهش حاضر، تأثیر هم‌افزایی آنزیم‌های آلفاآمیلاز و ترانس‌گلوتامیناز در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی خمیر و نان تهیه شده از آرد کامل مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ارزیابی ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر

۲-۱-۱- آزمون فارینوگراف

آزمون فارینوگراف جهت اندازه‌گیری جذب آب آرد و بررسی پایداری و درجه سست شدن خمیر با استفاده از دستگاه فارینوگراف Brabender مدل 816100.00 ساخت کشور آلمان انجام شد. این دستگاه نحوه اختلاط آرد با آب را در شرایط سرعت و دمای ثابت ثبت می‌کند و مقاومت خمیر در حین تشکیل را اندازه‌گیری می‌نماید. آزمون تا رسیدن خمیر به قوام مطلوب (معادل ۵۰۰ واحد برابندر) ادامه یافته و با تعیین میزان جذب آب در مدت زمان مشخص، اطلاعات دقیقی درباره تغییرات رئولوژیکی خمیر ارائه می‌دهد [۱۵ و ۱٦].

۲-۱-۲- آزمون اکستنسوگراف

ویژگی‌های کشش‌پذیری و مقاومت به کشش خمیر با استفاده از دستگاه اکستنسوگراف Brabender مدل 860704 ساخت کشور آلمان مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۷]. این دستگاه عملکرد خمیر در طی فرآیند تخمیر را شبیه‌سازی کرده و با اندازه‌گیری نیروی مورد نیاز برای کشش خمیر، توانایی آن در توسعه و نگهداری گازهای حاصل از تجزیه قندها و نشاسته را تحلیل می‌نماید. این آزمون امکان بررسی دقیق ویژگی‌های رئولوژیکی مرتبط با فرآیند تخمیر را فراهم کرده و نقش مؤثری در پیش‌بینی عملکرد خمیر در مراحل مختلف تولید و پخت ایفا می‌کند [۱۸]. آرد به میزان ۳۰۰ گرم وزن شده و در مخلوط‌کن دستگاه فارینوگراف قرار گرفت. سپس ۲ درصد کلرید سدیم در ۲۵۰ میلی‌لیتر آب داخل ارلن مایر حل شد؛ مقدار آب افزوده شده برابر با جذب آب آرد منهای ۱ درصد بود. محلول نمکی به‌آرامی از طریق بورت به آرد اضافه شد و مخلوط به مدت یک دقیقه در دستگاه فارینوگراف هم زده شد. نمونه پس از آماده‌سازی، در مرکز کلاف و چنگک دستگاه قرار گرفت و زمان‌سنج روی ٤۵ دقیقه تنظیم گردید. مراحل مشابه برای نمونه دوم نیز انجام شد و سپس هر دو نمونه همراه با کلاف نگهدارنده در اتاقک تخمیر قرار گرفتند. پس از گذشت ٤۵ دقیقه از چنگک‌زنی اولین نمونه، ظرف حاوی خمیر به همراه چنگک روی بازوی تراز دستگاه اکستنسوگراف قرار گرفت، قلم ثبت‌کننده صفر شده و عملیات کشش آغاز گردید. پس از پاره شدن خمیر توسط قلاب، نمونه برداشته و مراحل چانه‌گیری و رول کردن روی تکه خمیر تکرار شد و دوباره برای ٤۵ دقیقه دیگر در اتاقک تخمیر قرار گرفت. همین روند برای نمونه دوم نیز تکرار و در نهایت نمودارهای مربوطه رسم شدند [۱٦ و ۱۷].

۲-۲- آزمون‌های ارزیابی نان همبرگر

۲-۲-۱- تولید نمونه‌های نان همبرگر

برای تهیه نان از آرد کامل (شرکت دره‌شهر) استفاده شد. نمونه‌های نان به شیوهٔ خمیر مستقیم[1] و با استفاده از روش جوینده و همکاران با کمی تغییرات تولید گردیدند [۳]. آنزیم آلفاآمیلاز قارچی (با فعالیت ۱۲۰۰۰۰ SKB/min) در سطوح ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد و آنزیم ترانس‌گلوتامیناز (با فعالیت ۱۰۰ واحد بازای هر گرم پروتئین) در سطوح ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد (هرکدام بر پایه وزن آرد) به فرمول اضافه شدند. خمیر با استفاده از دستگاه خمیرگیر آماده شد و پس از ۲۰ دقیقه تخمیر به قطعات ۷۰ گرمی چانه‌گیری شد. قطعات خمیر جهت استراحت در گرمخانه‌ای با دمای ۳۰ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۵ درصد به‌مدت ۵۰ دقیقه قرار گرفتند. فرآیند پخت در دمای ۱۵±۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۵ دقیقه انجام شد. در طول تولید نمونه‌ها، درجه حرارت، ضخامت و ابعاد نان ثابت و یکنواخت نگه داشته شد. نان‌های حاصل پس از خنک شدن در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی شده و در دمای اتاق جهت انجام آزمون‌های بعدی نگهداری شدند [۳].

۲-۲-۲- حجم مخصوص

به‌منظور انجام این آزمایش، طی بازه‌ای حداکثر دو ساعت پس از فرآیند پخت، قطعاتی از نان با ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر از مرکز هندسی آن تهیه شد. وزن هر قطعه به‌دقت اندازه‌گیری گردید. سپس هر قطعه درون ظرفی با حجم معین (V_1) قرار گرفت و فضای خالی باقی‌مانده توسط دانه‌های کلزا پر شد. پس از خارج کردن قطعه نان، حجم اشغال‌شده توسط دانه‌های کلزا (V_2) ثبت شد و حجم واقعی نان از اختلاف بین حجم کلی ظرف و حجم دانه‌ها (V_1-V_2)محاسبه گردید. در نهایت، با تقسیم حجم بر وزن، حجم مخصوص نمونه‌ها تعیین شد [۱۹].

۲-۲-۳- تخلخل

برای اندازه‌گیری میزان تخلخل مغز نان از روش پردازش تصویر استفاده شد. برای این منظور ابتدا برش‌های ۵×۵ سانتی‌متری از قسمت مغز نان تهیه شد. تصویر هر قطعه با قرار دادن دوربین دیجیتال در فاصله ثابت ۳۰ سانتی‌متری از هر نمونه، در یک جعبه سیاه با نورپردازی با زاویه ۴۵ درجه توسط لامپ‌های فلوئورسنتی، گرفته شد. سپس توسط نرم افزار Image-J 1.46r میزان تخلخل نمونه‌ها محاسبه شد [۲۰].

