



نشریه علمی پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران



شماره ۲

جلد ۲۲

سال ۱۴۰۵

شاپا: ۴۱۶۱-۱۷۳۵

شماره پیاپی ۹۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- تأثیر اصلاح دوغانه تخمیر-اکستروژن بر ویژگی‌های عملکردی و کیفی آرد کامپوزیت نخود-کینوا و کیک
مافین فاقد گلوتن در مقایسه با آرد غیر فرآیندی ۱۱۳
زهره کورکی نژاد قرانی-آرش کوچکی-الناز میلانی
- بهینه‌سازی خواص فیلم‌های هوشمند ژلاتین/نانوفیبر کیتین حاوی عصاره‌های گیاهی پنیرک و
تاج خروس به روش سطح پاسخ ۱۳۱
نادیا ترقی خواه-علی ایاسه-صبا میلانی-شهرک وانگر
- ارزیابی خواص تغذیه‌ای و فیزیکوشیمیایی بیسکویت غنی‌شده با آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج ۱۵۹
اعظم ابوبی-محمد بلوردی
- کاربرد امواج فراصوت به‌عنوان پیش‌تیمار در بهبود عملکرد پودر پروتئین آب پنیر طی خشک کردن پاششی ۱۷۷
مجید آرام‌نی‌نیا-حجت کاراژیان
- تولید اولئوژل حاصل از روغن کانولا و ترکیب امولسیفایرها و هیدروکلونید متیل سلولز با روش
مستقیم به‌عنوان جایگزین شورتینگ ۱۹۵
مریم قنادرضایی-مصطفی مظاهری تهرانی-رضا فرهوش-پریسا پارسا
- تولید فیلم‌های فعال زیست‌تخریب‌پذیر آنتی‌اکسیدان و آنتی‌باکتریال بر پایه پودر ثعلب،
پودر زردچوبه و پودر سلنیوم: رویکردی نوین در بسته‌بندی پایدار ۲۰۹
سمیه منصوریار-سجاد پیرسا-میرخلیل پیروزی فرد

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران

با شماره پروانه ۱۲۴/۸۴۷ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۳/۱۱/۸۱۰ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
"براساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

خرداد- تیر ۱۴۰۵

شماره ۲

جلد ۲۲

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر ناصر شاهنوشی

سر دبیر: دکتر مسعود پاورمنش

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر سید علی مرتضوی

دکتر فخری شهیدی

دکتر محمدباقر حبیبی نجفی

دکتر مرتضی خمیری

دکتر سید محمد علی رضوی

دکتر رضا فرهوش

دکتر بی بی صدیقه فضلی بزاز

دکتر مهدی کاشانی نژاد

دکتر آرش کوچکی

دکتر محبت محبی

دکتر بابک قنبرزاده

دکتر ایران عالمزاده

دکتر قدیر رجبزاده اوغاز

دکتر مهیار حیدرپور

دکتر حمید بهادر قدوسی

دکتر کیانوش خسروی

دکتر مرتضی عباسزادگان

دکتر محمدامین محمدیفر

دکتر منوچهر وثوقی

دکتر هادی الماسی

دکتر میلاد فتحی

دکتر سلیمان عباسی

دکتر نونو بورخس

دکتر علی عطا معظمی

دکتر کلیفورد نکمناسو اوبی

دکتر ساموئل ایوفمی اولالکان آدیبه

میکروبیولوژی و بیوتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد

میکروبیولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

میکروبیولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد

میکروبیولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مهندسی و خواص بیوفیزیک مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

شیمی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

میکروبیولوژی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد

مهندسی مواد غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی مواد غذایی، دانشگاه تبریز

بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه صنعتی شریف

نانو فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد

زیست مولکولی، بیمارستان زنان و بزرگام، ایالت متحده آمریکا

میکروبیولوژی غذایی، دانشگاه متروپولیتن لندن

بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه آریزونا

مهندسی تولید مواد غذایی، دانشگاه فنی دانمارک

بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه صنعتی شریف

گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان

گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تربیت مدرس.

گروه علوم تغذیه و مواد غذایی، دانشگاه پورتو، پرتغال

گروه علوم مولکولی، دانشکده منابع طبیعی و علوم کشاورزی، دانشگاه سوئد

گروه میکروبیولوژی، دانشگاه کشاورزی مایکل اوکپارا، ایالت ابیا، نیجریه

گروه فناوری غذایی، مؤسسه تکنولوژی و علم هندوستان، چنای، تامیل نادو، هند

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه شده است:

Internet Archive, Google scholar, EBSCO, DOAJ, CABI, Scopus, AGRIS

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)، مرجع دانش CIVILICA

پست الکترونیکی: ifstrj@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت <https://ifstrj.um.ac.ir> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۶ شماره در سال و به صورت آنلاین منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۱۱۳ 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
زهره کورکی نژاد قرائی - آرش کوچکی - الناز میلانی
- ۱۳۱ بهینه‌سازی خواص فیلم‌های هوشمند ژلاتین/نانوفیبر کیتین حاوی عصاره‌های گیاهی پنیرک و تاج خروس به روش سطح پاسخ
نادیا ترقی خواه - علی ایاسه - صبا میلانی - شهرک وانگر
- ۱۵۹ ارزیابی خواص تغذیه‌ای و فیزیوشیمیایی بیسکویت غنی شده با آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج
اعظم ایوبی - محمد بلوردی
- ۱۷۷ کاربرد امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در بهبود عملکرد پودر پروتئین آب پنیر طی خشک کردن پاششی
مجید آرام نبی - حجت کاراژیان
- ۱۹۵ تولید اولئوژل حاصل از روغن کانولا و ترکیب امولسیفایرها و هیدروکلوئید متیل سلولز با روش مستقیم به عنوان جایگزین شورتنینگ
مریم قتادر ضایی - مصطفی مظاهری تهرانی - رضا فرهوش - پریسا پارسا
- ۲۰۹ تولید فیلم‌های فعال زیست تخریب پذیر آنتی اکسیدان و آنتی باکتریال بر پایه پودر ثعلب، پودر زردچوبه و پودر سلنیوم: رویکردی نوین در بسته بندی پایدار
سمیه منصوریار - سجاد پیرسا - میرخلیل پیروزی فرد

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 ۷۵-۲۵ 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 امگا ۶ 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

سپس مقدار ۴۲ گرم از خمیر توزین و در قالب کاغذی ریخته و در فر unox ساخت ایتالیا، در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه پخت شد. نمونه‌ها پس از سرد شدن، در کیسه پلی‌اتیلنی به منظور ارزیابی ویژگی کیفی بسته‌بندی و در دمای محیط نگهداری شدند.

