

Research Article
Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 111-127

The Effect of Dual Modification (Fermentation-Extrusion) on the Functional and Qualitative Characteristics of Chickpea-Quinoa Composite Flour and Gluten-Free Muffin Cake Compared to Unprocessed Flour

Z. Korkinejad Gharaee¹, A. Koocheki¹, E. Milani^{2*}

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Iranian Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Khorasan Razavi, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: e.milani@jdm.ac.ir)

Received: 26.08.2025

Revised: 04.01.2026

Accepted: 31.01.2026

Available Online: 09.05.2026

How to cite this article:

Korkinejad Gharaee, Z., Koocheki, A., & Milani, E. (2026). The effect of dual modification (fermentation-extrusion) on the functional and qualitative characteristics of chickpea-quinoa composite flour and gluten-free muffin cake compared to unprocessed flour. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(2), 111-127. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.95085.1469>

Introduction

Celiac disease is an autoimmune disorder of the small intestine triggered by gluten consumption. The only effective treatment is to follow a strict, lifelong gluten-free diet. However, commercially available gluten-free products often face limitations in terms of quality attributes, such as undesirable texture, poor flavor, and low nutritional value. Consequently, recent research has focused on improving the quality of these products by using alternative flours rich in protein and fiber and employing novel processing methods. Chickpea and quinoa are considered ideal sources for this purpose due to their high nutritional value. However, their use presents challenges, such as off-flavors and poor performance in baking processes. Modification processes like fermentation and extrusion can address these issues by improving the functional, nutritional, and sensory properties of composite flours. This study aimed to investigate the effect of a dual fermentation-extrusion process on the properties of chickpea-quinoa composite flour and the quality of gluten-free muffin cakes produced from it.

Materials and Methods

To prepare the dough, water, sugar, and *Saccharomyces cerevisiae* were added to the modified flour, and the mix was fermented for 24 hours at 37°C. The dough was then dried and subjected to an extrusion process using a twin-screw extruder. Subsequently, two types of flour (modified and raw) along with three different levels of xanthan gum (0, 0.15, and 0.3%) were used to produce gluten-free muffin cakes based on a standard formulation. The physicochemical properties of the flours, including moisture, protein, fat, fiber, ash, phenolic compounds, and antioxidant activity, were measured according to standard methods. Water absorption and solubility indices (WAI and WSI) were also calculated. To evaluate the produced cakes, parameters such as baking loss, porosity (using image processing), texture hardness (over 7 days of storage), crust color brightness, and sensory attributes (using a five-point hedonic test) were determined. Statistical analyses were performed using a factorial design and Tukey's test at a 95% confidence level.

Results and Discussion

The results of the flour comparison showed that the modified flour, compared to the raw flour, had lower moisture (5.62% vs. 7.13%), higher protein (22.36% vs. 19.84%), higher antioxidant activity (60.47% vs. 54.86%), and higher total polyphenol content (28.73 vs. 23.52 mg GAE/100g). Additionally, the water absorption (WAI) and water solubility (WSI) indices were significantly higher in the processed flour, which contributes to its improved functional properties. In the evaluation of the muffin cakes, samples containing modified flour and



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.95085.1469>

0.15% xanthan gum showed the lowest baking loss, highest porosity, and softest texture. The fermentation and extrusion processes modify the combined flour, by altering the structure of starch and protein, increasing water retention capacity and helped maintain moisture and improving the internal structure of the cake. The rate of texture hardening during the storage period was slower for samples containing modified flour and xanthan gum, indicating a delay in the staling process. Although the crust color of the cakes made from modified flour was darker, these samples received a higher overall acceptability score in the sensory evaluation. The dual processing significantly helped reducing the undesirable beany flavor and improving the aroma and flavor of the end product.

Conclusion

The combined fermentation–extrusion processing of chickpea–quinoa composite flour offers an effective green strategy to improve the nutritional, functional, and sensory quality of gluten-free baked goods. Fermentation enhances protein digestibility, mineral bioavailability, and flavor through bioactive peptide and organic acid formation, while extrusion improves starch gelatinization and protein denaturation, enhancing dough viscoelasticity and reducing off-flavors. The synergistic effect of these processes forms a gluten-like network that increases cake softness and shelf life. The optimal formulation modified chickpea–quinoa flour with 0.15% xanthan gum yielded the highest sensory acceptance, superior texture, and moisture retention, demonstrating the potential of biophysical methods in developing high-quality gluten-free bakery products.

Keywords: Chickpeas, Extrusion, Fermentation, Gluten Free, Quinoa

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۱۱-۱۲۷

تأثیر اصلاح دوگانه تخمیر- اکستروژن بر ویژگی‌های عملکردی و کیفی آرد کامپوزیت نخود- کینوا و کیک مافین فاقد گلوتن در مقایسه با آرد غیر فرآیندی

زهرا کورکی نژاد قرائی^۱- آرش کوچکی^۱ ID - الناز میلانی^۲ ID *

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

چکیده

بیماری سلیاک یک اختلال خودایمنی است که نیازمند رعایت رژیم غذایی فاقد گلوتن می‌باشد. با این حال، فرآورده‌های غذایی بدون گلوتن اغلب از نظر ویژگی‌های کیفی مانند بافت، طعم، و ارزش تغذیه‌ای محدودیت دارند. این مطالعه با هدف بهبود کیفیت کیک مافین بدون گلوتن از طریق استفاده از آرد ترکیبی نخود-کینوا با نسبت ۲۵-۷۵ درصد و تأثیر صمغ زانتان در سطوح ۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد انجام شد. آرد کامپوزیت نخود-کینوا ابتدا تحت فرآیند تخمیر با مخمر *Saccharomyces cerevisiae* و سپس اکستروژن در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، عملکردی و آنتی‌اکسیدانی آردهای خام و اصلاح‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج آرد اصلاح‌شده در مقایسه با آرد خام دارای مقادیر کمتر رطوبت (۵/۶۲ در مقابل ۷/۱۳ درصد) و مقادیر بالاتر پروتئین (۲۲/۳۶ در مقابل ۱۹/۸۴ درصد)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۶۰/۴۷ در مقابل ۵۴/۸۶ درصد)، پلی‌فنول کل (۲۸/۷۳ در مقابل ۲۳/۵۲ میلی‌گرم گالیک اسید بر ۱۰۰ گرم)، شاخص جذب آب (۷/۶۷ در مقابل ۵/۵۲) و شاخص حلالیت در آب (۳۶/۷۱ در مقابل ۳۵/۰۶) بود. سپس، کیک‌های مافین با سطوح مختلف زانتان تولید و پارامترهای افت پخت، تخلخل، سفتی بافت (طی ۷ روز نگهداری)، رنگ و خصوصیات حسی آن‌ها بررسی شد. بدین ترتیب، نمونه‌های حاوی آرد اصلاح‌شده و ۰/۱۵ درصد زانتان دارای کمترین افت پخت ۱۴/۱۲ درصد، بیشترین تخلخل ۴۳/۱۴ درصد و نرم‌ترین بافت (۲/۷۴ نیوتن در روز اول) بودند. طی دوره نگهداری، سفتی بافت در نمونه‌های حاوی آرد خام و فاقد زانتان به ۸/۹۷ نیوتن در روز هفتم رسید، در حالی که این مقدار برای نمونه‌های حاوی آرد اصلاح‌شده و ۰/۱۵ درصد زانتان تنها ۶/۱۳ نیوتن بود. اگرچه نمونه‌های حاوی آرد اصلاح‌شده رنگ تیره‌تری داشتند، اما از نظر امتیاز حسی کلی، به‌ویژه در پارامترهای عطر، طعم و بافت، برتری معنی‌داری نشان دادند. بدین ترتیب، استفاده از آرد کامپوزیت نخود-کینوا اصلاح‌شده به‌همراه ۰/۱۵ درصد صمغ زانتان، به‌طور همزمان منجر به افزایش ارزش تغذیه‌ای (پروتئین و آنتی‌اکسیدان)، بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (جذب آب و حلالیت)، بهبود کیفیت بافت (افزایش تخلخل و نرمی و کاهش نرخ بیاتی) و افزایش پذیرش حسی در کیک مافین بدون گلوتن می‌شود. این ترکیب، راهکاری مؤثر برای تولید محصولات بدون گلوتن با کیفیت مطلوب و ماندگاری بهتر ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پخت اکستروژن، تخمیر، کینوا، فرآورده فاقد گلوتن، نخود

مقدمه

(El Khoury, Balfour-Ducharme, & Joye, 2018). از این رو، پژوهش‌های متعددی به دنبال بهبود کیفیت محصولات فاقد گلوتن از طریق به‌کارگیری روش‌های فرآوری مناسب و استفاده از ترکیبات جایگزین غنی از پروتئین و فیبر هستند (Karimi Abdul Maleki, Ziaee Far, Keshiri, Fathi, & Aalami, 2018).

در سال‌های اخیر، توجه به تولید فرآورده‌های غذایی بدون گلوتن به‌ویژه برای افراد حساس به گلوتن، افزایش چشمگیری یافته است. با این حال، حذف گلوتن از فرمولاسیون مواد غذایی می‌تواند تأثیر منفی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، بافتی و حسی محصولات داشته باشد

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی، جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: e.milani@jdm.ac.ir)

حلالیت، افزایش محتوای فنولی، فعالیت آنتی اکسیدانی و پذیرش کلی بالاتر نمونه‌ها نسبت به فرآورده‌های تولیدی از آرد خام گردید.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر اصلاح دوگانه تخمیر-اکستروژن بر ویژگی‌های آرد کامپوزیت نخود-کینوا و کیک مافین فاقد گلوتن تولید شده طراحی گردید. برای این منظور تأثیر آرد کامل فرآیند شده نخود-کینوا و آرد غیر فرآیند شده به همراه سطوح مختلف صمغ زانتان بر ویژگی‌های خمیر و کیک در طول دوره نگهداری بررسی و مقایسه شد. نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه‌ساز تولید محصولات غذایی با ارزش تغذیه‌ای بالا و کیفیت مطلوب برای مصرف‌کنندگان حساس به گلوتن باشد.

مواد و روش‌ها

اصلاح آرد کامپوزیت توسط فرآیندهای اکستروژن و تخمیر

در این پژوهش آرد کامل نخود از مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه و آرد خلر از شرکت وفایی مهر کاشمر تهیه شد. برای تهیه آرد فرآیند شده، ابتدا فرمولاسیون آرد بهینه با نسبت ۷۵:۲۵ آرد کامل نخود: آرد کامل کینوا تهیه و سپس به‌منظور انجام فرآیند تخمیر، آب دوبار تقطیر به میزان ۸۵ درصد وزن خشک آرد افزوده شده، میزان افزودن مخمر *Saccharomyces cerevisiae* ۱۷۷ PTCC (سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران) و شکر نیز به ترتیب معادل ۳ و ۲ درصد وزن خمیر تعیین گردید. به‌منظور انجام تخمیر، نمونه‌ها در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت گرمخانه‌گذاری شده و سپس برای رسیدن به رطوبت نهایی ۱۰ درصد نمونه‌ها تحت دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد، داخل آون نگهداری شدند. به‌منظور انجام فرآیند اکستروژن از دستگاه اکستروژن دو مارپیچی مدل DS۵۶ ساخت شرکت Jians Saxin کشور چین مستقر در پایلوت اکستروژن جهاد دانشگاهی خراسان رضوی استفاده شد. مقدار ورودی خوراک ۱/۵ کیلوگرم و شرایط بهینه فرآیند شامل سرعت چرخش ۱۷۰ RPM، دما ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت خوراک ورودی ۱۸/۹۴ درصد، قطر قالب ۳ میلی‌متر و سرعت تغذیه برابر با ۴۰ کیلوگرم بر ساعت، در نظر گرفته شد. نمونه‌های بافت داده شده پس از خروج، برای رسیدن به رطوبت زیر ۱۰ درصد در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس توسط آسیاب صنعتی توش‌شکن خراسان، پودر و با مش شماره ۴۰ الک شدند. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های زیپ‌دار کدگذاری شده تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند (Afsharfar, BeigMohammadi, Milani, & Jafari, 2025).