۲-۳- تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی تأثیر تیمارهای آنزیمی آلفاآمیلاز و ترانس-گلوتامیناز میکروبی بر ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر نان (جذب آب آرد، پایداری، درجه سست شدن، کشش‌پذیری و مقاومت به کشش) و همچنین تخلخل و حجم مخصوص نمونه‌های نان، داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۹ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه به‌منظور تعیین تفاوت معنی‌داری بین میانگین تیمارها به‌کار گرفته شد. سطح معنی‌داری در تمامی آزمون‌ها برابر با $p<۰/۰۵$ در نظر گرفته شد. کلیه آزمایش‌ها به‌صورت سه تکرار مستقل انجام شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات فارینوگراف خمیر

۳-۱-۱- جذب آب

نتایج آزمون فارینوگراف در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، افزودن آنزیم آلفاآمیلاز (AA)

1-straight dough method

باعث کاهش جذب آب خمیر گردید. میانگین جذب آب در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز به‌ترتیب ٦٤/٧٠، ٦٣/٣٦ و ٦٠/٤٥ درصد تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان شاهد و نمونه حاوی ۰/۱ درصد وجود نداشت. کاهش جذب آب در نتیجهٔ افزایش غلظت آلفاآمیلاز احتمالاً به دلیل فعالیت این آنزیم روی مولکول‌های آمیلوز و آمیلوپکتین است که باعث تجزیه آنها به واحدهای کوچکتر مانند دکسترین می‌شود. این تجزیه موجب آزاد شدن آب بیشتر در محیط می‌شود که در نهایت باعث چسبناک شدن خمیر و کاهش جذب آب توسط آن می‌شود. این نتایج با یافته‌های تحقیق سنزپنلا و همکاران [۲۱] همخوانی دارد. این نتیجه همچنین با نتایج تحقیق روسل [۷] تطابق دارد، هرچند که در این مطالعه، غلظت‌های بالاتری از آنزیم، نسبت به این تحقیق، مورد آزمایش قرار گرفته است. درمقابل، تیمار آنزیمی ترانس‌گلوتامیناز (TG) سبب افزایش جذب گردید. میانگین جذب آب در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز به‌ترتیب ٦١/٣٩، ٦٣/١٣ و ٦٣/٩٩ درصد تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان نمونهٔ حاوی ۰/۱۵ درصد با شاهد و نمونهٔ حاوی ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز وجود نداشت. افزایش جذب آب در اثر افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز را می‌توان به ایجاد اتصالات بیشتر و قوی‌تر، و در نتیجه شبکه پروتئینی گسترده‌تر توسط آنزیم مذکور نسبت داد. ایجاد شبکه پروتئینی قوی‌تر باعث می‌شود آب راحت‌تر و بیشتر درون شبکه به دام بیفتد و جذب آب افزایش یابد [۲۲]. مارکو و روسل [۲۳] نیز افزایش جذب آب خمیر را با افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز گزارش نموده‌اند و دلیل آن را به پیوندهای عرضی ایجاد شده توسط آنزیم ترانس‌گلوتامیناز نسب دادند. درواقع این پیوندها سبب تشکیل پلیمرهای پروتئینی با ظرفیت نگهداری آب بالا می‌شوند [۲٤]. درهرحال همان‌گونه که اشاره گردید تیمار ترانس‌گلوتامیناز در بالاترین سطح (۰/۳ درصد) تفاوت معنی‌داری نسبت به سطح کمتر (۰/۱۵) ایجاد نکرد که احتمالاً به دلیل اتصالات بیش از حد درون و برون مولکولی ایجاد شده می‌باشد که می‌تواند تا حدودی میزان جذب آب را تحت تأثیر قرار دهد [۲۵]. مطابق جدول ۱، کمترین جذب آب (٥٩/١٤ درصد) در نمونهٔ حاوی ۰/۲٪ آلفاآمیلاز و۰٪ ترانس‌گلوتامیناز و بیشترین مقدار آن (٦٥/٩٦ درصد) در نمونهٔ حاوی ۰٪ آلفاآمیلاز و ۰/۳٪ ترانس‌گلوتامیناز تعیین شد.

۲-۱-۳- زمان پایداری

نتایج این تحقیق نشان داد که تیمار آنزیمی با آنزیم‌های آلفاآمیلاز (p<۰/۰۱) و ترانس‌گلوتامیناز (p<۰/۰۵) سبب کاهش قابل توجه زمان پایداری خمیر شده است. میانگین پایداری خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز به‌ترتیب ۳/۱۷، ۲/٦٨ و ۲/۳۲ دقیقه تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان نمونه‌های حاوی آنزیم آلفاآمیلاز وجود نداشت. این یافته‌ها با نتایج مطالعه‌ی دیوید و همکاران [۲٦] مطابقت دارد. این پژوهشگران کاهش مقاومت و پایداری خمیر را ناشی از تأثیر آنزیم آلفاآمیلاز بر ساختار نشاسته و هیدرولیز آن دانسته‌اند؛ این آنزیم با شکستن نشاسته و تولید مالتوز، منجر به دهیدراته شدن گلوتن و آزاد شدن آب بیشتر در محیط خمیر می‌شود و در نتیجه، ویسکوزیته‌ی خمیر کاهش می‌یابد.

همچنین با افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز نیز کاهش در پایداری خمیر مشاهده شد. میانگین پایداری خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز به‌ترتیب ۲/۹۰، ۲/۸۵ و ۲/٤۲ دقیقه تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان شاهد با نمونهٔ حاوی ۰/۱۵ درصد ترانس‌گلوتامیناز وجود نداشت. کاهش پایداری خمیر در هنگام استفاده از سطوح بیشتر آنزیم ترانس‌گلوتامیناز می‌تواند به علت تغییر در ساختار پروتئینی و اختلال در شبکه گلوتنی خمیر باشد [۲۲ و ۲۷]. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان پایداری خمیر (۳/۵۲ دقیقه) مربوط به نمونه شاهد است،

در حالی که کمترین پایداری (۲/۲۹ دقیقه) به نمونه‌ای تعلق دارد که حاوی بیشترین سطوح هر دو آنزیم است.