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 شبانه‌روز 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).

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.

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).

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 با ۱/۵ میلی‌لیتر معرف فولین سیکالتو رقیق شده مخلوط و ۱/۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم (g/L ۶۰) 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 به‌عنوان سفتی بافت تعیین گردید (Gomes *et al.*, 2015).

تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش از طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی به‌منظور 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. به‌منظور 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 به‌عنوان 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)، به‌وسیله 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

به‌منظور ارزیابی میزان تخلخل از تکنیک پردازش تصویر استفاده خواهد شد. بدین‌منظور 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 به‌صورت نقاط تیره و روشن درآمدند. از این‌رو 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 ویسلین) 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 دکسترینه 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 اگزوپلی‌ساکاریدها 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 دکسترین 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 دکسترین‌ها 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 اکستروژن 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 اکستروژن 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 تولیدشده، 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 لوبیایی 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 لوبیایی تیمارشده با حرارت خشک، بیشترین ویسکوزیته، تخلخل و حجم مخصوص را ایجاد کرد. این مطالعه نشان داد بهینه‌سازی ترکیب آردهای لوبیایی 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 تهیه‌شده از آرد تخمیرشده 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 تشکیل‌شده 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).

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

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.

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).

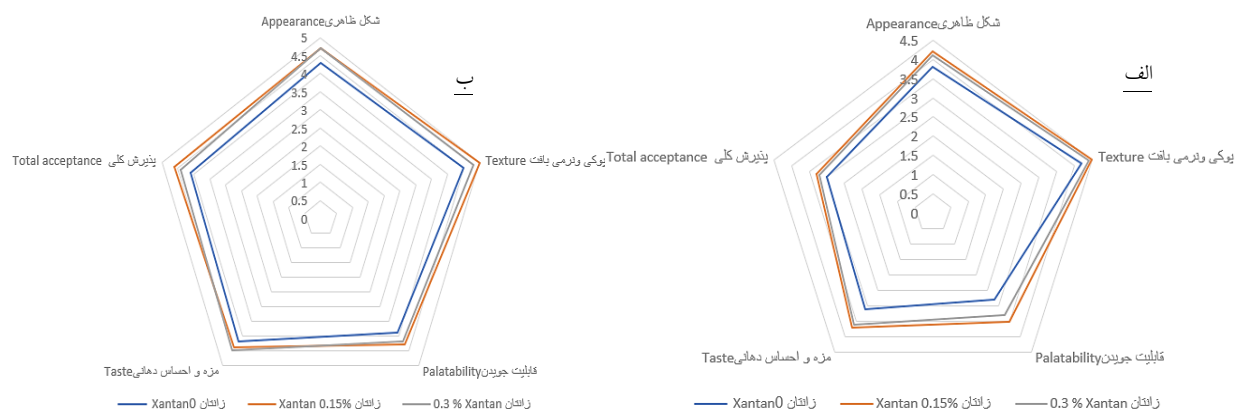
در پژوهش لوپز و همکاران (Lopez et al., 2025)، برای تولید نان بدون گلوتن از آرد نخود تخمیر شده استفاده گردید. مطابق نتایج؛

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. Saberli, 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>

Research Article

Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 129-155

Optimization of the Properties of pH-Sensitive Biodegradable Intelligent Films Based on Gelatin/Chitin Nanofibers Containing Malva and Amaranth Extracts

N. Taraghikhah^{1,2*}, A. Ayaseh¹, S. Milani¹, Sh. Vatgar^{3,2}

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

2- Azarnan Nazari Co.

(*- Corresponding Author Email: taraghikhaah@gmail.com)

3- Department of Food Science and Technology, Tehran Azad University, Tehran, Iran

Received: 11.10.2025

Revised: 02.02.2026

Accepted: 07.02.2026

Available Online: 09.05.2026

How to cite this article:

Taraghikhah, N., Ayaseh, A., Milani S., & Vatgar, Sh. (2026). Optimization of the properties of pH-sensitive biodegradable intelligent films based on gelatin/chitin nanofibers containing malva and amaranth extracts. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(2), 129-155. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.95850.1484>

Introduction

Food packaging is one of the essential components of the food supply chain, playing a vital role in maintaining product quality, ensuring safety, and extending the shelf life of perishable commodities. Beyond its traditional role as a passive barrier against physical, chemical, and microbial deterioration, novel packaging is expected to perform active and intelligent functions that can enhance product stability, indicate spoilage, and reduce food waste. In this context, the development of intelligent biodegradable films has received growing attention over the past decade due to their environmental compatibility, sustainability, and ability to provide real-time information on food freshness through measurable color changes triggered by spoilage-related pH variations. Among various natural colorants, anthocyanin-rich plant extracts are considered ideal candidates to be applied as a pH indicator in smart packaging. These compounds exhibit distinct color transitions in response to pH changes while also contributing antioxidant and antimicrobial properties that can further enhance food preservation.