دانه کینوا منبع غنی از فیبرهای تغذیه‌ای، ترکیبات فنلی، ویتامین‌های گروه ب، و مواد معدنی مانند آهن، مس، منگنز و پتاسیم، اسیدهای چرب امگا۶ و ویتامین ای بوده و پروتئین آن بیش از دو برابر غلاتی مانند ذرت و برنج بوده و از تعادل مناسبی از اسیدهای آمینه ضروری برخوردار است (Diaz, Sundarajan, Lampi, Tenitz, & Jouppila, 2017). نخود نیز با دارا بودن شاخص گلیسمی پایین، منبع غنی از فیبر حدود ۱۰-۱۵ درصد و پروتئین حدود ۲۲-۲۸ درصد، سرشار از ترکیبات پلی‌فنولی و ریز مغذی‌ها نظیر آهن، منیزیم و روی است.

پروتئین نخود حاوی اسیدهای آمینه ضروری مانند لیزین هستند که در ترکیب با کینوا ارزش بیولوژیکی بالاتری پیدا می‌کنند (Hamdani, Wani, & Bhat, 2020).

اگرچه نخود و کینوا از نظر ارزش غذایی بسیار مطلوب بوده و فاقد گلوتن هستند، اما مصرف گسترده آنها در بسیاری از نقاط جهان با چالش‌هایی نظیر مدت زمان طولانی پخت، وجود طعم نامطلوب شبیه به لوبیا، حضور ترکیبات نامطلوب مانند اسید فیتیک و مواد ایجادکننده نفخ و عملکرد ضعیف در فرآیندهای پخت، همراه است (Diaz et al., 2017).

فرآیندهای اصلاح فیزیکی و زیستی مانند تخمیر و اکستروژن می‌توانند به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای بهبود ویژگی‌های عملکردی، فیزیکوشیمیایی و تغذیه‌ای آردهای کامپوزیت مورد استفاده قرار گیرند. تخمیر به کاهش ترکیبات ضدتغذیه‌ای، بهبود قابلیت هضم پروتئین، عطر و طعم و تغییر ویژگی‌های رئولوژیکی کمک می‌کند (Sahin, Gautheron, & Galle, 2024)، در حالی که فرآیند اکستروژن، با تلفیق انرژی مکانیکی و حرارتی، منجر به پیش‌ژلاتینه شدن نشاسته، واسرشته‌شدن پروتئین، تخریب جزئی یا کلی ساختار بلوری و تشکیل کمپلکس‌های نشاسته-پروتئین شده و با ایجاد تغییرات ساختاری در ماتریس پلیمری آرد، می‌تواند منجر به بهبود ویژگی‌های محصول نهایی شود (Hamdani et al., 2020).

ترکیبات هیدروکلوئیدی با ایجاد ویسکوزیته، حفظ رطوبت و تشکیل شبکه‌های ژلی، پایداری گازهای تولید شده توسط مخمر یا بیکینگ پودر را حین پخت کیک افزایش داده و عملکرد گلوتن را شبیه‌سازی نموده و سبب افزایش حجم و نرمی محصول نهایی می‌گردد (Yağcı, Altan, & Doğan, 2020).

در مطالعه رانی و همکاران (Rani, Kumar, & Ranjan, 2017) و ساحین و همکاران (Sahin et al., 2024)، فرآورده‌های با ارزش غذایی بالا از طریق اصلاح دوگانه اکستروژن-تخمیر تولید شد. نتایج نشان داد که اصلاح دوگانه آرد سبب افزایش شاخص

فرمولاسیون خمیر مافین

به منظور تولید کیک مافین مواد اولیه مطابق **جدول ۱** تهیه و فرموله شدند. در تیمارهای حاوی سطوح مختلف زانتان، صمغ همراه با شیر پس از یک شبانه روز آبیگری، به مواد اضافه و خمیرها کدگذاری شدند.

جدول ۱- فرمولاسیون پایه مافین
Table 1- Basic muffin formulation

مقدار Amount (g)	ترکیب Formulation
100	آرد Flour
70	تخم مرغ Egg
70	شکر Sugar
55	روغن مایع Oil
12	پودر شیر خشک Skim milk
4.5	پودر بکینگ پودر Baking powder
38	آب Water

از عصاره مورد نیاز تا ۵۰ درصد از رادیکال‌های آزاد DPPH مهار گردد) توسط معادله خطی نمودار درصد بازدارندگی بر حسب غلظت عصاره متانولی محاسبه گردید (Hashemi, & Milani, 2024).

شاخص جذب آب (WAI) و حلالیت در آب (WSI) آردهای

فرآیند شده و خام

۲/۵ گرم از نمونه به فالکن ۵۰ میلی‌لیتری از قبل توزین شده منتقل شد و ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر به آن افزوده و توسط ورتکس به مدت ۲ دقیقه هم زده شد. مخلوط حاصل در ۳۰۰۰g برای ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. مایع رویی را جدا کرده و لوله حاوی ژل توزین شد. شاخص جذب آب بر حسب گرم آب باند شده توسط ۲/۵ گرم از نمونه بر مبنای وزن خشک محاسبه شد. برای تعیین شاخص حلالیت مایع رویی خارج شده از فالکن در آزمایش قبل، به پلیت از پیش توزین شده انتقال یافته و تا تبخیر کامل در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. درصد وزن رسوبات خشک به وزن نمونه اولیه به عنوان شاخص حلالیت در آب منظور گردید (Demarinis, Verni, Pinto, Rizzello, & Baruzzi, 2022).

درصد افت وزنی پخت

برای اندازه‌گیری درصد افت وزنی، نمونه‌های کدگذاری شده قبل از پخت و پس از آن توزین شدند. درصد افت وزنی از نسبت وزن خمیر قبل از پخت به وزن کیک بعد از پخت محاسبه شد (Rani, Kumar, Purohit, & Rao, 2021).

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آرد کامپوزیت فرآیند شده

و خام

به منظور اندازه‌گیری رطوبت، پروتئین، خاکستر، چربی، فعالیت آبی و فیبر از روش AOAC، 2002 استفاده شد.

تعیین میزان فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی

بدین منظور ابتدا چربی نمونه‌ها به نسبت ۵:۱ با هگزان فیلتر گردید. سپس عصاره متانولی نمونه‌ها توسط اختلاط ۰/۵ گرم از نمونه‌های آرد با ۱۰ میلی‌لیتر متانول برای ۳۰ دقیقه، استخراج شد. به منظور آنالیز محتوای کل ترکیبات فنولی؛ ۲۰ میکرولیتر از محلول عصاره ۱/۵ میلی‌لیتر معرف فولین سیکالتو رقیق شده مخلوط و ۱/۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم (۶۰g/L) به آنها افزوده شد. مخلوط برای ۶۰ دقیقه در تاریکی قرار داده شد و جذب آنها توسط اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۲۵ نانومتر خوانش گردید. محلول استون/آب به عنوان شاهد و محلول اسید فرولیک به عنوان محلول استاندارد استفاده شد. میزان کل ترکیبات فنلی موجود در عصاره با استفاده از معادله بدست آمده از منحنی استاندارد محاسبه و نتایج بر حسب میلی‌گرم اسید فرولیک در هر گرم عصاره بیان شد. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و میانگین آنها گزارش شد. اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از معرف دی فنیل پیکریل هیدرازیل یا DPPH انجام شد؛ بدین منظور، ۲ میلی‌لیتر از محلول DPPH با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر به ۲ میلی‌لیتر از عصاره نمونه با غلظت‌های مختلف ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزوده و برای ۳۰ دقیقه گرمخانه‌گذاری گردید و جذب مخلوط‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر، در مقابل شاهد (۲ میلی‌لیتر متانول + ۲ میلی‌لیتر DPPH) خوانش گردید. مقادیر IC50 (غلظتی

سفتی بافت کیک در طول دوره نگهداری

بافت کیک‌های تولیدی با استفاده از دستگاه بافت‌سنج TA Plus ارزیابی شد. قطعاتی از کیک با ابعاد $2/5 \times 2/5$ سانتی‌متر برش خورده و تحت اثر آزمون فشردگی قرار داده شدند. مشخصات پروب با قطر ۳۰ میلی‌متر و لود سل ۵ کیلوگرم، سرعت حرکت پروب قبل از فشار و در حین نفوذ ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه و عمق نفوذ معادل ۷۰ درصد ارتفاع کیک در نظر گرفته شد؛ بدین ترتیب نیرو در نقطه ماکزیمم پیک اول منحنی نیرو-فاصله به عنوان سفتی بافت تعیین گردید (Gomes *et al.*, 2015).

تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش از طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی به منظور بررسی تأثیر نوع آرد فرآوری شده و غیر فرآوری شده به همراه سطوح مختلف صمغ زانتان (۰، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد) بر کیک فاقد گلوتن استفاده شد. به منظور تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Minitab بهره گرفته و مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چنددامنه‌ای توکی و همچنین آزمون *t* در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

مقایسه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، تغذیه‌ای و عملکردی

مواد اولیه

تغییرات ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی آردهای خام، آردهای کامپوزیت نخود؛ کینوا متأثر از فرآیند تخمیر و اکستروژن در جدول ۲ قابل مشاهده است. بر اساس یافته‌های ارائه شده، نمونه اکستروژن شده تخمیری با میانگین $5/62$ درصد کمترین رطوبت را داشت که تفاوت معنی‌داری ($p > 0/05$) با آرد کامپوزیت خام ($7/13$ درصد) داشت. کاهش معنی‌دار ($p < 0/05$) رطوبت در تمام نمونه‌های اکستروژن تخمیری نسبت به نمونه‌های خام ناشی از ویژگی‌های پخت اکستروژن به عنوان فناوری تولید غذاهای پخته و خشک شده است. در واقع، کاهش رطوبت هزینه‌های خشک کردن پس از اکستروژن را کاهش و ماندگاری محصول را افزایش می‌دهد.