۳-۱-۳- درجهٔ نرمی/ سستی خمیر

نتایج آزمون فارینوگراف نشان داد که افزودن آنزیم آلفاآمیلاز موجب افزایش قابل توجه ($p<۰/۰۰۱$) سستی خمیر شد (جدول ۱). میانگین سستی خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز به‌ترتیب ۱۵٤/۷، ۱۸٦/٤ و ۲۱۰/٦ واحد برابندر تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان سطوح مختلف آنزیم آلفاآمیلاز مشخص گردید. همانگونه که در بخش‌های قبل نیز بیان شد، آنزیم آلفاآمیلاز به دلیل هیدرولیز نشاسته و تولید مالتودکسترین، الیگوساکاریدها و مالتوتریوزها و در ادامه تولید مالتوز، آب آزاد را افزایش می‌دهد که نتیجه آن کاهش پایداری و افزایش میزان سست شدگی خمیر را به دنبال دارد. این نتایج مطابق با مطالعه پیرس و همکاران [۲۸] بود. در مقابل، افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز در سطوح بالا سبب کاهش معنی‌دار ($p<۰/۰۰۱$) درجه نرم شدن نمونه‌های خمیر نان برحسب واحد برابندرشد. میانگین سستی خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز به‌ترتیب ۱۹۵/۰، ۲۰۲/۹ و ۱۵۳/۹ واحد برابندر تعیین شد که در اینجا نیز اختلاف معنی‌داری میان شاهد با نمونهٔ حاوی ۰/۱۵ درصد ترانس‌گلوتامیناز مشخص نگردید. علت این موضوع، تأثیر آنزیم ترانس‌گلوتامیناز در تشکیل شبکه پروتئینی است که می تواند سبب تقویت بافت خمیر و افزایش استحکام آن شود. علت تفاوت در تأثیر آنزیم بر میزان سستی خمیر را می‌توان به اثر دوگانه آنزیم نسبت داد. در مقادیر کم آنزیم ترانس‌گلوتامیناز، به دلیل تشکیل اتصالات عرضی مناسب بین پروتئین‌ها در خمیر و به دام افتادن آب در شبکه، شبکه گلوتنی با ویژگی‌های ویسکوالاستیک تولید می‌شود؛ اما در حضور درصد بالایی از این آنزیم، این اتصالات قویتر و بیشتر می‌شود و باعث آسیب‌های مکانیکی به شبکه گلوتنی و کاهش الاستیسسیته می‌گردد [۲۹]. کورایشی و همکاران [۲۲] گزارش کردند که افزودن بیش از اندازه آنزیم ترانس-گلوتامیناز باعث شکننده شدن شبکه پروتئینی و تضعیف ساختار گلوتن می‌شود. درواقع پروتئین‌های گلوتن گندم در حضور اتصالات بیش از اندازه در اثر افزودن آنزیم، ویژگی‌های عملکردی خود را از دست می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این آنزیم تا سطوح مشخصی، با ایجاد اتصالات جدید و شبکه‌های قویتر و گسترده‌تر می‌تواند باعث افزایش میزان جذب آب، مقاومت و پایداری خمیر شود ولی همیشه افزودن مقادیر بالاتری از آنزیم، باعث افزایش کیفیت نمی‌گردد [۳۰]. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان سستی خمیر (۲۲۸/٦ برابندر) مربوط به نمونه فاقد آنزیم ترانس-گلوتامیناز و ۰/۲ درصد آنزیم آلفاآمیلاز است، در حالی که کمترین پایداری (۱۳۲/۵ برابندر) به نمونه‌ای تعلق دارد که حاوی بیشترین سطح آنزیم ترانس‌گلوتامیناز و بدون آنزیم آلفاآمیلاز است.

Table 1. Comparative analysis of Farinograph and Extensograph dough properties

Characteristics	0% alpha-amylase			0.1% alpha-amylase			0.2% alpha-amylase		
	0% TG	0.15% TG	0.3% TG	0% TG	0.15% TG	0.3% TG	0% TG	0.15% TG	0.3% TG
Water Absorption (%)	63.53 ±3.40^{abc}	64.62 ±1.73^{ab}	65.96 ±0.87^{a}	61.50 ±2.11^{abc}	63.82 ±1.27^{ab}	64.76 ±1.17^{ab}	59.14 ±0.98^{c}	60.95 ±1.30^{bc}	61.26 ±2.35^{bc}
Stability Time (min)	3.52 ±0.40^{a}	3.35 ±0.46^{ab}	2.64 ±0.33^{bc}	2.87 ±0.08^{abc}	2.86 ±0.21^{abc}	2.33 ±0.17^{c}	2.33 ±0.45^{c}	2.34 ±0.24^{c}	2.29 ±0.24^{c}
Softening (BU)	161.3 ±3.40^{d}	170.3±3.40^{cd}	132.5±15.90^{e}	195.1±7.34^{abc}	209.1±8.68^{ab}	155.1±16.72^{de}	228.6±3.59^{a}	229.3±12.72^{a}	174.0±12.66^{cd}
Extensibility (mm)	160.2 ±9.57^{def}	151.2±2.50^{ef}	134.6±5.08^{f}	185.0±10.03^{bcd}	191.44±13.46^{bc}	169.5±11.96^{cde}	224.9±14.04^{a}	228.5±2.69^{a}	203.55±21.60^{ab}
Resistance to Extension (EU)	141.5 ±11.04^{d}	143.7±16.62^{d}	220.2±12.72^{a}	131.9±2.76^{de}	133.2±5.99^{de}	194.0±7.00^{b}	112.8±4.23^{e}	115.1±5.99^{e}	164.2±4.43^{c}

Similar letters within each row are not significantly different at the $p<0.05$ statistical level.

۲-۳- خصوصیات اکستنسوگراف خمیر

۱-۲-۳- میزان کشش پذیری خمیر

براساس نتایج اکستنسوگرافی خمیر، تیمار آنزیمی ترانس-گلوتامیناز برخلاف آنزیم آلفاآمیلاز سبب کاهش کشش-پذیری خمیر شد. به عبارت دیگر، افزودن آلفاآمیلاز تأثیر مثبت قابل توجهی بر پارامتر توسعه خمیر در طول پروفینگ داشته است. میانگین قابلیت کشش‌پذیری خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز به‌ترتیب ۱٤۸/٦، ۱۸۲/۰ و ۲۱۹/۰ میلی‌متر تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان هر یک از سطوح مختلف آنزیم آلفاآمیلاز مشخص گردید. سانز پنلا و همکاران [۲۱] در تأیید نتایج این تحقیق استفاده از آنزیم‌های تجزیه‌کننده آمیلولیتیک و فیتات را برای غلبه بر اثر مضر سبوس بر فراهمی مواد معدنی (فیتاز) و همچنین عملکرد تکنولوژیکی خمیر توصیه نمودند. افزایش کشش‌پذیری خمیر ناشی از فعالیت آنزیم آلفاآمیلاز، به دلیل هیدرولیز نشاسته و تضعیف ساختار شبکه خمیر می-باشد.

از سوی دیگر، مطابق نتایج این تحقیق مشخص شد که تیمار آنزیمی در سطح ۰/۱۵ درصد هرچند تأثیر معنی‌داری بر ویژگی کشش‌پذیری خمیر ندارد اما سطح بالاتر آنزیم به شکل معنی‌داری سبب کاهش قابلیت کشش‌پذیری شد. میانگین کشش‌پذیری خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز به‌ترتیب ۱۹۰/۰، ۱۹۰/٤ و ۱٦۹/۲ میلی‌متر تعیین شد که در اینجا نیز اختلاف معنی‌داری میان شاهد با نمونهٔ حاوی ۰/۱۵ درصد ترانس‌گلوتامیناز مشخص نگردید. کاهش قابل توجه کشش‌پذیری در نمونه حاوی ۰/۳ درصد آنزیم ترانس‌گلوتامیناز به تشکیل اتصالات قوی‌تر و بیشتر بین پروتئین‌ها نسبت داده می‌شود. این فرآیند منجر به تقویت ساختار خمیر و در نتیجه کاهش خاصیت کشسانی آن شده، به‌گونه‌ای که خمیر با سرعت بیشتری دچار پارگی می‌گردد. در واقع، رفتار چنین خمیری بیش از آن‌که مشابه یک سیستم ویسکوالاستیک باشد، به یک جسم جامد شباهت دارد. در این حالت، به‌دلیل تضعیف خصوصیات ویسکوز خمیر، میزان کرنش برگشت‌ناپذیر نسبت به کرنش برگشت‌پذیر کاهش می‌یابد [۲۹].

بر اساس نتایج اکستنسوگرافی ارائه‌شده در جدول ۱، بیشترین میزان خاصیت کشسانی خمیر (۲۲٤/۹ میلی‌متر) مربوط به نمونه فاقد آنزیم ترانس‌گلوتامیناز و ۰/۲ درصد آنزیم آلفاآمیلاز است، در حالی که کمترین پایداری (۱۳٤/٦ میلی‌متر) به نمونهٔ حاوی بیشترین سطح آنزیم ترانس-گلوتامیناز و بدون آنزیم آلفاآمیلاز تعلق گرفت.