Materials and Methods

In the present study, a pH-sensitive, biodegradable intelligent film was developed using a gelatin-based matrix reinforced with chitin nanofibers (NCh). The film was incorporated with *Malva sylvestris* (malva) and *Amaranthus cruentus* (amaranth) extracts as natural colorimetric indicators and bioactive components. Both extracts are rich sources of anthocyanins and phenolic compounds, which can impart multifunctional properties to the packaging material. The experimental design was optimized using the Response Surface Methodology (RSM) based on a Central Composite Design (CCD) with two independent factors: the concentration of malva extract (0.05–0.35% w/v) and amaranth extract (0.3–0.8% w/v).

The prepared films were evaluated for mechanical characteristics (tensile strength and elongation at break), water vapor permeability (WVP), moisture content, solubility, color attributes, thickness, and optical properties. Antioxidant activity was determined using the DPPH radical scavenging method, while antimicrobial activity of malva extract was tested against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* using the disk diffusion and minimum inhibitory concentration (MIC) assays. Structural and morphological characterizations were carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM), Atomic Force Microscopy (AFM), and X-ray Diffraction (XRD), while Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was used to examine possible molecular interactions between film components. The color response of the films to pH variation was evaluated over a wide range (pH 1–14), and their practical application was assessed by monitoring spoilage in packaged common carp (*Cyprinus carpio*) fillets stored at refrigerator temperature for 72 hours.



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.2026.95850.1484>

Results and Discussion

The results indicated that the simultaneous increase in malva and amaranth extract concentrations significantly enhanced the tensile strength of the films from 1.687 to 4.654 MPa, while elongation at break decreased from 24.405% to 15.102%, reflecting increased structural rigidity and reduced flexibility. Water vapor permeability increased from 0.00162 to 0.00418 $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$, whereas moisture content and solubility decreased from 26.501% to 19.001% and from 23.654% to 17.415%, respectively, suggesting improved hydrophobic interactions within the polymeric network. The film thickness increased from 0.141 to 0.231 mm, total color difference (ΔE) increased from 20.99 to 43.47, and whiteness index (WI) decreased from 82.71 to 51.11, demonstrating that the incorporation of extracts led to more intense coloration. The antioxidant activity, measured as DPPH radical inhibition, increased remarkably from 39.889% to 71.021% ($p < 0.001$), confirming the strong radical scavenging potential of the incorporated extracts. Malva extract showed notable antimicrobial effects, with inhibition zones of 8 mm (MIC = 13.86 ppm) against *S. aureus* and 9 mm (MIC = 24.67 ppm) against *E. coli*, highlighting its effectiveness as a natural antimicrobial agent.

SEM and AFM analyses revealed improved surface uniformity and better compatibility between gelatin and chitin nanofibers in the presence of the extracts, while XRD results indicated that the semi-crystalline nature of the films remained largely unchanged. FTIR spectra confirmed hydrogen bonding interactions between the hydroxyl and amide groups of the extracts and the polymeric matrix, validating molecular-level compatibility. The pH-sensitivity evaluation demonstrated a distinct color shift across the pH range of 1 to 14, from red in strongly acidic conditions to yellow under alkaline environments. This visible and reversible color transition indicated the suitability of the films as pH-sensitive indicator. In practical application tests, the films successfully detected fish spoilage after 72 hours of storage at refrigerator temperature by exhibiting an obvious and easily perceivable color change corresponding to the increase in pH caused by microbial activity.

Conclusion

Overall, the developed gelatin/chitin nanofiber-based films incorporated with *Malva sylvestris* and *Amaranthus cruentus* extracts exhibited desirable physicochemical, mechanical, antioxidant, and antimicrobial properties, along with excellent pH sensitivity. These multifunctional attributes make the films a promising candidate for use as intelligent and active food packaging materials capable of real-time freshness monitoring. Furthermore, the biodegradable nature of the materials provides an environmentally sustainable alternative to conventional synthetic packaging. Future studies are recommended to investigate the color stability, performance, and long-term durability of these films under refrigerated and industrial storage conditions to support their potential commercialization in smart packaging systems.

Keywords: Chitin nanofiber, Natural color indicator, pH-sensitive biofilm, Smart food packaging

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۵۵-۱۲۹

بهینه‌سازی خواص فیلم‌های هوشمند ژلاتین/نانوفیبر کیتین حاوی عصاره‌های گیاهی پنیرک و تاج خروس به روش سطح پاسخ

نادیا ترقی خواه^{۱*}، علی ایاسه^۱، صبا میلانی^۱ - شهرک واتگر^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

چکیده

بسته‌بندی مواد غذایی یکی از اجزای کلیدی زنجیره تأمین است که در حفظ کیفیت، ایمنی و افزایش ماندگاری محصولات نقش مهمی دارد و با کاهش ضایعات و تسهیل حمل‌ونقل، ارزش اقتصادی بالایی ایجاد می‌کند. در این پژوهش، فیلم هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر حساس به pH بر پایه ژلاتین و نانوفیبر کیتین با استفاده از عصاره‌های گیاه پنیرک (*Malva sylvestris*) و تاج‌خروس (*Amaranthus cruentus*) به‌عنوان شاخص‌های رنگی طبیعی و عوامل زیست‌فعال تهیه و بهینه‌سازی شد. طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ (RSM) و طرح مرکب مرکزی با دو متغیر مستقل شامل غلظت عصاره‌های پنیرک و تاج‌خروس انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش همزمان غلظت دو عصاره از ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ درصد (پنیرک) و از ۰/۳ تا ۰/۸ درصد (تاج‌خروس)، استحکام کششی فیلم‌ها از ۱/۶۸۷ به ۴/۶۵۴ مگاپاسکال افزایش و ازدیاد طول در شکست از ۲۴/۴۰۵ به ۱۵/۱۰۲ درصد کاهش یافت. نفوذپذیری بخار آب از ۰/۰۱۶۲ به ۰/۰۰۴۱۸ گرم بر (متر × ثانیه × پاسکال) افزایش یافت، در حالی که رطوبت و حلالیت به‌ترتیب از ۲۶/۵۰۱ و ۲۳/۶۵۴ به ۱۹/۰۰۱ و ۱۷/۴۱۵ درصد کاهش یافتند. ضخامت فیلم از ۰/۱۴۱ به ۰/۲۳۱ میلی‌متر و اختلاف رنگ (ΔE) از ۲۰/۹۹ به ۴۳/۴۷ افزایش یافت، اما شاخص سفیدی از ۸۲/۷۱ به ۵۱/۱۱ کاهش یافت. فعالیت آنتی‌اکسیدانی (مهار DPPH) از ۳۹/۸۸۹ به ۷۱/۰۲۱ درصد افزایش یافت ($p < 0.001$). عصاره پنیرک بیشترین اثر ضد میکروبی را در برابر *S. aureus* و *E. coli* نشان داد. بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روشی، میکروسکوپ نیروی اتمی و پراش اشعه ایکس یکنواختی و سازگاری مناسب فازها را تأیید کرد و طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری وجود پیوندهای هیدروژنی را نشان داد. فیلم‌ها در گستره pH ۱ تا ۱۴ تغییر رنگی از قرمز تا زرد داشتند و در بسته‌بندی فیله ماهی کپور، پس از ۷۲ ساعت نگهداری در دمای یخچال فساد نمونه را از طریق تغییر رنگ آشکار شناسایی کردند. این فیلم‌ها با خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و حساس به pH می‌توانند به‌عنوان بسته‌بندی هوشمند فعال در ارزیابی تازگی مواد غذایی به کار روند.