در خصوص تغییرات پارامتر pH، همانطور که مشاهده می‌شود، بالاترین مقدار pH ($6/71$) مربوط به آرد کامپوزیت خام و کمترین مقدار ($6/11$) مربوط به آرد اصلاح شده بود. مخمرها و باکتری‌های لاکتیکی برای سوخت و ساز، کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و مواد تجزیه شده حاصل از آنها را مصرف کرده، گاز کربن دی اکسید و همچنین اسید لاکتیک و استیک اسید تولید می‌کنند که منجر به کاهش pH می‌شود (Rani *et al.*, 2021).

تغییرات pH طی فرآیند پخت اکستروژن، ناشی از ژلاتینه شدن نشاسته و دناتوره شدن پروتئین می‌باشد. از دست دادن ساختار سه‌بعدی پروتئین، سبب آزاد شدن نقاط اتصال برای یون‌های هیدروژن شده؛ در نتیجه تعداد یون‌های H^+ آزاد در محیط کاهش می‌یابد. طی ژلاتیناسیون نشاسته نیز ساختار مارپیچی آمیلوز باز شده و با یون‌های H^+ آزاد پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند، این واکنش به کاهش یون‌های H^+ آزاد منجر شده و pH آرد اصلاح شده بیشتر از آرد خام می‌باشد (Salehi, Rostamian, & Milani, 2011).

طی روش‌های فرآوری، میزان پارامترهای چربی، پروتئین، فیبر افزایش یافت. نمونه اکستروژن شده تخمیر شده با میانگین $3/23\%$ کمترین میزان خاکستر را داشت که تفاوت معنی‌داری ($p < 0/05$) با

ارزیابی روشنایی رنگ پوسته کیک

آنالیز روشنایی رنگ پوسته کیک و شاخص قهوه‌ای شدن آن (معادله ۱)، به وسیله دستگاه هانت‌رلب انجام شد. L^* بیانگر میزان تیرگی و روشنی کیک است که محدوده‌ای بین صفر (کاملاً تیره) تا ۱۰۰ (کاملاً روشن) را در بر می‌گیرد (Chinma, Khouryieh, & Aramouni, 2025).

$$BI = [100 * (x - 0.31)] / 0.17 \quad (1)$$

$$x = (a + 1.75 L^*) / (5.645 L^* + a^* - 3.012b^*)$$

تخلخل

به منظور ارزیابی میزان تخلخل از تکنیک پردازش تصویر استفاده خواهد شد. بدین منظور در فاصله زمانی ۲ ساعت پس از پخت، تصاویری به ابعاد ۲ در ۲ سانتی‌متری از مغز نمونه‌های کیک توسط دوربین دیجیتال کانن (مدل IS 3400A) گرفته و سپس با فعال کردن قسمت ۸ بیت نرم‌افزار Image J12، تصاویر سطح خاکستری ایجاد شد. در نهایت تصاویر به صورت نقاط تیره و روشن درآمدند. از این رو هر چه نسبت قسمت روشن به تاریک بیشتر باشد، میزان حفرات موجود در کیک بیشتر است (Marston *et al.*, 2016).

ویژگی‌های حسی

خصوصیات حسی کیک توسط ۱۰ نفر پانلیست و به روش امتیازدهی هدونیک پنج نقطه‌ای و ارزیابی شد. امتیازات بین ۱ (بسیار بد) تا ۵ (بسیار خوب) در نظر گرفته شد. امتیاز پذیرش کلی نمونه‌های کیک برآزش کلی از همه فاکتورهای مورد بررسی شامل فرم و شکل، پوکی و تخلخل، سفتی و نرمی بافت، قابلیت جویدن و عطر و طعم بود (Sabater *et al.*, 2024).

مخمر *Saccharomyces cerevisiae* با تولید پروتئازهای داخلی، پروتئین‌های حبوبات (مانند لگومین و ویسلیلین) را به پپتیدهای کوچک‌تر و اسیدهای آمینه آزاد تبدیل می‌کند. این امر قابلیت هضم پروتئین (IVPD) را تا ۱۵-۲۰٪ افزایش می‌دهد. تخمیر باعث آزادسازی لیزین، متیونین و تریپتوفان شده که در حبوبات معمولاً محدود هستند (Olmos et al., 2024).

افزایش جذب آب آرد فرآیند شده ممکن است با محتوای پروتئین بالاتر آن مرتبط باشد که دسترسی گروه‌های قطبی قادر به برهم‌کنش با مولکول‌های آب را افزایش می‌دهد. در مورد ظرفیت جذب آب بهبود یافته در نمونه فرآیند، این امر را می‌توان به تغییرات ساختاری در ماکرومولکول‌ها در طول فرآیند تخمیر نسبت داد (López et al., 2025). در واقع؛ می‌تواند ناشی از هیدرولیز جزئی نشاسته توسط آنزیم‌های آمیلولیتیک مخمر بوده و با افزایش تعداد گروه‌های هیدروکسیل آزاد ظرفیت جذب آب را تا ۳۰٪ بهبود می‌بخشد. دنا توراتسیون پروتئین‌ها و افزایش گروه‌های قطبی (مانند NH_2 و COOH)، باعث اتصال بهتر آب می‌شود (Demarinis et al., 2022). مقادیر بالای WAI به حفظ رطوبت محصول کمک کرده و امکان افزودن آب بیشتر به خمیر را فراهم می‌کند که منجر به بهبود ویژگی‌های فرآیندی می‌شود. قابلیت جذب آب بالا برای تولید سوپ، فرنی فوری، پودینگ، محصولات گوشتی، نان و کیک مطلوب است. تعامل پروتئین-آب تأثیر بیشتری نسبت به رابطه آمیلوز/آمیلولکتین-آب بر شاخص حلالیت در آب WSI دارد. از این رو نمونه پاردهای فرآیند شده با محتوای پروتئین بالاتر، حلالیت و جذب آب بیشتری نشان دادند (Sahin et al., 2024).

در خصوص افزایش حلالیت آردهای اصلاح شده می‌توان گفت؛ طی فرآیند تخمیر و اکستروژن، اجزای مولکولی نشاسته تجزیه می‌شوند که منجر به افزایش اجزای محلول می‌گردد. افزایش دمای پخت اکستروژن باعث افزایش مقادیر WSI می‌شود که به معنای تشکیل ترکیبات حل‌شونده در آب است که احتمالاً دارای وزن مولکولی کمتری هستند. WSI اغلب به‌عنوان یک شاخص از تجزیه مولکولی اجزا استفاده می‌شود؛ این شاخص میزان اجزای حل‌شونده آزاد شده از آرد به دلیل هیدراتاسیون را اندازه‌گیری می‌کند. افزایش دما در طول پخت اکستروژن، درجه ژلاتینه شدن نشاسته و دکستینه شدن را افزایش می‌دهد که ممکن است باعث افزایش مقدار اجزای حل‌شونده در نمونه شود و منجر به افزایش مقادیر WSI گردد (Demarinis et al., 2022). در پژوهش رانی و همکاران (Rani et al., 2021) حلالیت فرآورده اکستروژن تخمیر شده ۲۱ درصد تعیین شد. این مقدار WSI مشابه محدوده WSI در پژوهش حاضر است.

نمونه خام (۳/۰۸٪) نشان نداد. عدم تغییر خاکستر در نمونه‌های تخمیر شده ممکن است ناشی از شستشوی مواد معدنی محلول در آب طی تخمیر باشد (Demarinis et al., 2022).

نمونه اکستروژن شده تخمیر شده با میانگین ۴/۰۶٪ چربی و آرد خام با (۴/۷۴٪) که تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) با نمونه اصلاح شده نداشت. افزایش چربی ممکن است ناشی از ذوب روغن‌ها در اثر حرارت حین اکستروژن باشد؛ با این حال، لیپیدها نقش کلیدی در ویژگی‌های فیزیکی مانند عطر، بافت و ظاهر محصول دارند (Yağcı et al., 2020).

نمونه اکستروژن شده تخمیر شده با میانگین ۳/۶۳ درصد بیشترین فیبر خام را داشت که تفاوت معنی‌داری ($p \leq 0.05$) با نمونه غیر فرآیندی نشان نداد. عدم تغییر محتوای فیبر خام بدلیل افزایش محتوای فیبر محلول و کاهش فراکسیون‌های نامحلول فیبری در نمونه‌های اصلاح شده می‌باشد. علت این پدیده متأثر از اعمال نیروی برشی همزمان با دما و فشار بالا طی اکستروژن بوده که منجر به تخریب همی سلولز و لیگنین شده و همچنین ناشی از فعالیت آنزیم‌های سلولاز میکروارگانیزم‌ها حین فرآیند تخمیر می‌باشد (Chinma et al., 2025).

نمونه اکستروژن شده تخمیر شده با میانگین ۶۵/۳۲٪ بیشترین کربوهیدرات را داشت که تفاوت معنی‌داری ($p \leq 0.05$) با نمونه تیمار نشده مشابه (۵۹/۹۱٪) نشان داد. افزایش محتوای کربوهیدرات در آرد اصلاح شده کامپوزیت را می‌توان به تشکیل اگزوپلی ساکاریدها ناشی از فعالیت مخمر حین تخمیر نسبت داد (Afsharfar et al., 2025). فرآیند اکستروژن نیز بواسطه اعمال نیروی مکانیکی و حرارت سبب دپلمریزاسیون نشاسته، تشکیل دکستین و زنجیره‌های ساده قندی، شکستن سلولز و همی سلولز و افزایش فراکسیون‌های محلول شده و زیست‌فراهمی ترکیبات فیبر، پروتئین را افزایش می‌دهد در تلفیق با فرآیند تخمیر بواسطه افزایش فعالیت سلولاز، شکستن سلولز ادامه یافته و این موضوع سبب افزایش حل شدن آرابینوکسیلان‌ها نیز می‌شود و در آرد اصلاح شده بواسطه نیروی برشی اعمال شده طی فرآیند اکستروژن و فعالیت آنزیم‌ها طی تخمیر تولید دکستین‌ها از نشاسته افزایش یافت (Demarinis et al., 2022).

آرد اصلاح شده با میانگین ۲۲/۳۶٪ دارای بیشترین میزان پروتئین بود و تفاوت معنی‌داری ($p \leq 0.05$) با نمونه تیمار نشده (۱۹/۸۴ درصد) داشت. سلول‌های مخمر حاوی ۱۰ درصد پروتئین بر اساس وزن خشک هستند، بنابراین تکثیر مخمر حین تخمیر نیز انتظار می‌رود که منجر به افزایش محتوای پروتئین کل شود (De mesa et al., 2009).