۲-۲-۳- مقاومت به کشش

بر اساس نتایج به‌دست آمده، آنزیم آلفاآمیلاز موجب کاهش مقاومت خمیر در برابر کشش گردید. میانگین مقاوت به کشش خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱ و ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز به‌ترتیب ۱٦۸/۵، ۱۵۳/۰ و ۱۳۰/۷ تعیین شد که در این میان اختلاف معنی‌داری میان هر یک از سطوح مختلف آنزیم آلفاآمیلاز مشخص گردید. به‌طور کلی، عواملی که به تقویت ساختار خمیر کمک کنند، می‌توانند موجب افزایش مقاومت کششی آن شوند؛ در مقابل، عواملی که از استحکام خمیر بکاهند، که معمولاً ناشی از تضعیف پیوندهای موجود در ماتریکس خمیری هستند، سبب کاهش این ویژگی می‌گردند. آنزیم آلفاآمیلاز، از طریق هیدرولیز نشاسته، ساختار خمیر را تضعیف کرده و در نتیجه مقاومت آن در برابر کشش را کاهش داده است. افزون‌بر این، افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز میکروبی موجب افزایش مقاومت کششی خمیر شده که با یافته‌های پژوهش بائر و همکاران [۲۹] هم‌راستا است. میانگین مقاومت در برابر کشش خمیر در نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز به-

ترتیب ۱۲۸/۷، ۱۳۰/٦ و ۱۹۲/۸ واحد اکستنسوگراف (EU) تعیین شد که در اینجا نیز اختلاف معنی‌داری میان شاهد با نمونهٔ حاوی ۰/۱۵ درصد ترانس‌گلوتامیناز مشخص نگردید. این افزایش مقاومت به‌دلیل تشکیل اتصالات عرضی میان پروتئین‌ها توسط آنزیم ترانس‌گلوتامیناز است که به تقویت شبکه گلوتنی و بهبود ویژگی‌های ویسکوالاستیک خمیر منجر می‌شود [۲۹]. شایان ذکر است که فرمولاسیون‌ها و شرایط مختلف فرآیندی تأثیر چشمگیری بر نتایج نهایی دارند. در واقع، عملکرد آنزیم‌ها به‌شدت وابسته به شرایط حاکم بر فرآیند است. ببه عنوان مثال لابر و همکاران [۳۱] در بررسی تأثیر پیش‌انکوباسیون شیر بدون چربی با ترانس-گلوتامیناز میکروبی (۳ واحد در گرم پروتئین شیر) در دمای ٤۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۵۰ دقیقه و غیرفعال‌سازی حرارتی متعاقب آن هنگام تهیه ماست گزارش کردند که قوام ماست با افزایش زمان پیش‌انکوباسیون حدود ٦۷ درصد افزایش یافت و پس از ٦۰ دقیقه به یک سطح ثابت رسید. نتایج این محققین نشان داد که حتی مقادیر بسیار کم اتصال عرضی کازئین می‌تواند به ایجاد تغییرات قابل توجهی در خواص عملکردی پروتئین‌های شیر منجر شود.

۳-۳- ارزیابی ویژگی‌های پخت نان

۱-۳-۳- حجم مخصوص

نتایج مربوط به تأثیر آنزیم‌های آلفاآمیلاز و ترانس‌گلوتامیناز میکروبی بر حجم مخصوص نان‌های تهیه‌شده در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل a-۱ مشاهده می‌شود، افزودن آنزیم آلفاآمیلاز به نان‌های تهیه‌شده از آرد کامل تأثیر معنی‌داری بر حجم مخصوص نمونه‌ها داشته است ($p<۰/۰۰۱$). در مقابل، اثر متقابل دو آنزیم آلفاآمیلاز و ترانس‌گلوتامیناز بر این ویژگی فاقد معنی‌داری آماری بوده است ($p>۰/۰۵$). مطابق با داده‌های ارائه‌شده (شکل a-۱)، افزایش درصد آلفاآمیلاز منجر به افزایش حجم مخصوص نان شده است (شکل ۱). با این حال، اختلاف معنی‌داری میان نمونه شاهد (۰/٤۷ میلی‌لیتر بر گرم) و نمونه حاوی ۰/۱ درصد آلفاآمیلاز (۰/۵ میلی‌لیتر بر گرم) مشاهده نشد ($p>۰/۰۵$). آنزیم آلفاآمیلاز با تجزیه نشاسته به قندهای ساده‌ای نظیر گلوکز، مالتوز و دکسترین، موجب فراهم‌سازی مواد مغذی برای رشد و فعالیت مخمر می‌شود. این فرآیند منجر به افزایش تولید گاز CO_2 و در نتیجه افزایش حجم نان خواهد شد. در واقع، افزایش تولید CO_2 و بهبود کشسانی خمیر، هر دو در جهت افزایش حجم نهایی نان و کاهش سختی بافت آن عمل می‌کنند [۳۲].

در مطالعه‌ای توسط بنجام و همکاران [۳۳]، تأثیر آنزیم‌های آلفاآمیلاز، زایلاناز و لیپاز بر ویژگی‌های کیفی نان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ۳۰ ppm لیپاز و ۳۰ ppm آمیلاز منجر به افزایش حجم نان و کاهش سفتی بافت آن شد. وانگ و همکاران [۳٤] نیز به بررسی اثر آنزیم‌های آلفاآمیلاز، زایلاناز، گلوکز اکسیداز، سلولاز و لیپاز بر خواص ارگانولپتیکی خمیر پیتزای منجمد پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که به جز آلفاآمیلاز، سایر آنزیم‌ها موجب بهبود ویژگی‌های حسی خمیر شده و امتیاز بالاتری نسبت به نمونه کنترل کسب کردند. در این میان، زایلاناز بیشترین تأثیر را بر ارتقاء کیفیت ارگانولپتیکی داشت. همچنین، ارزیابی فرآیند تخمیر خمیر پیتزای منجمد نشان داد که در حضور زایلاناز، سلولاز و لیپاز، حجم خمیر به ترتیب ۳۳/۲، ۱۹/۷ و ۷/٤ درصد افزایش یافت. لیو و همکاران [۳۵] اثر آمیلاز و زایلاناز را بر ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر نان غنی‌شده با سبوس بررسی کردند. نتایج نشان داد که آمیلاز به طور قابل توجهی موجب افزایش نرم‌شدگی خمیر، افزایش اندیس زمان اختلاط و بهبود قابلیت افزایش حجم خمیر شد.