واژه‌های کلیدی: بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی، شاخص رنگی طبیعی، فیلم زیستی حساس به pH، نانوفیبر کیتین

مقدمه

شده است. سالانه بیش از ۳۸۰ میلیون تُن پلاستیک تولید می‌شود که نزدیک به ۴۰٪ آن‌ها برای بسته‌بندی مواد غذایی به کار می‌رود و سهم قابل توجهی از آلودگی جهانی را تشکیل می‌دهد. از آنجاکه اغلب این پلیمرها غیرقابل تجزیه هستند، جایگزینی آن‌ها با مواد

در دهه‌های اخیر، استفاده گسترده از پلیمرهای سنتزی در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی به دلیل قیمت پایین، وزن سبک و سهولت فرآیندپذیری، به یکی از اصلی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی تبدیل

۱- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- شرکت آذرنان نظری

(*)- نویسنده مسئول: (Email: taraghikhaah@gmail.com)

۳- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد تهران، تهران، ایران

نانوفیبر کیتین و دو عصاره طبیعی با ویژگی‌های مکمل زیستی و رنگی پرداخته‌اند. اغلب تحقیقات پیشین تنها از یک منبع رنگی یا یک افزودنی فعال استفاده کرده‌اند و به بهینه‌سازی کمی خواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی فیلم‌ها کمتر توجه شده است (Elhadeh et al., 2024a). از این رو، هنوز نیاز به توسعه فیلم‌هایی وجود دارد که علاوه بر پایداری مکانیکی مناسب، توانایی تشخیص بصری فساد مواد غذایی را نیز دارا باشند.

هدف و نوآوری پژوهش

هدف این پژوهش، توسعه و بهینه‌سازی فیلم هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر حساس به pH بر پایه ژلاتین و نانوفیبرهای کیتین حاوی عصاره‌های پنیرک و تاج‌خروس به‌عنوان شاخص‌های رنگی طبیعی و ترکیبات زیست‌فعال است. نوآوری پژوهش حاضر در ترکیب دو عصاره گیاهی با عملکرد رنگی و آنتی‌اکسیدانی مکمل و به‌کارگیری روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی هم‌زمان خواص مکانیکی، فیزیکی و عملکردی فیلم‌ها است. این فیلم‌ها علاوه بر ویژگی‌های زیست‌تخریب‌پذیری و سازگاری با محیط‌زیست، قادرند تغییرات pH ناشی از فساد مواد غذایی را از طریق تغییر رنگ قابل رؤیت نشان دهند و در بسته‌بندی محصولات حساس مانند فیله ماهی کاربرد عملی دارند.

مواد و روش‌ها

ژلاتین حیوانی استخراج شده از ماهی در آزمایشگاه فرمولاسیون مرکز تحقیقات کاربردی دارویی تبریز تهیه شد، نانوفیبر کیتین از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان، گیاه تاج‌خروس و پنیرک از بازار محلی تبریز، گلیسرول و پلی‌سوربات ۸۰ از شرکت مرک آلمان، مولر هیتون آگار از شرکت سیگما آلدردیج تهیه گردید. علاوه بر این، اشریشیاکلی (PTCC1163) و استافیلوکوکوس اورئوس (PTCC1764) از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز تهیه گردید.

نانوفیبرهای کیتین (Chitin nanofibers, CNFs) با درجه خلوص $\leq 99.5\%$ ، غلظت 2% و قطر نانوفیبر $30-50$ نانومتر از شرکت NanoNovin Co. (Tehran, Iran) تأمین گردید. حلال‌ها و مواد شیمیایی شامل اسید استیک (CH_3COOH , $\geq 99.8\%$)، اتانول مطلق $\geq 99.9\%$ و سدیم هیدروکسید (NaOH , $\geq 98\%$) از برند Merck KGaA (Darmstadt, Germany) با گرید تحلیلی استفاده شدند.

برای استخراج رنگدانه‌های طبیعی، گل‌های خشک پنیرک (*Malva sylvestris*) و تاج‌خروس (*Amaranthus cruentus*) از

زیست‌تخریب‌پذیر حاصل از منابع تجدیدپذیر نظیر پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و زیست‌پلیمرهای طبیعی به یکی از رویکردهای نوین در علوم غذایی تبدیل شده است (Ahmed et al., 2018).