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی مواد اولیه

Table 2- Physicochemical characteristics of raw materials

ویژگی Properties	آرد اصلاح شده Modified composite flour	آرد خام کامپوزیت Raw composite flour	آرد خام نخود Raw chickpea flour	آرد خام کینوا Raw quinoa flour
چربی کل (g/100g) Total fat	4.12 ± 0.59 ^b	4.74 ± 0.90 ^b	3.02 ± 0.81 ^c	5.33 ± 0.67 ^a
پروتئین کل (g/100g) Total protein	22.01 ± 0.57 ^b	19.84 ± 1.78 ^{bc}	26.73 ± 1.20 ^a	12.07 ± 1.11 ^c
فیبر کل (g/100g) Total fiber	3.63 ± 0.57 ^a	3.38 ± 0.64 ^{ab}	2.64 ± 0.29 ^b	3.98 ± 0.19 ^a
رطوبت (%) Moisture	5.62 ± 0.21 ^d	7.13 ± 0.64 ^b	8.28 ± 0.30 ^a	6.89 ± 0.14 ^c
خاکستر (%) Ash	3.23 ± 0.56 ^a	3.08 ± 0.33 ^b	2.96 ± 0.90 ^c	3.71 ± 0.75 ^a
کربوهیدرات (%) Carbohydrate	67.04 ± 2.03 ^{ab}	65.82 ± 1.17 ^b	59.91 ± 1.19 ^c	71.12 ± 1.42 ^a
فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity	60.47 ± 0.73 ^a	54.86 ± 1.02 ^b	52.74 ± 0.90 ^c	55.15 ± 1.08 ^b
پلی فنل کل mg GAE/100 g Total polyphenol	28.73 ± 1.03 ^a	23.52 ± 0.49 ^b	23.86 ± 0.36 ^b	24.09 ± 0.86 ^c
pH	6.11 ± 0.57 ^b	6.71 ± 0.64 ^a	6.64 ± 0.29 ^{ab}	6.91 ± 0.19 ^a
WSI	36.71 ^a	35.06 ^b	--	--
WAI	7.67 ^a	5.52 ^b	--	--

حروف انگلیسی متفاوت نشان دهنده اختلاف آماری معنی دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.

محتوای فنولیک آرد حبوبات طی فرآیند اکستروژن احتمالاً به دلیل آزادسازی ترکیبات فنولیک ناشی از اثر برش با سرعت بالای ماریچ است (Sahin et al., 2024).

هاشمی و همکاران (Hashemi et al., 2024) به بررسی میزان ترکیبات فنولی و آنتی اکسیدان دانه های مختلف غلات تحت تأثیر تخمیر باکتری های لاکتوباسیلاسه پرداختند و مقادیر بالاتر ترکیبات فنولی و فلاونوئید کل را در آرد تخمیر شده نسبت به انواع خام گزارش نمودند.

در پژوهش چینما و همکاران (Chinma et al., 2025) طی تخمیر کینوا میزان مهارکنندگی DPPH از ۹۱ به ۹۷ درصد افزایش یافت. علت پدیده را آزادسازی پپتیدهای زیست فعال طی فعالیت پروتئولیتیکی ارگانیسیم و افزایش حلالیت پلی فنول ها بیان کردند. در پژوهش دیگری افزایش میزان فولات و ترکیبات فنولی کل آرد لوبیا جوانه زده در طی تخمیر با ساکارومایسس سروزیه گزارش گردید (Sabater et al., 2015).

نتایج جدول ۱ بیانگر افزایش ترکیبات فنولی و ظرفیت آنتی اکسیدانی آردهای اصلاح شده در مقایسه با انواع مشابه غیر فرآیندی بود. افزایش میزان فنول کل طی فرآیند تخمیر، ناشی از فعالیت متابولیکی و آنزیمی مخمر است که به بخش نامحلول دیواره سلولی متصل شده، ماتریس سلولی گیاهان را تجزیه نموده و سبب هیدرولیز پیوندهای استری و اکسیداسیون لیگنین شده و نهایتاً منجر به آزادسازی ترکیبات فنولیک آزاد و پیوسته می شود. در واقع سیستم آنزیمی ارگانیسیم، مسئول کاتالیز اتصالات پروتئین-پلی فنول و افزایش میزان فنول کل می باشند. دلیل افزایش میزان مهارکنندگی DPPH در آرد اصلاح شده، آزادسازی فنول ها و اسیدهای آمینه دارای اثر ضد اکسایشی نظیر متیونین، سیستئین، اورنیتین، تیروزین و به ویژه هیستیدین (دارا بودن حلقه ایمیدازول) طی فرآیند تخمیر و اکستروژن است (Adebo et al., 2022). در حین تخمیر به دلیل تولید اسید و کاهش pH، تخریب نسبی پروتئین ها طی فعالیت پروتئیناز حاصل از ارگانیسیم و تبدیل آنها به ترکیباتی با وزن مولکولی پایین با میزان جذب آب بیشتر، تشریح احتمالی پلی ساکاریدهای خارج سلولی جاذب آب نظیر دکستران، فروکتان، لوان سبب افزایش محتوای پروتئین و کربوهیدرات در آرد اصلاح شده گردید (Yağcı et al., 2020). افزایش قابل توجه در

درصد افت وزنی پخت نمونه های کیک فاقد گلوتن

درصد افت وزنی پخت کیک، به میزان کاهش وزن کیک پس از پخت نسبت به وزن اولیه خمیر گفته می‌شود (Marston, 2016). افت وزن می‌تواند نشان‌دهنده میزان رطوبت از دست رفته در حین پخت باشد. رطوبت زیاد می‌تواند باعث ایجاد بافت خمیری و چسبنده شود، در حالی که رطوبت کم می‌تواند منجر به خشک شدن کیک شود (Milani, Hashemi, Golimovahed, & Davari, 2021).

طبق نتایج به دست آمده از تحلیل آماری جدول ۳، با جایگزینی آرد اصلاح شده، میزان افت پخت در مقایسه با نمونه حاصل از آرد غیر فرآیندی، به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. از طرفی با افزودن صمغ زانتان نیز میزان افت وزن کیک در طول پخت کاهش یافت. با بررسی نتایج، بیشترین میزان افت پخت مربوط به نمونه حاوی ۱۰۰ درصد آرد غیر فرآیندی ۱۶/۳۲ و کمترین میزان افت پخت مربوط به نمونه حاوی آرد اصلاح شده همراه ۰/۱۵ درصد صمغ زانتان ۱۴/۱۲ بود.

آرد خام، دارای ساختار طبیعی نشاسته و پروتئین است که ممکن است ظرفیت جذب آب کمتری داشته و منجر به بافت متراکم تر در کیک شود. فرآیندهای تخمیر و اکستروژن باعث تشکیل پیوندهای قوی تر بین آب و مولکول‌های آرد شده، ویسکوزیته خمیر را افزایش داده، در نتیجه رطوبت بیشتری در طول پخت حفظ می‌گردد. آرد اصلاح شده، تحت فرآیند حرارتی-فشاری قرار گرفته که باعث دانه‌بندی مجدد نشاسته، افزایش حلالیت و ظرفیت جذب آب می‌شود. این تغییرات می‌توانند بر توزیع رطوبت و افت پخت تأثیر بگذارند. در آردهای اکستروژ شده بواسطه واکنش مایلارد، تغییر ساختار نشاسته و افزایش ظرفیت نگهداری آب، افت پخت کمتری مشاهده می‌شود.

با افزایش غلظت صمغ در فرمولاسیون خمیر کیک، به‌دلیل خاصیت حفظ آب صمغ‌ها، رطوبت خمیر در طول پخت بهتر گسترش یافته و این ویژگی باعث کاهش تبخیر آب و در نتیجه کاهش افت پخت می‌شود (Hamdani et al., 2020).

صمغ‌ها با تشکیل پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب و سایر اجزای خمیر (مانند پروتئین‌ها و نشاسته)، ساختار پایدارتری ایجاد می‌کنند. این امر از جمع‌شدگی کیک در حین پخت جلوگیری کرده و افت پخت را کم می‌کند؛ اگر غلظت صمغ بیش از حد بهینه باشد، ممکن است با ایجاد ویسکوزیته بسیار بالا، توزیع نامنظم رطوبت یا اختلال در گسترش خمیر، اثر معکوس داشته باشد (Sabater et al., 2024).

پژوهش گومز و همکاران (Gomez et al., 2015) بیان کرد که صمغ‌ها با بهبود پایداری حباب‌های گاز در خمیر، حجم کیک را افزایش داده و کاهش وزن پس از پخت را محدود می‌کنند.

اساساً آردهای بدون گلوتن ظرفیت اتصال آب کمتری دارند، اما فرآیند تخمیر و اکستروژن با تغییر ماهیت ساختار نشاسته و پروتئین

و افزایش سایت‌های هیدروژنی برای پیوند بیشتر با ملکول‌های آب سبب افزایش جذب و نگهداری آب در طول تهیه خمیر و پخت کیک می‌شوند (Chinma et al., 2025). دلیل این امر می‌تواند به عملکرد اکستروژن در افزایش فراکسیون‌های فیبری محلول و افزایش جایگاه‌های هیدروفیل طی نیروی برشی و افزایش توانمندی تشکیل پیوند قوی با ملکول‌های آب باشد.

مطابق پژوهشی افزودن آرد کامپوزیت اکستروژ شده ذرت-تفاله چغندر قند سبب افزایش جذب آب، فیبر کل و کاهش افت پخت کویک گردید (Simic et al., 2021).

در پژوهش کریمی عبدالمالکی و همکاران (Karimi Abdolmaleki et al., 2018)، تأثیر افزودن آرد نخود تیمار شده حرارتی بر ویژگی‌های کیک فاقد گلوتن بررسی گردید. مطابق نتایج، نخود با داشتن پروتئین‌هایی که قدرت اتصال به آب را دارند، موجب افزایش ویسکوزیته گردید. اعمال تیمار حرارتی بر روی آرد نخود هم میزان ویسکوزیته خمیر نسبت به نمونه‌های تیمار نشده را افزایش داد، بدین ترتیب، نمونه‌های کیک حاوی آرد نخود تیمار شده در مقایسه با نمونه غیر فرآیندی، افت پخت کمتری داشتند.

پژوهش لوپز و همکاران (Lopez et al., 2025)، به بررسی تخمیر آرد نخود با کفیر برای تولید نان بدون گلوتن در مقایسه با نان حاوی آرد نخود خام پرداخت. تخمیر باعث بهبود عملکرد آرد گردید. ظرفیت جذب آب (گرم بر گرم) در آرد تخمیری افزایش پیدا کرد. در نان‌های بدون گلوتن تولید شده، کاهش وزن ناشی از پخت در نمونه حاوی آرد تخمیری کمتر از نمونه حاوی آرد خام بود.

تخلخل و حجم مخصوص نمونه‌های کیک فاقد گلوتن

تخلخل کیک از مشخصه‌های مهم در کیفیت کیک است و به ساختار منافذ در بافت داخلی آن اشاره دارد. تخلخل در فرآورده‌های نانوائی متأثر از تعداد و توزیع حباب‌های گاز در بافت داخلی است (Karimi Abdolmaleki et al., 2018). مطابق نتایج جدول ۴، کمترین تخلخل ۲۹/۱۳ مربوط به کیک حاوی آرد غیر فرآیندی و فاقد زانتان و بیشترین تخلخل ۴۳/۱۴ مربوط به نمونه حاوی آرد اصلاح شده و ۰/۱۵ درصد زانتان بود. افزودن زانتان و نوع آرد مصرفی تأثیر معنی‌داری بر تغییرات تخلخل کیک داشت بطوری‌که افزایش تخلخل همگام با افزایش سطح زانتان مشاهده شده همچنین در کلیه نمونه‌های کیک تولیدی از آرد اصلاح شده میزان تخلخل بیشتر از نمونه‌های کیک حاصل از آرد غیر فرآیندی بود ($P < 0.05$).