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در شکل b-۱، درصد آنزیم ترانس‌گلوتامیناز تأثیر آماری معنی‌داری بر حجم مخصوص نمونه‌های نان داشته است (p<۰/۰۰۱)، به‌طوری‌که با افزایش درصد این آنزیم، حجم مخصوص نان کاهش یافته است. با این حال، اختلاف معنی‌داری میان نمونه شاهد (۰/۵۵ میلی‌لیتر بر گرم) و نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد ترانس‌گلوتامیناز (۰/۵۳ میلی‌لیتر بر گرم) مشاهده نشد (p>۰/۰۵). این کاهش در حجم مخصوص را می‌توان به تشکیل پیوندهای عرضی بین پروتئین‌ها نسبت داد. آرد گندم مورد استفاده در این پژوهش از نوع بسیار قوی با گلوتن بالا و شاخص گلوتنی قابل توجه بود. در چنین شرایطی، آنزیم ترانس‌گلوتامیناز با تقویت شبکه گلوتنی و ایجاد اتصالات بیشتر بین پروتئین‌ها، ساختار پروتئینی مستحکمی ایجاد می‌کند که مانع از باز شدن و افزایش حجم نان می‌شود. بنابراین، در آردهایی با پروتئین بالا و کیفیت گلوتنی زیاد، اثر این آنزیم بر حجم نان معکوس خواهد بود. در مقابل، ترانس‌گلوتامیناز برای آردهایی با کیفیت پروتئینی پایین می‌تواند مفید واقع شود [۳۶].

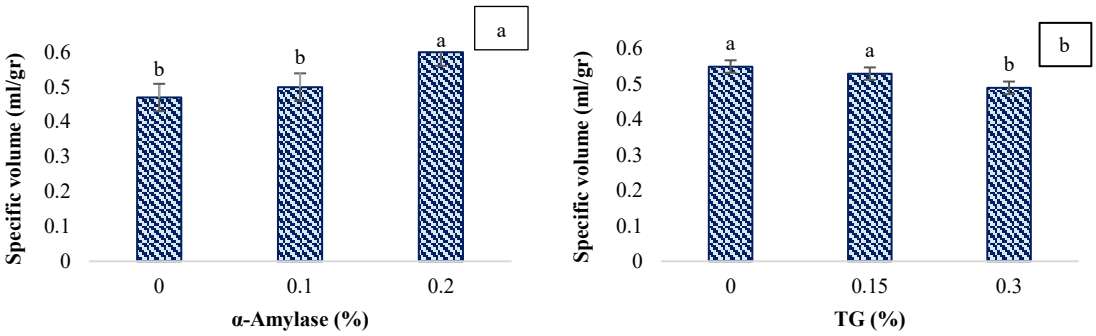

Figure 1. Effect of transglutaminase (TG) and alpha-amylase enzymes on the specific volume of bread samples. Different letters indicates the values are not significantly different (p<0.05).

استفولانی و همکاران [۳۷] در بررسی تأثیر آنزیم ترانس‌گلوتامیناز میکروبی بر ویژگی‌های نان حجیم گزارش کردند که افزودن این آنزیم موجب در سطوح میانی (۰/۱ درصد) افزایش حجم مجصوص و کاهش سفتی مغز نان می‌شود. بر اساس یافته‌های جرارد و همکاران [۳۸]، آنزیم ترانس‌گلوتامیناز می‌تواند نقش مؤثری در بهبود فرآیند تولید نان ایفا کند و عملکردی مشابه با بهبوددهنده‌ها و اکسیدکننده‌ها داشته باشد. نکته قابل توجه این محققان آن بود که افزودن این آنزیم در سطح ۲ درصد، تأثیر منفی بر کیفیت نان داشت. این اثر منفی به تشکیل اتصالات عرضی شدید و بیش از حد در شبکه گلوتنی نسبت داده شد که منجر به بافتی سفت‌تر می‌شود. در حالی‌که این اتصالات در حد متعادل برای ساختار نان مفید هستند، افزایش بیش از اندازه آن‌ها مانع از افزایش حجم نان شده و از باز شدن و پف‌کردن بافت جلوگیری می‌کند، موضوعی که با نتایج این تحقیق نیز هم‌خوانی داشت.

پوراسماعیل و همکاران [۳۹] با بررسی تأثیر صمغ گوار و آنزیم ترانس‌گلوتامیناز بر حجم مخصوص نان، دریافتند که افزودن صمغ گوار در سطوح ۲ و ۳ درصد موجب افزایش معنی‌دار حجم مخصوص نان در مقایسه با نمونه شاهد شد. در مقابل، استفاده از آنزیم ترانس‌گلوتامیناز و افزایش مقدار آن در فرمولاسیون نان، منجر به کاهش معنی‌دار حجم مخصوص نسبت به نمونه شاهد گردید. مکانیسم عملکرد ترانس‌گلوتامیناز به ایجاد پیوندهای عرضی بین اسیدهای آمینه گلوتامین و لیزین مربوط می‌شود. این پیوندهای عرضی مانع از رشد سلول‌های گازی در طول فرآیند تخمیر شده و در نتیجه باعث کاهش حجم مخصوص نان می‌گردند. همچنین، باسمن و همکاران [۴۰] کاهش حجم مخصوص

نان تهیه‌شده از آرد گندم را در اثر افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز گزارش کردند. طبق یافته‌های آنان، استفاده از این آنزیم در مقادیر بالاتر از ۱ درصد موجب کاهش حجم نان و تخریب بافت پوسته آن می‌شود.

۲-۳-۳- تخلخل

نتایج آزمون تخلخل نمونه نان‌های تولیدی در شکل ۲ گزارش‌شده است. همان‌طور که در شکل a-۲ مشخص است، افزودن آنزیم آلفاآمیلاز تأثیر معنی‌داری بر میزان تخلخل نمونه‌های نان داشته است ($p<۰/۰۰۱$)؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد این آنزیم، تخلخل نمونه‌های نان از ۳۳/۰۶ درصد در نمونه شاهد به ۳۶/۴۰ درصد در نمونه حاوی ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز افزایش یافته است (شکل a-۲). آنزیم‌ها، به ویژه آمیلازها، به عنوان یک اصلاح‌کننده در تولید محصولات نانوایی عمل می‌کنند. آلفاآمیلاز با تجزیه نشاسته و تولید دکسترین با زنجیره کوتاه در نتیجهٔ هیدرولیز نشاسته، سبب کاهش سختی و نرم شدن بافت محصولات پخت می‌شود [۴۱]. بر اساس یافته‌های پژوهش شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱۹]، حضور آنزیم آلفاآمیلاز در فرمولاسیون نان بربری، تهیه‌شده از آرد گندم با درجات مختلف استخراج، تأثیر مثبتی بر بافت، حجم مخصوص، تخلخل و ویژگی‌های حسی محصول نهایی داشته است. در همین راستا، زنگ و همکاران [۴۲] اثر α-آمیلاز و گلوکز اکسیداز را به عنوان بهبود دهنده‌های نان بر خواص بافتی و حرارتی نان با استفاده از آنالیز ویسکوزیته سریع و گرماسنجی روبشی تفاضلی ارزیابی کردند. مشخص شد که α-آمیلاز و گلوکز اکسیداز می‌توانند حجم مخصوص و تخلخل مغز نان را بهبود بخشند، بیاتی نان را به تأخیر بیندازند و شاخص اتانول آرد را افزایش دهند. بنابراین این محققین استفاده از α -آمیلاز و گلوکز اکسیداز را به عنوان اصلاح‌کننده بافت بالقوه برای محصولات پخت پیشنهاد نمودند.