یکی از فناوری‌های نوین در این حوزه، بسته‌بندی هوشمند (Smart Packaging) است. بسته‌بندی هوشمند، سامانه‌ای است که وضعیت کیفی و ایمنی مواد غذایی را در طول زمان نگهداری پایش کرده و تغییرات فیزیکی، شیمیایی یا میکروبی را از طریق پاسخ رنگی یا سیگنال‌های قابل تشخیص نشان می‌دهد (Kuswandi, Oktaviana, & Abdullah, 2023). در این میان، فیلم‌های حساس به pH از مهم‌ترین انواع بسته‌بندی‌های هوشمند محسوب می‌شوند، زیرا تغییرات ناشی از فساد مواد غذایی (مانند افزایش آمونیاک و آمین‌های فرار) با تغییر pH همراه است که می‌تواند باعث تغییر رنگ در فیلم‌های دارای شاخص رنگی شود (Tahir, Ahmed, & Mehmood, 2024). اصلی‌ترین ترکیبات رنگی مورد استفاده در این فیلم‌ها، آنتوسیانین‌ها و بتالین‌ها هستند؛ ترکیبات طبیعی محلول در آب که بر اثر تغییر pH، ساختار مولکولی و در نتیجه طیف رنگی آن‌ها از قرمز (در محیط اسیدی) به بنفش، آبی و زرد (در محیط قلیایی) تغییر می‌کند. این ویژگی امکان طراحی بسته‌بندی‌های هشداردهنده فساد را فراهم می‌سازد (Hong, Wang, Liu, & Zhang, 2022).

در میان پلیمرهای زیستی، ژلاتین به‌دلیل خاصیت فیلم‌سازی عالی، شفافیت، زیست‌سازگاری و توانایی ترکیب با افزودنی‌های طبیعی، یکی از پرکاربردترین گزینه‌ها در تهیه فیلم‌های خوراکی است. با این حال، محدودیت‌هایی مانند شکنندگی و حساسیت به رطوبت، استفاده از آن را به تنهایی محدود می‌کند. برای بهبود این خواص، ترکیب ژلاتین با نانوفیبرهای کیتین پیشنهاد شده است. نانوفیبرهای کیتین ساختاری متخلخل، مقاوم و زیست‌سازگار دارند که باعث افزایش استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی و کاهش نفوذپذیری به بخار آب می‌شوند (Fernández-Marín, Fernandes, Sanchez, & Labidi, 2022). از سوی دیگر، گیاهان دارویی و خوراکی حاوی ترکیبات زیست‌فعال همچون پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها، گزینه‌ای مؤثر برای افزودن خاصیت آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی به فیلم‌های زیستی هستند. عصاره پنیرک (*Malva sylvestris*) به‌دلیل غنای بالا از مالویدین، فلاونول‌ها و اسیدفولیک، اثرات آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی قابل توجهی دارد (Batiha et al., 2023). همچنین، عصاره تاج‌خروس (*Amaranthus cruentus*) حاوی بتالین‌ها و پلی‌فنول‌های متنوع است که علاوه بر نقش رنگی طبیعی، توانایی مهار اکسیداسیون و فعالیت ضد میکروبی دارند (Kanatt, 2020).

با وجود پژوهش‌های متعددی در زمینه فیلم‌های هوشمند بر پایه پلیمرهای زیستی، مطالعات اندکی به بررسی ترکیب هم‌زمان ژلاتین،

۴ درجه سانتی‌گراد در تاریکی نگهداری شد (Gasparetto, Martins, Hayashi, Otuky, & Pontarolo, 2012).

روش تهیه فیلم

جهت تهیه فیلم‌ها، ابتدا نانوفیبر کیتین در آب مقطر در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد حل و به مدت ۲۰ دقیقه توسط دستگاه همزنایزر اولتراتوراکس T 50 Digital Ultraturax همگن گردید. سپس ژلاتین در آب مقطر در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد حل شده و با همزن مغناطیسی مخلوط شد. محلول نانوفیبر کیتین به محلول ژلاتین اضافه و مجدداً همزده شد تا مخلوط یکنواختی به دست آید. در ادامه، گلیسرول به عنوان پلاستی سایزر و تثبیت ۸۰ به عنوان امولسیفایر به محلول اضافه شد و به طور کامل مخلوط گردید. عصاره پنیرک و عصاره تاج خروس مطابق تیمار بندی‌های انجام شده به محلول پایه اضافه و به مدت کوتاهی همزده شد تا ترکیب یکنواخت حاصل شود. مخلوط نهایی در پلیت‌های پلاستیکی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک گردید. فیلم‌ها تا زمان انجام آزمایش‌ها در محیط تاریک نگهداری شدند (Asdaghi & Pirs, 2020).

ارزیابی ضخامت

جهت تعیین ضخامت فیلم‌ها، از یک میکرومتر دیجیتالی (Cotex tools) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده گردید. اندازه‌گیری‌ها در ۵ نقطه مختلف فیلم انجام گردید سپس میانگین‌گیری شد (Batiha et al., 2023).

محتوای رطوبتی

جهت اندازه‌گیری محتوای رطوبتی فیلم‌ها، نمونه‌ها در ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر مربع آماده شدند. نمونه‌های آماده شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در دسیکاتور به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. پس از گذشت زمان لازم، وزن اولیه نمونه‌های فیلم با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری گردید. سپس نمونه‌ها در آون Behdad (BC OVEN 70) در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و پس از سپری شدن زمان لازم وزن نهایی نمونه‌های فیلم تعیین گردید. مقدار رطوبت نمونه‌های فیلم از رابطه زیر محاسبه گردید (Bilgiç, Söğüt, & Seydim, 2019):

$$MC\% = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

که W_i وزن اولیه نمونه‌های فیلم و W_f وزن نهایی نمونه‌های فیلم می‌باشد.

بازار محلی (تبریز، ایران) تهیه شدند. نمونه‌ها پیش از استخراج به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق خشک و در ظرف دربسته نگهداری شدند.