جدول ۳- تأثیر نوع آرد و سطح زانتان بر تغییرات افت پخت کیک فاقد گلوتن

Table 3- The effect of flour type and xanthan level on baking loss changes in gluten-free cake

اعداد کوچک بیانگر اختلاف میانگین تأثیر نوع آرد مورد استفاده در فرمولاسیون کیک و اعداد بزرگ بیانگر تأثیر سطوح افزودن زانتان در فرمولاسیون کیک‌های هر نمونه آرد می‌باشد.

نوع آرد Flour type	زانتان Xanthan level (%)	درصد افت پخت Baking loss (%)
آرد کامپوزیت خام Raw composite flour	0	16.33± 0.05aA
	0.15	15.76± 0.11aB
	0.3	15.78± 1.07aB
آرد کامپوزیت اصلاح شده Modified composite flour	0	14.89± 0.66bA
	0.15	14.12± 0.31bA
	0.3	14.20± 0.29bA

در پژوهش کریمی عبدالمالکی و همکاران (Karimi, Abdolmaleki et al., 2018)، اثر جایگزینی آرد نخود خام و حرارت‌دیده در کیک بدون گلوتن بر پایه آرد برنج بررسی شد. افزایش سهم آرد نخود خام تا ۵۰ درصد، باعث افت حجم کیک گردید؛ علت اصلی، شکل‌گیری شبکه پروتئینی کم‌کشسان و ناتوانی آن در حفظ گازهای تولیدی بود. در مقابل، کاربرد آرد نخود حرارت‌دیده موجب رشد معنادار حجم شد و اختلاف چشمگیر با نمونه شاهد نشان نداد.

توسط شارما و همکاران (Sharma, Duizer, & Joye, 2025)، عملکرد ادغام آردهای لوبیای فرآوری شده با حرارت خشک، اکستروژن و فشار بالا را در تولید کیک بدون گلوتن مورد ارزیابی قرار گرفته و با کیک‌های تهیه شده با آرد لوبیا خام و گندم مقایسه شدند. آرد لوبیای تیمار شده با حرارت خشک، بیشترین ویسکوزیته، تخلخل و حجم مخصوص را ایجاد کرد. این مطالعه نشان داد بهینه‌سازی ترکیب آردهای لوبیای فرآوری شده متفاوت، می‌تواند به‌طور بالقوه عملکرد خاص محصول را فراهم کند و توسعه محصولات نانویی با ساختار بهینه، برچسب تمیز، پر پروتئین و ذاتاً فاقد گلوتن را تسهیل نماید.

پژوهش لوپز و همکاران (Lopez et al., 2025)، به بررسی تخمیر آرد نخود با کفیر برای تولید نان بدون گلوتن در مقایسه با نان حاوی آرد نخود خام پرداخت. تخمیر باعث بهبود عملکرد آرد گردید. بیشترین حجم ویژه در نان تهیه شده از آرد تخمیر شده بود. طی فرآیند تخمیر، تولید دی‌اکسیدکربن و ترکیبات با وزن مولکولی پایین افزایش یافته و این عوامل به‌نوبه خود به عمل آمدن بهتر خمیر کمک کرده و در نهایت منجر به افزایش حجم ویژه نان شدند.

در پژوهش فرد و همکاران (Fard, Mohammadzadeh, Milani, & Ksayee, 2017)، خواص کیفی کیک بدون گلوتن تهیه شده از آرد برنج و نخودچی مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج تخلخل نمونه کیک حاوی ۷۰ درصد آرد نخود بیشترین بود. نامبرندگان دلیل این امر را به میزان پروتئین نخودچی ترکیب شده با آرد برنج

افزودن صمغ زانتان به میزان ۰/۱۵ درصد باعث افزایش تخلخل کیک گردید؛ درحالی‌که با افزودن ۰/۳ درصد صمغ زانتان در تمام نمونه‌ها باعث کاهش تخلخل کیک شد اما از لحاظ آماری معنی دار نبود ($P < 0.05$). این امر احتمالاً به‌دلیل افزایش بیش از حد ویسکوزیته و در نتیجه کاهش جزئی تخلخل می‌باشد (Milani et al., 2021).

تخلخل کمتر در کیک‌های تولیدی از آرد غیر فرآیندی، ناشی از غیر قابل اتساع بودن شبکه پروتئینی تشکیل شده و عدم نگهداری گازها در درون این شبکه می‌باشد (Rani et al., 2017).

تخمیر باعث هیدرولیز جزئی پروتئین‌ها و نشاسته می‌شود که منجر به بهبود ظرفیت نگهداری آب و تشکیل شبکه‌ای مشابه گلوتن می‌گردد. این امر حجم، تخلخل و پوکی کیک را افزایش می‌دهد (De Pasquale, Verni, Verardo, Gómez-Caravaca, & Rizzello, 2021).

اعمال هر نوع فرآیند حرارتی آرد سبب ژلاتینه‌شدن نشاسته و بالا رفتن ویسکوزیته خمیر می‌شود. چسبندگی بیشتر خمیر، ورود هوای مؤثر در مرحله اختلاط را تسهیل کرده، سرعت صعود حباب‌ها هنگام پخت را کاهش می‌دهد و نهایتاً نگهداشت هوا و افزایش حجم را رقم می‌زند. افزون بر این، تیمار حرارتی ویژگی‌های سطحی گرانول‌های نشاسته را از آب‌دوست به آب‌گریز تغییر می‌دهد؛ آب‌گریزی بیشتر به پایداری حباب‌های هوا در خمیر یاری می‌رساند.

اعمال فرآیند تخمیر و اکستروژن، سبب خروج گاز دی‌اکسیدکربن و بخار آب از خمیر شده و باعث افزایش تخلخل کیک می‌شود (De Pasquale et al., 2021). طی تخمیر، میزان اسیدیته با گذشت زمان در حال افزایش است و در نتیجه این امکان را برای آنزیم‌های آرد و ارگانسیم‌های مسئول تخمیر فراهم می‌کند تا نگهداری گاز دی‌اکسید کربن در خمیر تقویت شده و حجم فرآورده افزایش یابد (Sahin et al., 2024).

شده، میزان حباب هوای وارد شده به خمیر را طی مخلوط کردن بالا برده و از سرعت حرکت حباب‌های هوا در حین پخت کاسته و کمک می‌کند هوا در حین پخت در خمیر باقی بماند و حجم را بالا ببرد (Salehi et al., 2011). مطابق نتایج کریمی عبدالمالکی و همکاران (Karimi Abdolmaleki et al., 2018)، کیک تهیه شده از آرد نخود خام دارای بافت ضعیف‌تر و حجم کمتری نسبت به کیک تهیه شده از آرد تیمارشده با حرارت بود. همچنین با استفاده از ۲۵ درصد آرد نخود تیمارشده در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، افزایش در حجم کیک و همچنین کاهش سفتی در بافت مشاهده شد.

نسبت دادند که افزایش آن تا میزانی مشخص باعث پایداری سلول‌های گازی و تأخیر در بیاتی گردید.

افزایش تخلخل در نتیجه افزودن صمغ به محصولات خمیری فاقد گلوتن به دلیل تشکیل شبکه‌ای مشابه شبکه گلوتنی و تا حدودی افزایش ضخامت دیواره در مقابل پارگی ناشی از انبساط در حین فرآیند پخت محصول بوده و به احتمال زیاد کاهش تخلخل در سطوح بالایی افزودن صمغ به دلیل بیش از اندازه ضخیم شدن حباب‌های هوای ورودی به خمیر و جلوگیری از انبساط آنها در طی فرآیند پخت است. در پژوهش حاضر، افزایش ویسکوزیته خمیر همگام با افزایش سطح زانتان و حضور بیشتر فیبرهای رژیمی محلول در آرد کامپوزیت اصلاح

جدول ۴- تأثیر نوع آرد و سطح زانتان بر تغییرات تخلخل و حجم مخصوص فاقد گلوتن
Table 4- The effect of flour type and xanthan gum level on changes in porosity and specific volume of gluten-free cake

اعداد کوچک بیانگر اختلاف میانگین تأثیر نوع آرد مورد استفاده در فرمولاسیون کیک و اعداد بزرگ بیانگر تأثیر سطوح افزودن زانتان در فرمولاسیون کیک‌های هر نمونه آرد می‌باشد.

نوع آرد Flour type	زانتان Xanthan level (%)	تخلخل (درصد) Porosity	حجم مخصوص cm ³ /g Specific volume
آرد کامپوزیت خام Raw composite flour	0	29.13± 0.47bB	3.18± 0.94bA
	0.15	35.34± 0.30bA	3.84± 0.66bA
	0.3	34.78± 0.64bA	3.81± 0.13bA
آرد کامپوزیت اصلاح شده Modified composite flour	0	36.23± 1.01aB	3.52± 0.22aA
	0.15	43.14± 0.19aA	4.01± 0.41aA
	0.3	41.55± 0.81aA	3.99± 1.05aA

و فاقد زانتان دارای بالاترین سفتی بافت ۸/۹۷ نیوتن و کیک حاوی ۰/۱۵ درصد زانتان و آرد اصلاح‌شده از پایین‌ترین میزان سفتی ۶/۱۳ نیوتن و درواقع پایین‌ترین درجه بیاتی برخوردار بود. سفتی بافت کیک با تخلخل داخلی کیک مرتبط است. این ویژگی بافتی به تعاملات بین اجزای تشکیل‌دهنده کیک مربوط می‌شود. افزودن آرد غیرفرآیندی، باعث کاهش توان نگهداری هوا در خمیر و افزایش وزن مخصوص گردیده و منجر به کاهش حجم و در نتیجه سفتی بافت گردید (Rani et al., 2021).

کاهش سفتی بافت نمونه‌های کیک حاصل از آرد اصلاح‌شده ناشی از تجزیه بیشتر نشاسته در دمای بالای اکستروژن و همچنین تغییرات ناشی از برش ایجادشده توسط چرخش ماردون است (Chinma et al., 2025).

بیاتی یا سفت شدن بافت فرآورده‌های پخت طی مدت زمان نگهداری به عواملی نظیر کریستال شدن اجزاء نشاسته به‌ویژه آمیلوپکتین، آرایش مجدد پلیمرها در ناحیه آمورف، کاهش مقدار رطوبت و توزیع رطوبت بین ناحیه آمورف و کریستالی، مهاجرت رطوبت از مغز

ارزیابی سفتی بافت نمونه‌های کیک فاقد گلوتن

سفتی کیک به معنی مقاومت مغز کیک به تغییر شکل بر اساس بیشترین نیروی وارده بر آن است (Das et al., 2019). مطابق نتایج آنالیز واریانس داده‌ها (جدول ۵)، نوع آرد و سطح افزودن زانتان تأثیر معنی‌داری بر سفتی بافت نمونه‌های کیک داشت؛ میزان سفتی بافت نمونه‌های تولیدی از آرد خام بیشتر از آرد اصلاح‌شده بود ($P < 0.05$).

نتایج سفتی در روز پخت نشان داد که فرآیند تخمیر و اکستروژن به وضوح بر روی بافت کیک مؤثر بوده و موجب نرم‌تر شدن بافت می‌گردد و میزان سفتی بافت کیک حاوی آرد اصلاح‌شده و ۰/۱۵ درصد زانتان و بافت کیک حاوی آرد غیرفرآیندی فاقد زانتان بعد از پخت، به ترتیب کم‌ترین و بیشترین میزان و معادل ۲/۷۴ و ۴/۰۳ نیوتن بود.