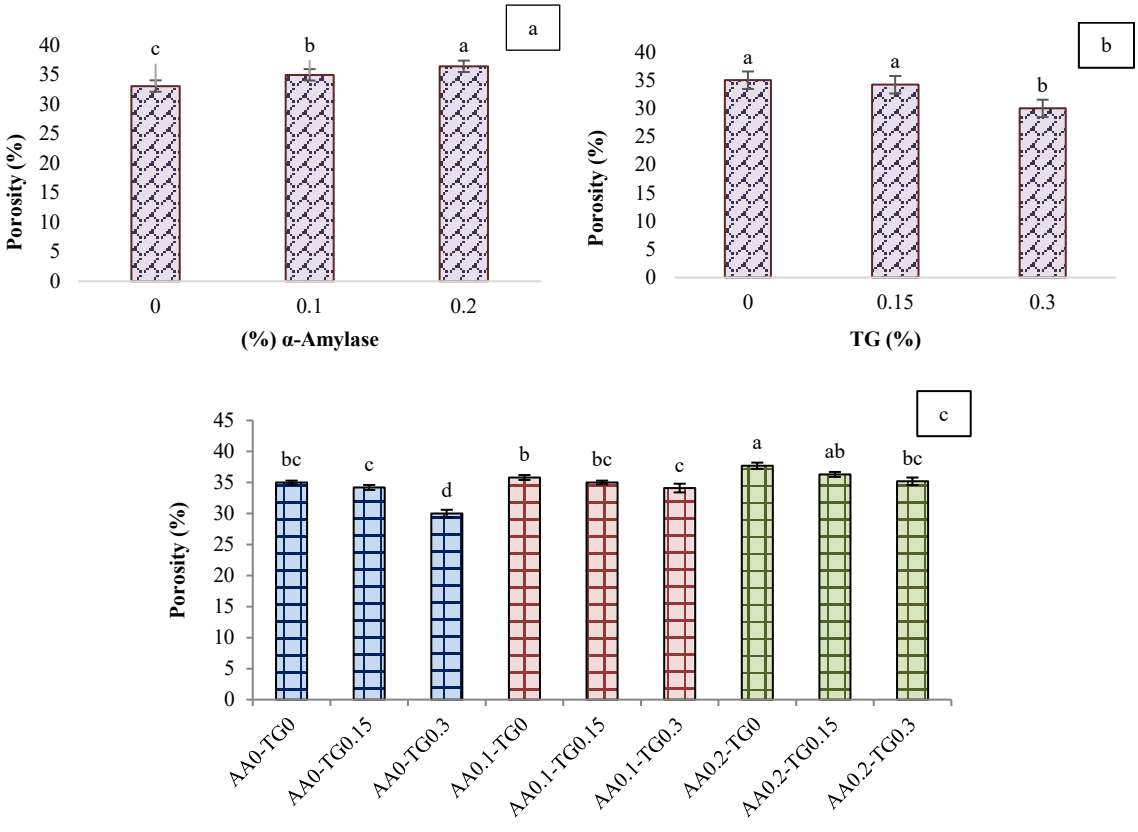

Figure 2. Effect of transglutaminase (TG) and alpha-amylase (AA) enzymes on the porosity of bread samples. Different letters indicates the values are not significantly different ($p<0.05$).

با توجه به شکل b-۲، افزودن آنزیم ترانس‌گلوتامیناز به نان‌های تهیه‌شده از آرد کامل اثر معنی‌داری بر میزان تخلخل نمونه‌ها داشته است (p<۰/۰۰۱). با افزایش مقدار آنزیم، تخلخل نمونه‌های نان از ۳۵ درصد در نمونه شاهد به ۳۰ درصد در نمونه حاوی ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز کاهش یافته است. با این حال، تفاوت معنی‌داری میان نمونه شاهد و نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد ترانس‌گلوتامیناز (۳٤/۲۰ درصد) مشاهده نشد (شکل b-۲). شین و همکاران [٤۳] با بررسی نان بدون گلوتن تهیه‌شده از آرد برنج و افزودن ۰/۰۱ درصد آنزیم ترانس‌گلوتامیناز، دریافتند که کاهش در حجم مخصوص و تخلخل به طور همزمان اتفاق افتاده و هر دو شاخص تحت تأثیر آنزیم کاهش یافته‌اند. در مطالعه‌ای دیگر با هدف بررسی تأثیر افزودن سطوح مختلف کازئینات سدیم (۰، ۳ و ٦ درصد) و آنزیم ترانس‌گلوتامیناز میکروبی (۰، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد) بر ویژگی‌های رئولوژیکی، فیزیکی و حسی نان بدون گلوتن بر پایه آرد ذرت، مشخص شد که افزودن آنزیم تا سطح ۰/۷۵ درصد موجب کاهش قابل توجه تخلخل گردیده است [٤٤]. بررسی‌های دلوژوسکا و همکاران [٤۵] نیز اثربخشی افزودن ترانس‌گلوتامیناز بر کیفیت نان بدون گلوتن را تأیید کرده و نشان دادند که این آنزیم موجب کاهش تخلخل محصول نهایی می‌شود.

شکل c-۲ اثرات متقابل هر دو آنزیم بر میزان تخلخل نمونه‌های نان را نشان می‌دهد؛ با توجه به این نمودار، افزایش غلظت‌های مختلف ترانس‌گلوتامیناز موجب کاهش و افزودن آلفاآمیلاز منجر به افزایش تخلخل نمونه‌های نان نسبت به نمونه شاهد گردیده است. به طور کلی، بیشترین میزان تخلخل (۳۷/۷۰ درصد) مربوط به نمونه‌ای است که حاوی ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز بدون ترانس‌گلوتامیناز بوده و کمترین تخلخل (۳۰ درصد) به نمونه‌ای با ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز بدون آلفاآمیلاز تعلق دارد.

٤- نتیجه‌گیری کلی

نان گندم، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اقلام غذایی در سراسر جهان، نقش مهمی در تأمین انرژی و پروتئین روزانه انسان دارد. در میان انواع نان، نان سفید به‌دلیل ویژگی‌های حسی مطلوب‌تر نظیر رنگ روشن، بافت نرم و طعم دلپذیر، با استقبال بیشتری از سوی مصرف‌کنندگان مواجه شده است. فرآیند تولید نان سفید مستلزم حذف سبوس گندم در مرحله آسیاب است؛ اقدامی که گرچه به بهبود ویژگی‌های ارگانولپتیک محصول نهایی کمک می‌کند، اما منجر به کاهش قابل‌توجهی در ارزش تغذیه‌ای نان، به‌ویژه از نظر فیبر غذایی، ویتامین‌ها و املاح معدنی می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از آرد کامل در تولید نان، اگرچه از نظر تغذیه‌ای مطلوب‌تر است، اما با چالش‌هایی در کیفیت نهایی محصول همراه است؛ از جمله کاهش حجم ویژه، افت نرمی و تردی بافت، و تسریع فرآیند بیاتی. برای رفع این محدودیت‌ها، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده‌اند که یکی از مؤثرترین آن‌ها، بهره‌گیری از افزودنی‌های زیست‌فناورانه مانند آنزیم‌هاست. در این میان، آنزیم‌های ترانس‌گلوتامیناز میکروبی و آلفاآمیلاز با تأثیر بر ساختار شبکه گلوتنی و بهبود خصوصیات رئولوژیکی خمیر، نقش مهمی در ارتقای کیفیت نان تولیدی ایفا می‌کنند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، افزودن آنزیم آلفاآمیلاز منجر به افزایش پارامترهای حجم مخصوص و تخلخل نان گردید که نشان‌دهنده بهبود در ساختار و هوادهی محصول نهایی است. در مقابل، استفاده از آنزیم ترانس‌گلوتامیناز موجب کاهش این دو پارامتر شد که می‌تواند ناشی از تقویت شبکه گلوتنی و فشردگی بیشتر بافت خمیر باشد. در میان تیمارهای مورد بررسی، ترکیب