استخراج ژلاتین

جهت بهبود بازده و کیفیت استخراج ژلاتین، عصاره پوست ماهی تحت فرآیند اولتراسوند با استفاده از پروب انجام شد. پس از پیش‌تراش و شستشوی پوست، نمونه‌ها در آب مقطر قرار گرفتند و با پروب اولتراسوند در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و شدت ۵۰۰ وات به مدت ۱۵ دقیقه تحت ارتعاش قرار گرفتند. این فرآیند باعث شکست ساختار بافت و آزادسازی سریع‌تر پروتئین‌ها شد. عصاره حاصل پس از فیلتراسیون و تغلیظ، برای تولید پودر ژلاتین از طریق خشک‌کن اسپری (دمای ورودی ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و دمای خروجی ۸۵ درجه سانتی‌گراد) خشک و تا زمان استفاده نگهداری شد (Valcarcel, Hermida-Merino, Piñeiro, Hermida-Merino, & Vázquez, 2021).

تهیه عصاره برگ تاج‌خروس

در ابتدا برگ‌ها جدا، شسته و در آون هوای گرم در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. برگ‌های خشک شده به پودر بسیار ریز آسیاب و با آب مقطر حاوی ۰/۱ مولار اسید سیتریک استخراج گردیدند. نسبت پودر برگ به حلال ۱:۱۰ در نظر گرفته شد و مخلوط به مدت ۱۸ ساعت در شیکر مداری با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه قرار گرفت. سپس مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در سرعت ۱۲۱۰۰ g $\times$ سانتریفیوژ SIGMA (UNIVERSAL320) شد و سوپرناتان حاصل فیلتر گردید (Hu, Yao, Qin, Yong, & Liu, 2020). عصاره به دست آمده برای تمامی تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

استخراج عصاره گیاه پنیرک

جهت استخراج عصاره گلبرگ گیاه پنیرک، مقدار مشخصی از گل خشک شده پنیرک به نسبت ۱:۲۰ (وزنی/وزنی) به اتانول ۲۰ درصد اضافه شد. سپس ۰/۱۵ درصد (وزنی/حجمی) اسید سیتریک به مخلوط اضافه شده و pH محلول با استفاده از اسیدکلریدریک ۶ مولار به ۲/۵ تنظیم گردید. مخلوط به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و در تاریکی بر روی همزن مغناطیسی (Alfa (D-500) قرار گرفت. محلول استخراج شده با کاغذ فیلتر واتمن شماره یک صاف شد. سپس عصاره به دست آمده برای تبخیر حلال الکلی، به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد توسط دستگاه روتاری اواپراتور (Vargha Tajhiz) تغلیظ شد. عصاره حاصل با سانتریفیوژ در سرعت 5500 rpm جهت ته‌نشین شدن ذرات معلق قرار گرفت و سپس مجدداً توسط کاغذ فیلتر واتمن شماره یک فیلتر شد. عصاره نهایی تا زمان استفاده در دمای

شفافیت

برای تعیین شفافیت، فیلم‌ها به صورت نوارهایی به ابعاد $0.4 \times 1/8$ سانتی‌متر بریده شده و داخل سل اسپکتروفتومتر (Pharmacia Ultrospec 2000 (Biotech قرار داده شدند. سل خالی به عنوان نمونه شاهد استفاده شد. سپس میزان جذب در طول موج ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و شفافیت فیلم طبق فرمول زیر محاسبه گردید (Dong et al., 2020):

$$\text{Transparency (\%)} = \frac{T_{600}}{d} \quad (2)$$

که در این رابطه، T_{600} میزان جذب نمونه در طول موج ۶۰۰ نانومتر و d ضخامت نمونه‌های فیلم به میلی‌متر است.

نفوذپذیری بخار آب

میزان نفوذپذیری فیلم تولید شده در برابر بخار آب به روش E96 مصوب ASTM اندازه‌گیری شد. از ویال‌های شیشه‌ای برای اندازه‌گیری استفاده گردید و درون آنها آب ریخته شد و سطح ویال‌ها با فیلم پوشانده شد. سپس فیلم توسط گریس به ویال‌ها فیکس شده و درون دسیکاتور حاوی سلیکاژل قرار داده شدند. ویال‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند و به صورت دوره‌ای هر یک ساعت وزن شدند. آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رطوبت ۱۰۰٪ ایجاد می‌کند. اختلاف رطوبت در دو سمت فیلم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اختلاف فشار بخاری معادل $2/337 \times 10^3$ پاسکال ایجاد می‌کند. تغییرات وزن ویال‌ها در طول زمان با استفاده از ترازوی دیجیتال AND GR-202 اندازه‌گیری شد. سپس با رسم منحنی تغییرات وزن ویال نسبت به زمان، یک نمودار خطی حاصل شد که نرخ انتقال بخار آب معادل با شیب خط حاصله تقسیم بر سطح سلول است. نفوذپذیری نسبت به بخار آب با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (Elhadeb et al., 2024a):

$$WVTR = \frac{WVRT \times X}{2/337 \times 10^3} \quad (3)$$

که در آن $WVTR^1$ (g·mm/(m²·day·kPa)) نرخ انتقال بخار آب X ضخامت فیلم بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

حالات

جهت تجزیه و تحلیل قابلیت انحلال، فیلم‌های به صورت مربع‌های 2×2 سانتی‌متر مربع بریده شدند و در آن دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. سپس وزن اولیه فیلم‌های خشک ثبت شد. فیلم‌ها در لوله‌های درپوش‌دار پیچی در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر

غوطه‌ور شدند و به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق به آرامی هم‌زده شدند. سپس کل محلول شامل مواد نامحلول و فاز محلول روی کاغذ صافی ریخته شد تا مواد جامد نامحلول از محلول حاصل جدا شدند. در نهایت مواد جامد نامحلول در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و وزن گردیدند (وزن نهایی فیلم). درصد انحلال فیلم در آب از طریق معادله زیر محاسبه گردید:

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

که W_i وزن اولیه فیلم و W_f وزن نهایی فیلم می‌باشد (Freitas et al., 2020).