با این حال روند افزایش سفتی بافت همگام با افزایش زمان نگهداری در کلیه نمونه‌ها مشاهده شد. روند افزایش سفتی در نمونه حاوی آرد اصلاح‌شده با سطوح بالاتر زانتان آهسته‌تر از سایر نمونه‌ها بود. با توجه به نتایج آزمون ۷ روز پس از تولید، کیک حاصل از آرد خام

می‌شوند، حفظ بیشتر آب در مغز فرآورده پخت به تازگی و نرمی مغز و کاهش حالت الاستیکی آن کمک می‌کند (Ghoreishi Rad, 2008; Ghanbarzadeh, & Ghiasi Tarzi, 2008).

همدانی (Hamdani, 2020)، افزایش محتوای فیبر، جذب آب خمیر و کاهش سفتی بافت طی دوره نگهداری را برای کوکی بدون گلوتن حاوی آرد اکستروژن شده نخود/برنج شکسته را در مقایسه با نمونه حاوی آرد غیرفرآیندی گزارش نمودند.

مطابق نتایج کریمی عبدالمالکی و همکاران (Karimi Abdolmaleki et al., 2018)، افزودن آرد نخود خام به دلیل افت توان نگهداشت هوا، وزن مخصوص را بالا برد و با کاستن از حجم، بافت سفت‌تر ایجاد کرد. در نقطه مقابل، به کارگیری آرد نخود حرارت‌دیده، سفتی نمونه‌ها را کاهش داد. نتایج هم‌راستا با این نتایج، داس و همکاران، (Das, & Bhattacharya, 2019) گزارش کردند که افزودن آرد برنج اکستروژن‌شده به کیک‌های فاقد گلوتن، بافت را نرم‌تر می‌کند. با این حال مطابق با نتایج صابری و همکاران (Saberi, Nateghi, & Eshaghi, 2018)، با افزایش میزان آرد نخودچی تا ۱۰۰ درصد، در فرمولاسیون کیک‌های اسفنجی بدون گلوتن میزان نرمی بافت افزایش یافت.

در پژوهش فرد و همکاران (Fard, Mohammadzadeh Milani, & Ksayee, 2018)، اثر جایگزینی آرد برنج با آرد نخودچی بر بیاتی کیک فاقد گلوتن بررسی گردید. بر این اساس، سفتی بافت نمونه‌ها طی دوره نگهداری افزایش یافت که این افزایش در مورد نمونه‌های حاوی سطوح ۵۰ و ۷۰ آرد نخودچی معنی‌دار نبود و کمترین میزان تغییرات را نشان دادند. نتایج نامبرداران با مشاهدات پژوهش اخیر هم‌راستا می‌باشد.

روشنایی پوسته و مغز کیک

رنگ از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی در فرآورده‌های نانویی و قنادی بوده و تحت اثر مواد تشکیل‌دهنده فرمولاسیون و برهم کنش بین آنها در فرآیند پخت است. میزان پذیرش محصول توسط مصرف‌کننده تحت تأثیر رنگ بوده، زیرا رنگ اولین فاکتور است که در ارزیابی مورد توجه قرار می‌گیرد (Gomez et al., 2015). شاخص L^* نیز بیانگر روشنایی و تیرگی رنگ است و ارزش آن در محدوده صفر تا ۱۰۰ می‌باشد.

کیک به قسمت‌های سطحی و پوسته وابسته است (López et al., 2025). بنابراین باتوجه به نتایج مشاهده شده در جدول، استفاده همزمان از آرد اصلاح‌شده و زانتان در کاهش نرخ بیاتی را می‌توان به عواملی نظیر تشکیل اگزوپلی‌ساکاریدها ناشی از فرآیند تخمیر اولیه آرد، نسبت داد (Demarinis et al., 2022). تخمیر باعث هیدرولیز جزئی پروتئین‌ها و نشاسته شده و منجر به بهبود ظرفیت نگهداری آب و تشکیل شبکه‌ای مشابه گلوتن می‌گردد. این امر نرمی و پوکی کیک را افزایش می‌دهد (Chinma et al., 2025).

فرآیند اکستروژن نیز بواسطه اعمال نیروی مکانیکی و حرارت سبب شکستن سلولز و همی سلولز و افزایش فراکسیون‌های محلول شده و زیست‌فرامی ترکیبات فیبر، پروتئین را افزایش داده و در تلفیق با فرآیند تخمیر بواسطه افزایش فعالیت سلولاز، شکستن سلولز ادامه یافته و این موضوع سبب افزایش حل شدن آرایینوکسیلان‌ها نیز می‌شود، تمامی موارد فوق بدلیل ایجاد کمپلکس با آب از سرعت مهاجرت رطوبت به سطح کیک جلوگیری می‌نمایند. در آرد اصلاح شده بواسطه نیروی برشی اعمال شده طی فرآیند اکستروژن و فعالیت آنزیم‌ها طی تخمیر تولید دکسترین‌ها از نشاسته افزایش یافته و این ترکیبات توانایی تداخل در رتروگراداسیون نشاسته و به تعویق انداختن بیاتی را دارند (Rani et al., 2021).

با افزودن انواع صمغ‌ها تا حدودی می‌توان از خروج رطوبت از بافت محصول جلوگیری و روند بیاتی را به تأخیر انداخت (Hamdani, 2020). زانتان و فیبرهای محلول موجود در آرد اصلاح‌شده با ایجاد شبکه‌های پلیمری در ساختار کیک، بر خواص رئولوژیکی و در نتیجه بر سفتی بافت آن تأثیر می‌گذارند. این ترکیبات با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب و سایر اجزای کیک، شبکه‌ای سه‌بعدی ایجاد می‌کند که باعث افزایش ویسکوزیته خمیر و در نهایت سفتی اولیه کیک می‌شود (Dehghan, Milani, & Hashemi, 2025).

شبکه پلیمری ایجاد شده در طول دوره نگهداری، مانع از مهاجرت رطوبت به سطح کیک می‌شود و در نتیجه از خشک شدن سریع و سفت شدن بافت کیک جلوگیری می‌کند (Marston et al., 2016). از این رو با پیشرفت زمان ماندگاری سفتی کیک در نمونه حاوی زانتان و آرد اصلاح شده از روند افزایشی کمتری در مقایسه با نمونه حاوی آرد خام برخوردار بود.

در تئوری دیگری، هیدروکلوئیدها با افزایش قوام خمیر، تشکیل شبکه موقت ژل و افزایش سفتی دیواره‌های سلول‌های حاوی گاز، موجب حفظ بیشتر گاز دی-اکسیدکربن و بخار آب تولید شده در خمیر

جدول ۵- تأثیر نوع آرد، سطح زانتان و زمان نگهداری بر تغییرات سفتی بافت کیک
Table 5- The impact of flour type, xanthan gum, and storage duration on cake texture Hardness changes

اعداد کوچک بیانگر اختلاف میانگین تأثیر نوع آرد مورد استفاده در فرمولاسیون کیک و اعداد بزرگ بیانگر تأثیر سطوح افزودن زانتان در فرمولاسیون کیک های هر نمونه آرد می‌باشد.

نوع آرد Flour type	زانتان Xanthan level (%)	سفتی بافت کیک Hardness (N)			
		روز تولید First day	روز ۳ 3 th day	روز ۵ 5 th day	روز ۷ 7 th day
آرد کامپوزیت خام Raw composite flour	0	4.03± 0.26aA	5.48± 0.22aA	7.22± 0.73aA	8.97± 0.17aA
	0.15	3.21± 0.07aB	4.98± 0.39aA	6.93± 0.35bB	8.23± 0.08aA
	0.3	3.24± 0.11bA	5.00± 0.90aA	6.96± 0.61bB	8.28± 1.03aA
آرد کامپوزیت اصلاح شده Modified composite flour	0	3.19± 0.90bB	4.34± 0.64bA	5.67± 0.12bA	6.97± 0.39bA
	0.15	2.74± 0.56bB	3.88± 0.73bB	5.07± 1.08bB	6.13± 0.44bA
	0.3	2.78± 0.39bB	3.91± 0.42bB	5.11± 0.51bB	6.16± 0.80bA

روشنایی پوسته و مغز کیک

رنگ از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی در فرآورده‌های نانوائی و قنادی بوده و تحت اثر مواد تشکیل‌دهنده فرمولاسیون و برهم کنش بین آنها در فرآیند پخت است. میزان پذیرش محصول توسط مصرف‌کننده تحت تأثیر رنگ بوده، زیرا رنگ اولین فاکتور است که در ارزیابی مورد توجه قرار می‌گیرد (Gomez et al., 2015). شاخص L^* نیز بیانگر روشنایی و تیرگی رنگ است و ارزش آن در محدوده صفر تا ۱۰۰ می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، نوع آرد تأثیر معنی‌داری بر شدت تغییرات روشنایی و شدت قهوه‌ای شدن پوسته کیک‌ها داشت. تمام نمونه‌ها در هر دو سطح خارجی و داخلی، ظاهری مات و کدر داشتند که ناشی از مقادیر پایین L بود. زانتان، رنگ روشن‌تری در مقایسه با آرد نخود و کینوا داشت که به دنبال آن با افزایش سطح زانتان در فرمول آرد، شدت روشنایی افزایش یافت (Dehghan et al., 2025).

بیش‌ترین میزان L^* پوسته کیک، مربوط به نمونه‌های حاوی آرد خام با بیشترین سطح زانتان (۵۹/۲۱) و کم‌ترین میزان L^* مربوط به نمونه‌های حاوی آرد اصلاح‌شده فاقد زانتان (۴۶/۹۷) بود. فرآیند اکستروژن و افزایش دمای آن موجب کاهش روشنایی می‌گردد. این ویژگی‌های رنگی می‌تواند بر پذیرش مصرف‌کننده تأثیرگذار باشد (Juodeikiene et al., 2011).

رنگ پوسته کیک در حین پخت به دلیل واکنش‌های میلارد و کاراملیزاسیون قندها به تدریج قهوه‌ای می‌شود. واکنش میلارد، بین گروه آمینی پروتئین و گروه کربونیل قندهای ساده رخ می‌دهد. مقدار قند، نشاسته و پروتئین موجود در فرمولاسیون کیک و شرایط فرآیند

مانند درجه حرارت، مدت زمان پخت، pH و کاهش مقدار آب در سطح بر میزان تیره شدن رنگ پوسته مؤثر است (Marston et al., 2016). علت کاهش L^* در کیک حاصل از آرد فرآیند شده نخود- کینوا، مربوط به حضور پروتئین‌های بیشتر به‌عنوان سوبسترا در واکنش میلارد و تولید رنگدانه‌ها طی پروسه تخمیر و اکستروژن بود؛ طی پروسه، همزمان با افزایش دما و نیروی برشی سبب افزایش تشدید واکنش‌های قهوه‌ای شدن میلارد در فرآورده و بروز رنگ تیره نمونه‌های آرد گردید (Juodeikiene et al., 2011). واکنش‌های میلارد و کاراملیزاسیون ناشی از تخریب قندها و پروتئین‌ها و تولید ترکیبات رنگی مانند ملانوییدین‌ها در طول پروسه تخمیر آرد غلات و حبوبات سبب کاهش روشنایی آرد تخمیری می‌شود (Adebo et al., 2022).