آنزیم ترانس‌گلوتامیناز در سطح ۰/۳ درصد و آلفاآمیلاز در سطح ۰/۲ درصد بهترین عملکرد را از نظر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی نشان دادند. برای ارزیابی دقیق‌تر، آزمون‌های فارینوگراف و اکستنسوگراف بر روی خمیرهای منتخب انجام شد. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که نمونه حاوی ۰/۳ درصد ترانس‌گلوتامیناز دارای بیشترین میزان جذب آب و کمترین درجه سستی بود، که بیانگر تقویت ساختار خمیر و افزایش توانایی نگهداری آب است. در مقابل، نمونه حاوی ۰/۲ درصد آلفاآمیلاز کمترین میزان جذب آب و پایداری را داشت و بالاترین درجه سستی را نشان داد، که می‌تواند به فعالیت هیدرولیتیکی آنزیم و تخریب نسبی ساختار گلوتنی مرتبط باشد. همچنین، نمونه شاهد (بدون افزودن آنزیم) بالاترین میزان پایداری و کشش‌پذیری را در آزمون اکستنسوگراف از خود نشان داد، که بیانگر حفظ ساختار طبیعی خمیر بدون دخالت آنزیمی است.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان بابت پشتیبانی مالی از این تحقیق اعلام می‌دارند.

دسترسی به داده‌ها: بنا به درخواست در دسترس قرار خواهند گرفت.

تضاد منافع

نویسندگان هیچگونه تضاد منافعی ندارند.

بیانیه تأمین مالی

هیچ بودجه جداگانه‌ای برای این تحقیق دریافت نشده است.

مشارکت نویسندگان

رقیه حسن بیگی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل رسمی، منابع، نگارش – پیش‌نویس اولیه.

حسین جوینده: مفهوم‌سازی، مدیریت پروژه، تحقیق، مصورسازی، روش‌شناسی، اعتبارسنجی، نگارش – بررسی و ویرایش.

محمد حجتی: مفهوم‌سازی، مصورسازی، روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی.

حسن برزگر: تحقیق، روش‌شناسی، نرم‌افزار، تحلیل رسمی.

۶- منابع

[1] Hafiz, M., and Sheikholeslami, Z. (2020). Optimization of loaf bread formulation including Farsi and Basil Gum. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 16(4): 395-408. (In Persian)

[2] Lin, W. and Lineback, O.R. (1990). Changes in carbohydrate fractions in enzyme supplemented bread and the potential relationship to staling. *Starch*, 42(10): 385-394.

[3] Jooyandeh, H., Minhas K.S. and Kaur A. (2009). Sensory Quality and Chemical Composition of Wheat Breads Supplemented with Fermented Whey Protein Concentrate and Whey Permeate. *Journal of Food Science and Technology*, 46(2): 146-148.

[4] Jooyandeh, H., and Minhas, K.S. (2021). Utilization of fermented whey protein concentrate and whey permeate in beard loaf making. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 4(2): 186-192.

[5] Jooyandeh, H. (2009). Evaluation of Physical and Sensory Properties of Iranian Lavash Flat Bread Supplemented with Precipitated Whey Protein (PWP). *African Journal of Food Science*, 3(2): 028 -034.

[6] Movahhed, S., Zharfi, S., and Ahmadi Chenarbon, H. (2014). Investigation of Rheological of Dough and Organoleptical Properties of Toast Breads Containing Banana Flour. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 9(4): 359-365.

[7] Rosell, C.M., Rojas, J.A., and Benedito de Barber, C. (2001). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, 15(1): 75-81.

[8] Hanee, M. and Dmoor, A. (2012). Flat bread: ingredients and fortification. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 4: 2-8.

[9] Haghpanah Kouchesfahani, M., Tayefe, M., Sadeghi, S.M., Nasrollahzade Masoole, A., and Fadaee, L. (2022). Evaluation of the effect of adding α-amylase and ascorbic acid on rheological properties of wheat flour dough. *Journal of Food Science and Technology* (Iran), 121(18): 69-79. (In Persian)

[10] Jooyandeh, H. (2024). *Application of enzymes in dairy products*. 2nd ed., Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University Press. (In Persian)

[11] Shafisoltani, M., Salehifar, M., and Hashemi, M. (2014). Effects of enzymatic treatment using response surface methodology on the quality of bread flour. *Food Chemistry*, 148: 176-183.

[12] Saeidi, Z., Nasehi, B., and Jooyandeh, H. (2019). Evaluation of Physical properties of gluten-free cake containing pomegranate seeds powder and transglutaminase enzyme. *Journal of Food Science and Technology* (Iran), 15(84): 315–324. (In Persian)

[13] Meerts, M., Van Ammel, H., Meeus, Y., Van Engeland, S., Cardinaels, R., Oosterlinck, F., Courtin, Ch. M., and Moldenaers, P. (2017). Enhancing the rheological performance of wheat flour dough with glucose oxidase, transglutaminase or supplementary gluten. *Food and Bioprocess Technology*, 10(12): 2188-2198.

[14] Bagagli, M. P., Jazaeri, S., Bock, J. E., Seetharaman, K., and Sato, H. H. (2014). Effect of transglutaminase, citrate buffer, and temperature on a soft wheat flour dough system. *Cereal Chemistry*, 91(5): 460-465.

[15] Institute of Standard and Industrial Research of Iran. NO. 3246-1. (2015). Cereals and cereal products – Determination of moisture content – Part 1: Reference method. (In Persian)

[16] Alirezaei, N., and Barzegar, H. (2018). Studying the effect of inulin and guar hydrocolloids on the rheological properties of dough and bread texture using response surface modeling (RSM). *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 10(1): 119-129. (In Persian)

[17] Institute of Standard and Industrial Research of Iran. NO. 3246-2. (2014). Cereals and cereal products – Determination of moisture content – Part 1: Reference method. (In Persian)

[18] Asad Zadeh, Sh., and Nazari Far, E. (2019). Optimization of Inflential Factors (Glucose Oxidase, Ascorbic Acid and Guar Gum) on Rheological Properties of Wheat-Flour Dough Using Response Surface Methodology (RSM). *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 11(3): 73-86. (In Persian)

[19] Sheikholeslami, Z., Karimi, M., Ghiafeh Davoodi, M., and Mahfouzi, M. (2021). Effect of flour extraction rate and amylase and xylanase on texture and sensory properties of Barbari bread. *Journal of Food Science and Technology* (Iran), 17(107): 51-65. (In Persian)

[20] Naji-Tabasi, S., and Mohebbi, M. (2014). Evaluation of cress seed gum and xanthan gum effect on macrostructure properties of gluten-free bread by image processing. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 9(1): 110-119.

[21] Sanz Penella, J.M., Collar, C., and Haros, M. (2008). Effect of wheat bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread. *Journal of Cereal Science*, 48: 715-721.