خواص مکانیکی

نمونه‌های فیلم به مدت ۲۴ ساعت در رطوبت نسبی ۳۰ درصد مشروط شده و سپس خواص مکانیکی آنها اندازه‌گیری شد. ضخامت فیلم‌ها با استفاده از میکرومتر دیجیتالی دستی اندازه‌گیری شد (در ۱۰ نقطه تصادفی فیلم). جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی، نمونه‌ها بر روی دستگاه آزمون کشش Bongshin DBBP-20 (ساخت کشور کره) با فاصله اولیه ۳۰ میلی‌متر بین فک‌ها و سرعت آزمایش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار داده شدند.

آزمون کشش در دمای اتاق انجام گرفت و دستگاه، تغییرات نیرو و طول را به صورت هم‌زمان ثبت نمود تا منحنی تنش-کرنش برای هر نمونه ترسیم شود. استحکام کششی TS^4 به عنوان بیشینه مقدار تنش در لحظه‌ی گسیختگی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TS \text{ (MPa)} = \frac{P}{b \times d} \quad (5)$$

که در آن P بار شکست بر حسب نیوتن، b عرض نمونه بر حسب میلی‌لیتر، d ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

همچنین ازدیاد طول در نقطه شکست EAB^5 از نسبت افزایش طول نمونه در لحظه‌ی گسیختگی به طول اولیه، طبق رابطه زیر محاسبه گردید (Gasti et al., 2021):

$$EAB \text{ (\%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (6)$$

L_0 و L به ترتیب طول اولیه و بعد از کشش فیلم بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی فیلم‌ها (۵۰ میلی‌گرم) با استفاده از آزمون مهار رادیکال DPPH ارزیابی شد. به طور خلاصه ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول آبی حاوی یک فیلم با ۳/۵ میلی‌لیتر از محلول متانول حاوی

4- Tensile Strength

5- Elongation at Break

1- Water Vapor Transmission Rate

2- Initial weight

3- Final weight

دیسک انتشار^۳

برای ارزیابی اثر ضد میکروبی فیلم‌ها از روش انتشار دیسک روی دو سویه اشیریشیا کلی و استافیلوکوکوس اورئوس استفاده شد. فیلم‌ها با دستگاه پانچ به دیسک‌هایی با قطر ۴ میلی‌متر بریده شدند. یک صفحه مولر هینتون آگار تهیه و سطح آن با باکتری‌های مورد آزمایش در غلظت 10^5-10^6 cfu/ml تلقیح شد. دیسک‌های فیلم روی سطح آگار قرار داده شدند و پلیت‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند و ناحیه مهار به‌عنوان هاله شفاف اطراف دیسک‌ها با میکرومتر دیجیتالی اندازه‌گیری شد (Vidal et al., 2021).

میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت بررسی ساختار و ریزساختار سطح و ویژگی‌های مورفولوژی فیلم‌های تهیه شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM- TESCAN MIRA3-FEG) استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، تکه‌های کوچکی از قسمت میانی نمونه برش داده و بر روی استند مخصوص قرار گرفتند و تحت خلأ با لایه‌ای از طلا پوشش داده شدند. سپس نمونه‌ها به دستگاه منتقل شده و تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف ثبت شدند (Wu et al., 2020).

طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوری

برای به‌دست آوردن اطلاعات درباره برهمکنش‌های میان اجزا و گروه‌های عاملی مختلف، طیف FTIR فیلم‌ها با استفاده از اسپکترومتر FTIR (FTIR-8400S) در محدوده $4000-400$ cm^{-1} در دمای اتاق انجام شد و تحت بازتاب کلی تضعیف شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Yi et al., 2023).

پراش پرتو ایکس

جهت تحلیل ساختار کریستالی فیلم‌ها، آزمون پراش پرتو ایکس انجام شد. نمونه‌های فیلم به ابعاد $1/5 \times 1$ سانتی‌متر مربع برش داده شدند و پرتوهای تابشی از نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در محدوده زاویه مشخص ثبت گردید (Confocal Raman Microscope). نمودارهای مربوطه ترسیم شدند و سرعت آنالیز $2^\circ/\text{min}$ بود (Sani, Tavassoli, Hamishehkar, & McClements, 2021).

DPPH (۰/۰۰۴٪) ترکیب شد. پس از ۳۰ دقیقه انکوباسیون در دمای اتاق، جذب محلول در ۵۱۷ نانومتر با استفاده از اسپکترومتر UV-vis Ultrospec 2000 (Pharmacia Biotech) ثبت شد. جذب محلول استاندارد بدون تیمار به‌عنوان گروه کنترل در نظر گرفته شد. فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (Hashim et al., 2022):

$$\text{Quenching (\%)} = \frac{A_{DPPH} - A_{\text{Sample}}}{A_{DPPH}} \times 100 \quad (7)$$

که در این فرمول، A_{DPPH} میزان جذب محلول کنترل و A_{Sample} جذب محلول تیمار شده است.

رنگ‌سنجی

برای تعیین پارامترهای رنگی از روش پردازش تصویر به‌عنوان مثال (روشنایی / روشنی)، a (قرمزی / سبزی) و b (زردی / آبی) نمونه‌های فیلم استفاده شد. این پارامترهای رنگی با استفاده از دستگاه هانترب لب دستی ColorFlex EZ – HunterLab و دوربین دیجیتالی در آزمایشگاه بیوفیزیک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز اندازه‌گیری شدند. کاغذ سفید به‌عنوان مرجع استفاده شد. تفاوت کلی رنگ (ΔE) و شاخص سفیدی (WI) نیز با استفاده از روابط زیر محاسبه گردیدند (He et al., 2022):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (8)$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (9)$$

تعیین حداقل غلظت بازدارنده رشد^۲

حداقل غلظتی از ماده مؤثر که توانایی مهار رشد میکروارگانیسم را دارد، MIC است. از آزمایش سری رقت برای به‌دست آوردن MIC استفاده شد. در این روش، ۱۰۰ میکرولیتر از محیط کشت نوترینت براث در تمامی چاهک‌های پلیت ۹۶ خانه به غیر از چاهک‌های ستون اول ریخته شد. سپس حجم مورد نظر برای اولین چاهک با توجه به دانسیته عصاره و امولسیون، انتخاب شد و سری رقت از این چاهک‌ها ایجاد شد. بعد از آن ۱۰۰ میکرولیتر سوسپانسیون باکتری به تمامی چاهک‌ها افزوده شد و در نهایت در یک انکوباتور (Memmert) در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و بعد از گذشت زمان لازم نتیجه تست MIC خوانده شد. در واقع MIC معادل غلظت اولین چاهکی است که در آن رشد باکتری به لحاظ چشمی قابل تشخیص نباشد (Vidal, Velásquez, Galotto, & López de Dicastillo, 2021).