مطالعات نشان می‌دهند که کیک‌های تهیه‌شده از آرد نخود یا عدس تخمیرشده نسبت به نمونه‌های تخمیرنشده دارای L پایین‌تر و تیره‌تر هستند (Olmos et al., 2024). در پژوهش دیگری، نمونه شاهد حاوی آرد گندم و نمونه حاوی ۱۵ درصد آرد لوبیاچیتی دارای بالاترین روشنایی بودند و کمترین روشنایی در کیک حاوی ۴۵ درصد آرد لوبیاچیتی مشاهده شد (Hesarinejad, Siyar, & Rezaiyan Attar, 2019).

مطابق نتایج کریمی عبدالمالکی و همکاران (Karimi Abdolmaleki et al., 2018)، از منظر رنگ‌سنجی، آرد نخود دارای روشنایی پایین‌تری است و پروتئین‌های آن در واکنش غیرآنزیمی میلارد مشارکت کرده و رنگدانه‌های قهوه‌ای تولید می‌کنند؛ بنابراین افزایش سهم آن، تیرگی محصول را بیشتر می‌سازد. همچنین با افزایش سطح آرد نخود، مقادیر a^* و b^* به‌طور معناداری رشد می‌کنند.

جدول ۶- تأثیر نوع آرد، سطح زانتان بر تغییرات روشنایی پوسته و مغز کیک فاقد گلوتن

Table 6- The impact of flour type, xanthan gum concentration on the Lightness of gluten-free cake

نوع آرد Flour type	زانتان Xanthan level (%)	شاخص قهوه‌ای شدن پوسته Browning index	پوسته کیک L*
آرد کامپوزیت خام Raw composite flour	0	76.75± 0.14aA	58.91± 0.36aA
	0.15	68.68± 0.85aA	59.06± 1.16aA
	0.3	68.13± 0.63aA	59.21± 0.18aA
آرد کامپوزیت اصلاح شده Modified composite flour	0	91.55± 0.29aA	46.43± 0.74bA
	0.15	90.76± 0.84aA	46.78± 0.42bA
	0.3	90.11± 0.57aA	46.95± 0.39bA

ارزیابی حسی

اثر افزودن آرد کامپوزیت اصلاح شده و خام همراه سطوح مختلف زانتان بر برآزش حسی کیک فاقد گلوتن، متأثر از امتیازات شکل ظاهری، پوکی و نرمی بافت، قابلیت جویدن، عطر و طعم، مزه و احساس دهانی در شکل ۱ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از آن است که نوع آرد و سطوح افزودن زانتان تأثیر معنی داری بر نتایج پذیرش کلی نمونه های کیک داشت ($P < 0.05$). نتایج آنالیز واریانس نشان داد که استفاده از آرد کامپوزیت اصلاح شده و صمغ زانتان موجب پذیرش هر چه بیشتر محصول نهایی گردید. باین حال در بالاترین سطح زانتان ۰/۳ درصد، در مقایسه با ۰/۱۵ درصد اختلاف معنی داری در امتیاز پذیرش کلی مشاهده نشد. کسب امتیاز بیشتر به لحاظ احساس دهانی و عطر و طعم نمونه های حاوی غلظت ۰/۱۵ درصد صمغ زانتان در ارتباط مستقیم با مطلوبیت بافت نمونه های دارای این سطح از صمغ می باشد. اغلب محققان معتقدند که درک شدت طعم بستگی به نوع بافت محصول نهایی دارد. محققان گزارش نمودند که با افزایش سفتی بافت ماده غذایی، میزان شدت شیرینی کاهش می یابد که نتایج پژوهش حاضر این مطلب را، تأیید می نماید (Dehghan et al., 2025).

امتیاز پوکی و تخلخل برای نمونه های حاوی آرد کامپوزیت اصلاح شده نسبت به نمونه های حاوی آرد خام افزایش قابل توجهی داشت. به این دلیل که با اعمال تیمار تخمیر و اکستروژن، نشاسته موجود در آرد ژلاتینه شده و موجب جذب آب در محصول و نرم تر شدن آن نسبت به نمونه شاهد می گردد. به عبارتی، اعمال فرآیند حرارتی ویژگی های آرد حبوبات را به عنوان بستری برای تخمیر به میزان قابل توجهی تغییر داد، در طی فرآیند حرارت دهی، هیدراته شدن و تورم گرانول های نشاسته و در نهایت ژلاتینه شدن رخ داد؛ این فرآیند در حین پخت منجر به تشکیل شبکه و افزایش ویسکوزیته می گردد (Chinma et al., 2025).

همچنین به دلیل افزایش ترکیبات مولد عطر و آروما در طی واکنش مایلارد امتیاز پذیرش آن ها افزایش یافت. در حین تخمیر آرد کامپوزیت، مخمرها برای سوخت و ساز، کربوهیدرات ها، پروتئین ها و مواد تجزیه شده حاصل از آنها را مصرف کرده، گاز کربن دی اکسید و

همچنین اسید لاکتیک و استیک اسید تولید می کنند که منجر به شکل پذیری و افزایش قوام خمیر می شود؛ از این رو شاهد امتیاز بالاتر کلیه پارامترهای حسی کیک تولیدی از آرد اصلاح شده در مقایسه با کیک حاوی آرد غیر فرآیندی بودیم (Demarinis et al., 2022).

امتیاز قابلیت جویدن نمونه های تولیدی به وضوح نشان داد که نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد زانتان دارای بیشترین امتیاز بود. از طرفی نمونه های فاقد زانتان پیوستگی لازم را نداشته و تا حدودی خشک بوده که با قرارگیری در دهان سریع خرد و پودر شدند.

نتایج پژوهش های متعدد نشان می دهد تخمیر آرد حبوبات باعث کاهش طعم های لوبیایی و خاکی می شود؛ تخمیر تأثیری بر ادراک طعم نامطبوع آرد حبوبات نداشت، اما پس از تخمیر، کاهش طعم نامطبوع در آرد مشاهده شد (Chinma et al., 2025). فرآیند حرارتی نظیر اکستروژن نیز منجر به کاهش این ویژگی های طعمی گردید. طعم لوبیایی به دلیل وجود موادی مانند ساپونین ها، آلکالوئیدها یا ترکیبات فنولیک احساس می شود که می توانند تحت دماهای بالا تجزیه شوند (Sabater et al., 2024).

با فعالیت میکروارگانیسم های تخمیر (مانند لاکتوباسیلوس و ساکارومایسس)، اسیدهای آلی، پپتیدهای زیست فعال و ترکیبات معطر تولید می شوند که ارزش غذایی و عطر و طعم کیک را بهبود می بخشد. تخمیر با کاهش ترکیبات عامل طعم لوبیایی (مانند ساپونین ها)، طعم مطلوب تری در کیک ایجاد می کند. همچنین، تولید ترکیبات آروماتیک مانند دیاستیل و اسیدهای چرب کوتاه زنجیره در طی تخمیر، به بهبود ویژگی های حسی کمک می کند (Olmos et al., 2024).

اثرات مثبت مشاهده شده در حجم و نرمی بافت کیک حاصل از آرد اصلاح شده کامپوزیت را می توان به عواملی نظیر تشکیل اگزوپلی ساکاریدها ناشی از فعالیت مخمر و همچنین حضور گالاکتومانان و مانان موجود در دیوار مخمر نسبت داد که طی فرآیند تخمیر، حضور این ترکیبات در واکنش با آب منجر به تأخیر در بیات شدن آن می گردد (Adebo et al., 2022).

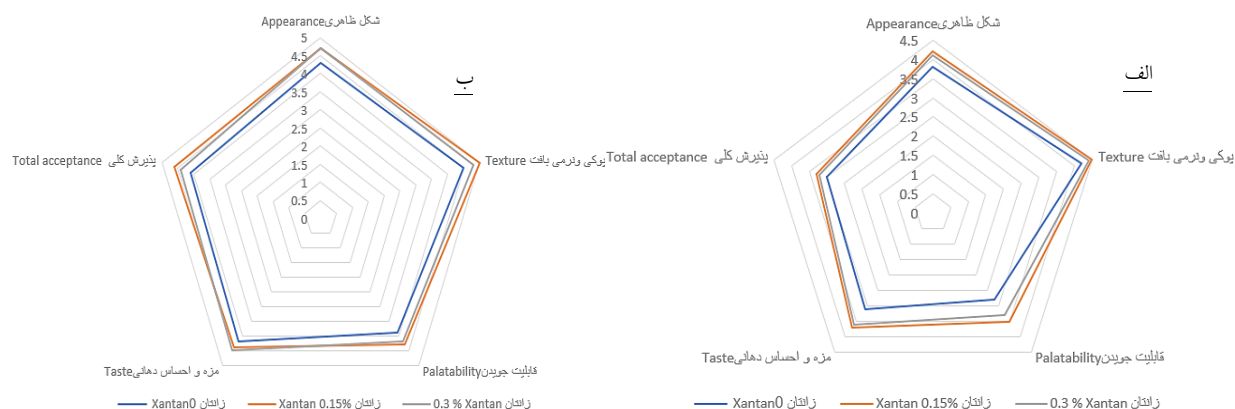
در پژوهش لوپز و همکاران (Lopez et al., 2025)، برای تولید نان بدون گلوتن از آرد نخود تخمیر شده استفاده گردید. مطابق نتایج؛

پذیرش حسی یک فاکتور کلون را بهبود بخشید؛ زیرا ژلاتینه شدن نشاسته، جذب آب را افزایش داده و باقی نرم تر و مرطوب تر نسبت به شاهد فراهم می‌آورد.

مطابق نتایج شارما و همکاران (Sharma et al., 2025)، از آنجاکه یک‌های تولیدی از آرد لوبیا دارای طعم و پس طعم لوبیای قابل توجهی بودند، استفاده از راهبردهای اصلاحی نظیر استفاده از آرد لوبیا فرآیند شده فیزیکی، توانست مقبولیت حسی یک مبتنی بر لوبیا را نزد مصرف کننده بهبود بخشد.

در ارزیابی حسی، ویژگی‌های طعم "نخودی" به طور معنی داری در نان تخمیر شده کاهش و درک اسیدیته افزایش یافت.

در پژوهشی افزودن آرد کامپوزیت اکستروژن شده ذرت-تفاله چغندر قند تا ۱۵ درصد سبب افزایش جذب آب کوکی شد و از نظر ویژگی‌های حسی، بسیار مطلوب ارزیابی گردید (Simic et al., 2021). مطابق نتایج کریمی عبدالمالکی و همکاران (Karimi Abdolmaleki et al., 2018)، استفاده از آرد نخود حرارت دیده



شکل ۱- تأثیر نوع آرد و سطح زانتان بر ارزیابی حسی یک فاکتور کلون حاوی آرد کامپوزیت خام (الف) و اصلاح شده (ب)
Fig. 1. The impact of flour type, xanthan gum concentration on the Organoleptic properties of gluten-free cake containing raw composite and modified flour

سبب کاهش سفتی بافت یک شدند. نتایج آزمون‌های حسی نشان داد که آرد کامپوزیت اصلاح شده کینوا و نخود باعث بهبود ویژگی‌های ارگانولپتیکی یک گردید.