[22] Kuraishi, C., Nakagoshi, H., Tanno, H., and Tanaka, H. (2000). Application of transglutaminase for food processing. *Hydrocolloids*, 281-285. https://doi.org/10.1016/B978-044450178-3/50096-2.

[23] Marco, C., and Rosell, C.M. (2008). Breadmaking performance of protein enriched, gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, 227: 1205–1213.

[24] Wang, J.Sh., Zhao, M.M., Yang, X.Q., Jiang, Y.M., and Chun, C. (2007). Gelation behavior of wheat gluten by heat treatment followed by transglutaminase cross-linking reaction. *Food Hydrocolloids*, 21(2): 174-179.

[25] Habibi, S.A., and Jooyandeh, H. (2024). Investigation on the Effect of Persian Gum and Transglutaminase Enzyme on Some Physicochemical and Microstructural Characteristics of Low-Fat Ultrafiltrated Iranian White Cheese. *Food Science & Nutrition*, 12(11): 9810-9821.

[26] David, I., Rinovetz, A., Bujancă, G., Miscă, C., and Danci, M. (2014). The influence of different types of amylase on the bread dough determined through alveographic method. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies,* 20(2): 165-170.

[27] Watanabe, T., and Van Hoorn, J. W. (2000). Effect of transglutaminase on the viscoelastic

properties of wheat gluten and dough. *Cereal Chemistry*, 77(2): 252-257.

[28] Peres, G.L., Leite, D.C., and Silveira, N.P.D. (2015). Ultrasound effect on molecular weight reduction of amylopectin. *Starch*, 67: 407-414.

[29] Bauer, N., Koehler, P., Wieser, H., and Schieberle, P. (2003). Studies on Effects of Microbial Transglutaminase on Gluten Proteins of Wheat. II. Rheological Properties, *Cereal Chemistry*, 80(6): 787-790.

[30] Saeidi, Z., Nasehi, B., and Jooyandeh, H. (2018). Optimization of gluten-free cake formulation enriched with pomegranate seed powder and transglutaminase enzyme. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8): 3110–3118.

[31] Lauber, S., Henle, T. and Klostermeyer, H. (2000). Relationship between the crosslinking of caseins by transglutaminase and the gel strength of yoghurt. *European Food Research & Technology,* 210: 305–309.

[32] Verheyen, C., Albrecht, A., Elgeti, D., Jekle, M., and Becker, T. (2015). Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality. *Food Research International*, 76(3): 860-866.

[33] Benejam, W., Steffolani, M.E., and Leo´n, A.E. (2009). Use of enzyme to improve the technological quality of a panettone like baked product. *International Journal of Food Science and Technology*, 44: 2431–2437.

[34] Wang, X., Pei, D., Teng, Y., and Liang, J. (2018). Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism. *Journal of Food Science and Technology*, 55: 389–398.

[35] Liu, W., Brennan, M.A., Serventi, L., and Brennan, C.S. (2017). Effect of cellulase, xylanase and a-amylase combinations on the rheological properties of Chinese steamed bread dough enriched in wheat bran. *Food Chemistry*, 234: 93–102.

[36] Pourmohammadi, K., Aalami, M., Shahedi, M., and Sadeghi Mahoonak, A.R. (2011). Effect of microbial transglutaminase on dough rheological properties of wheat flour supplemented with hull-less barley flour. *Food Research Journal*, 21(3): 269-279. (In Persian)

[37] Steffolani, M.E., Ribotta, P.D., Perez, G.T., Puppo, M.C., and León, A.E. (2012). Use of Enzymes to Minimize Dough Freezing Damage. *Food Bioprocess Technolology*, 5(6): 2242-55.

[38] Gerrard, J.A., Fayle, S.E., Brown, P.A., Sutton, K., Simmons, L., and Rasiah, I. (2001). Effects of Microbial Transglutaminase on the Wheat Proteins of Bread and Croissant Dough. *Journal of Food Science*, 66(6): 782 – 786

[39] Pouresmaeil, N., Azizi, M.H., Abbasi, S., and Mohamadi, M. (2011). Formulation of Gluten Free Bread Using Guar and Microbial Transglutaminase Enzyme. *Journal of Food Industry Research*, 21(1): 69-81. (In Persian)

[40] Basman, A., Köksel, H., and Ng, P.K. (2002). Effects of increasing levels of transglutaminase on the rheological properties and bread quality characteristics of two wheat flours. *European Food Research and Technology*, 215: 419–424.

[41] Karimi, M., Sheikholeslami, Z., Ghiafehdavoodi, M., and Ghods-rohani, M. (2023). Investigating the effect of emulsifiers and enzymes on the physicochemical and organoleptic characteristics of flat bread fermented by direct and sponge method. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 6(1): 18-25.

[42] Zeng, J., Gao, H., Li, G., and Liang, X. (2011). Alpha-amylase and Glucose Oxidase as Promising Improvers for Wheat Bread. *Fourth International Conference on Information and Computing*, Phuket, Thailand, 522-524.

[43] Shin, M., Gang, DO., and Song, JY. (2010). Effects of protein and transglutaminase on the preparation of gluten-free rice bread. *Food Science and Biotechnology*, 19: 951–956.

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

[45] Dłużewska, E., Marciniak-Lukasiak, K. and Kurek, N. (2015). Effect of transglutaminase additive on the quality of gluten-free bread. *Foods*, 13(1): 80-86.

Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Evaluation of the effect of alpha-amylase and transglutaminase enzyme treatment on the rheological properties of dough and some baking characteristics of hamburger buns prepared from whole wheat flour

Roghayeh Hasan Beygi[1], Hossein Jooyandeh[*2], Mohammad Hojjati[2], Hasan Barzegar[3]

1- M.Sc., Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2- Professor, Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

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

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2025/10/17

Review: 2025/12/12

Accepted: 2026/12/17

Keywords:

α-amylase,

Bread,

Extensograph,

Farinograph,

Microbial Transglutaminase.

DOI: 10.48311/fsct.2026.117111.82898

*Corresponding Author E-hosjooy@asnrukh.ac.ir

ABSTRACT

Bread, as a staple food in many countries, requires quality optimization within the baking industry. White bread is highly popular due to its appealing appearance and soft texture; however, the removal of bran during its production leads to a reduction in fiber, vitamins, and minerals. In contrast, whole wheat flour offers higher nutritional value but results in decreased loaf volume, reduced porosity, and accelerated staling. To address these challenges, this study investigated the effects of two enzymes, α-amylase (at levels of 0%, 0.1%, and 0.2%) and microbial transglutaminase (at levels of 0%, 0.15%, and 0.3%), on the rheological properties of bread dough (including water absorption, dough stability, degree of softening, extensibility, and resistance to extension), as well as on porosity and specific volume of whole-wheat bread. The results showed that α-amylase increased specific volume and porosity, while transglutaminase reduced these parameters ($p<0.001$). Furthermore, farinograph and extensograph tests revealed that transglutaminase enhanced water absorption and reduced dough softening, whereas α-amylase decreased dough stability and increased softening ($p<0.05$). The control sample exhibited the highest extensibility and dough stability. Therefore, by using these enzymes at appropriate levels during bread production from wholemeal flour (0.1% alpha-amylase and 0.15% transglutaminase), it is possible to produce a product with higher nutritional value and acceptable rheological characteristics.