میزان مشارکت نویسندگان

کرکی نژاد: تحقیق و بررسی، تجسم، نوشتن - پیش نویس اصلی، **کوچکی:** نظارت، مفهوم سازی، مدیریت داده ها، اعتبارسنجی، تحلیل رسمی و تأمین مالی، **میلانی:** مدیریت پروژه، روش شناسی، منابع، نرم افزار، بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

مقاله حاصل پایان نامه به شماره ثبت ۳/۶۴۲۴۳، تاریخ ثبت ۱۴۰۴/۲/۱۵، محل ثبت مشهد و تأمین کننده منابع مالی دانشگاه فردوسی مشهد می باشد.

نتیجه گیری

نخود و کینوا، دارای ارزش تغذیه ای و خصوصیات عملکردی بالایی هستند و گنجاندن آن ها در رژیم غذایی، راهکار مطلوبی برای افزایش مصرف آن هاست. استفاده از آرد کینوا و حبوبات در تولید محصولات فاقد گلوتن با چالش هایی مانند طعم نامطلوب، بافت متراکم، و کیفیت پایین همراه است. فرآوری آرد کینوا و نخود، راهکاری مؤثر برای تولید یک‌های فاقد گلوتن با کیفیت بالا است.

فرآوری آرد حبوبات بر پایه روش های زیستی و فیزیکی نه تنها ارزش غذایی را بهبود می بخشد، بلکه ویژگی های فیزیکوشیمیایی و حسی محصول نهایی را نیز بهینه می کند. بررسی و کاربرد فناوری سبز در فرآوری مواد غذایی، گامی مهم به سوی پایداری و بهبود پروفایل های تغذیه ای محصولات غذایی است. بطور کلی با جمع بندی نتایج آزمون های فیزیکی و حسی مشخص شد که می توان با استفاده از آرد کامپوزیت اصلاح شده کینوا و نخود و سطح ۰/۱۵ درصد زانتان، یک با ویژگی های حسی و کیفی مناسب و با ماندگاری بالا تولید نمود. آرد کامپوزیت اصلاح شده کینوا و نخود بواسطه محتوای پروتئین و فیبر رژیمی بالاتر و زانتان بدلیل قابلیت بالای جذب آب، با حفظ رطوبت،

References

1. Adebo, J.A., Njobeh, P.B., Gbashi, S., Oyedeji, A.B., Ogundele, O.M., Oyeyinka, S.A., & Adebo, O.A. (2022). Fermentation of cereals and legumes: Impact on nutritional constituents and nutrient bioavailability. *Fermentation*, 8(2), 63. <https://doi.org/10.3390/fermentation8020063>
2. Afsharfard, M., BeigMohammadi, Z., Milani, E., & Jafari, S. (2025). Optimizing nutritional and functional properties of gluten-free grass pea and quinoa instant flours: Dual modification by sprouting and extrusion. *Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70697>
3. AOAC. (2002). *Official Methods of Analysis*, 17th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
4. Chinma, C.E., Ezeocha, V.C., Adedeji, O.E., Jolayemi, O.S., Onwuka, Q.I., Ilowefah, M.A., Adebo, J.A., Rosell, C.M., Bamidele, O.P., & Adebo, O.A. (2025). Germinated/fermented legume flours as functional ingredients in wheat-based bread: A review. *Journal Food Science*, 90(2), 70-79. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70022>
5. Das, A.B., & Bhattacharya, S. (2019). Characterization of the batter and gluten-free cake from extruded red rice flour. *Lwt*, 102, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.026>
6. De Mesa, N.J.E., Alavi, S., Singh, N., Shi, Y.C., Dogan, H., & Sang, Y. (2009). Soy protein-fortified expanded extrudates: Baseline study using normal corn starch. *Journal. Food Engineering*, 90, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.032>
7. De Pasquale, I., Verni, M., Verardo, V., Gómez-Caravaca, A.M., & Rizzello, C.G. (2021). Nutritional and functional advantages of the use of fermented black chickpea flour for semolina-pasta fortification. *Foods*, 10, 182-195. <https://doi.org/10.3390/foods10010182>
8. Dehghan, Z., Milani, E., & Hashemi, N. (2024). The effect of extrusion technology on the quality characteristics of gluten-free cookies based on whole chickpea flour xanthan gum-broken rice. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(4), 395-407.
9. Demarinis, C., Verni, M., Pinto, L., Rizzello, C.G., & Baruzzi, F. (2022). Use of selected lactic acid bacteria for the fermentation of legume-based water extracts. *Foods*, 11(21), 3346. <https://doi.org/10.3390/foods11213346>
10. Diaz, L., Sundarajan, L., Lampi, A., Tenitz, S., & Jouppila, K. (2017). Effect of extrusion cooking on physical properties and chemical composition of corn-based snacks containing Amaranth and Quinoa: Application of partial least squares regression. *Journal of Food Process Engineering*, 14(1), 150-160. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12320>
11. El Khoury, D., Balfour-Ducharme, S., & Joye, I.J. (2018). A review on the gluten-free diet: Technological and nutritional challenges. *Nutrients*, 10, 141-156. <https://doi.org/10.3390/nu10101410>
12. Fard, P., Mohammadzadeh Milani, J., & Ksayee, M.R. (2017). Evaluation of qualitative properties of gluten-free layer cake prepared from rice and chickpea flour. *Food Research Journal*, 27(1), 99-110.
13. Fard, P., Mohammadzadeh Milani, J., & Ksayee, M.R. (2018). Effect of rice flour substitution with chickpea on staling of gluten-free cake. *Food Research Journal*, 28(1), 1-112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109150>
14. Ghoreishi Rad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghiasi Tarzi, B. (2009). The effect of using guar and carrageenan hydrocolloids on the physical and sensory properties of Barbari bread. *Food Science and Nutrition*, 8(2), 13-26. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6521>
15. Gomes, A., Rade, C.S., Ana, V.C., Rosangela, N.C., Iana Gabriela de, O., & Priscila Zaczuk, B. (2015). Application of extruded broken bean flour for the formulation of gluten-free cake blends. *Food Science Technology*, 35(2), 98-105. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.6521>
16. Hamdani, A.M., Wani, I.A., Bhat, N.A. (2020). Gluten-free cookies from rice-chickpea composite flour using exudate gums from acacia, apricot, and karaya. *Food Bioscience*, 35, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100541>
17. Hashemi, N., & Milani, E. (2024). Functional, antioxidant activity and thermal characteristics of nutritious snacks containing almond processing by-products. *Journal of Food Quality*, 10, 1155-169. <https://doi.org/10.1155/2024/3517439>
18. Hesarinejad, M.A., Siyar, Z., & Rezaian Attar, F. (2019). Investigating the effect of wheat flour enrichment with *Phaseolus vulgaris* flour on the physical, sensory, and shelf-life characteristics of sponge cake. *FSCT*; 16(86), 213-222.
19. Juodeikiene, G., Joana, S., Dalia, E., Daiva, V., Vilma, N., & Lina, V. (2011). The impact of novel fermented products containing extruded wheat material on the quality of wheat bread. *Food Technology Biotechnology*, 49(4), 502-510.
20. Karimi Abdul Maleki, N., Ziaee Far, A.M., Keshiri, M., Fathi, B., & Aalami, M. (2018). Effect of raw and heat-treated chickpea flour on quality characteristics of gluten-free cake based on rice flour. *Iranian Food Science and Technology*, 15(80), 281-292. <https://doi.org/10.1111/jfq.12249>

21. López, D.N., Forastieri, P.S., Calvo, N.L., Cossia, M.B., Tedaldi, C., Llopart, E.E., ... & Boeris, V. (2025). Yellow pea flour fermented with Kefir as a valuable ingredient for the techno-functional and sensory improvement of gluten-free bread. *Fermentation*, 11(9), 521-530. <https://doi.org/10.3390/fermentation11090521>
22. Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *Journal of Food Science and Technology*, 65, 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.063>
23. Milani, E., Hashemi, N., Golimovahed, A., & Davari, F. (2021). Properties assessment of muffin cakes enriched with composite dietary fibers from wheat bran coffee processing byproducts. *Iranian Journal Nutrient Science Food Technology*, 16(1), 85-94. <https://doi.org/10.52547/nsft.16.1.85>
24. Olmos, C., Sánchez-García, J., Elena Zúñiga, L., Claudia, M.H., Ana, M.A., & Amparo, T. (2024). Flours from fermented lentil and quinoa grains as ingredients with new techno-functional properties. *Food Research International*, 177, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113915>
25. Rani, P., Kumar, A., Purohit, S.R., & Rao, P.S. (2021). Extrusion of fermented rice-black gram flour for development of functional snacks: Characterization, optimization, and sensory analysis. *Journal Food Science Technology*, 58(2), 494-509. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04558-4>
26. Rani, P., Kumar, R., & Ranjan Purohit, S. (2017). Extrusion of fermented rice-black gram flour for development of functional snacks: Characterization, optimization and sensory analysis. *LWT*, 80(3), 23-36. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04558-4>
27. Sabater, C., Sáez, G.D., Suárez, N., Garro, M.S., Margolles, A., & Zárate, G. (2024). Fermentation with lactic acid bacteria for bean flour improvement: Experimental study and molecular modeling as complementary tools. *Foods*, 13, 330-361. <https://doi.org/10.3390/foods13132105>
28. Saberi, M., Nateghi, L., & Eshaghi, M.R. (2018). Production of gluten-free sponge cake by using a mixture of chickpea flour, rice flour, guar gum, and xanthan gum. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 14(71), 95-109. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4523>
29. Sahin, A.W., Gautheron, O., & Galle, S. (2024). Thermal treatment and fermentation of legume flours with *Leuconostoc citreum* TR116 for the development of spreadable meat alternatives. *Fermentation*, 10, 412-430. <https://doi.org/10.3390/fermentation10080412>
30. Salehi, E., Rostamian, M., & Milani, J. (2011). Textural and heat assessment of staling of corn-chickpea bread. *Journal of Food Science and Technology*, 4, 35-40. <https://doi.org/10.4314/njb.v30i2.8>
31. Sharma, M., Duizer, L., & Joye, I.J. (2025). Evaluation of the performance of physically processed bean flours in gluten-free cake production. *Food Structure*, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2025.100456>
32. Simic, S., Petrović, J., Rakić, D., Pajin, B., Lončarević, I., Jozinović, A., Fištes, A., Nikolić, S., Blažić, M., & Miličević, B. (2021). The influence of extruded sugar beet pulp on cookies' nutritional, physical, and sensory characteristics. *Sustainability*, 13(9), 5317. <https://doi.org/10.3390/su13095317>
33. Yağcı, S., Altan, A., & Doğan, F. (2020). Effects of extrusion processing and gum content on physicochemical, microstructural, and nutritional properties of fermented chickpea-based extrudates, *LWT*, 124, 109-150. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109150>