میکروسکوپ نیروی اتمی

ویژگی‌های توپوگرافی فیلم‌های تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مدل PerkinElmer Spectrum Two مورد مطالعه قرار گرفت. تمامی نمونه‌های فیلم به مدت دو روز در دمای اتاق و رطوبت نسبی ۵۵٪ مشروط شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Nano surf تحلیل گردید (Sohany, Tawakkal, Ariffin, & Shah, & Yusof, 2021).

واکنش فیلم‌ها به تغییرات pH

برای بررسی تغییرات رنگ فیلم‌ها در پاسخ به تغییرات pH، فیلم‌ها به ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر مربع بریده شدند. سپس در محلول‌های بافر (۱- pH=۱۴) غوطه‌ور شده تا پتانسیل آن‌ها به عنوان شاخص‌های رنگی اندازه‌گیری شود. از فیلم بعد از ۱۰ دقیقه تماس با محلول‌های بافر عکس گرفته شد (Khezerlou, Tavassoli, Alizadeh Sani, & Ehsani, & McClements, 2023).

آزمون بسته‌بندی

برای بررسی تغییر رنگ فیلم‌ها، از آن‌ها برای بسته‌بندی فیلم‌های ماهی استفاده شد تا تأثیر زمان و عوامل مختلف بر رنگ فیلم‌ها ارزیابی شود. فیلم‌های ماهی با وزن تقریبی ۱۵۰ گرم از فروشگاه تهیه شده و درون فیلم‌های بسته‌بندی قرار گرفتند. دو طرف فیلم‌ها به هم چسبانده شد و بسته‌بندی‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای یخچال نگهداری شدند. تغییرات رنگ فیلم‌ها هر ۶ ساعت با استفاده از دوربین دیجیتالی ثبت گردید (Khezerlou et al., 2023).

تحلیل پروفیل اسیدهای چرب با کروماتوگرافی گازی

به منظور ارزیابی اثر استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر بر حفظ کیفیت لیپیدی ماهی، پروفیل اسیدهای چرب نمونه‌ها تعیین شد. برای این منظور، نمونه‌های ماهی پس از بسته‌بندی با فیلم‌های تهیه‌شده و نگهداری در شرایط سردخانه‌ای، استخراج لیپید شدند و متیل‌استر اسیدهای چرب تهیه گردید. سپس

ترکیب و نسبت اسیدهای چرب با استفاده از کروماتوگرافی گازی شناسایی و کمی‌سازی شد. هدف از این آزمون بررسی تغییرات احتمالی در پروفیل اسیدهای چرب تحت تأثیر بسته‌بندی و ارزیابی توانایی فیلم‌ها در حفظ کیفیت تغذیه‌ای ماهی طی نگهداری بود (Goluch, Rybarczyk, Polawska, & Haraf, 2023).

آنالیز آماری

طراحی آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology, RSM) و با استفاده از طرح مرکب مرکزی (Central Composite Design, CCD) انجام شد. این طرح شامل ۱۵ تیمار آزمایشی تصادفی‌سازی شده (Randomized) بدون بلاک بود و برای برازش داده‌ها از مدل درجه دوم (Quadratic model) استفاده گردید.

دو متغیر مستقل شامل غلظت عصاره پنیرک (*Malva sylvestris*) (A) در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ درصد وزنی/حجمی و غلظت عصاره تاج‌خروس (*Amaranthus cruentus*) (B) در بازه ۰/۳ تا ۰/۸ درصد وزنی/حجمی به عنوان عوامل عددی در نظر گرفته شدند (جدول ۱). سطوح متغیرها به صورت کدگذاری شده (۱-، ۰ و ۱+) تعریف گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۱۱ انجام شد. معنی‌داری مدل‌ها و ضرایب رگرسیونی با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) و در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p > 0.05$) ارزیابی گردید. کفایت مدل‌ها بر اساس ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده ($Adj-R^2$)، ضریب پیش‌بینی ($Pred-R^2$)، آزمون عدم برازش (Lack of fit) و مقدار Adequate Precision بررسی شد (جدول ۳). مدل‌هایی که مقدار Adequate Precision آن‌ها بیشتر از ۴ و آزمون عدم برازش آن‌ها غیرمعنی‌دار بود، به عنوان مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی پاسخ‌ها انتخاب شدند.

بهینه‌سازی هم‌زمان پاسخ‌ها با استفاده از تابع مطلوبیت (Desirability function) انجام گرفت و ترکیب بهینه متغیرهای مستقل بر اساس بیشینه‌سازی مطلوبیت کلی تعیین شد.

جدول ۱- سطوح کدگذاری شده متغیرهای مستقل در طرح آزمایشی
Table 1- Coded variables of independent variables in the experimental design

متغیرهای مستقل Independent values	متغیرهای آزمایشی و کدگذاری شده Experimental and coded variables		
	-1	0	+1
A	0,05	0,2	0,35
B	0,3	0,55	0,8

A و B به ترتیب غلظت عصاره پنیرک و عصاره تاج خروس

A and B represent the concentrations of malva extract and amaranth extract, respectively.

جدول ۲- تیمار بندی طرح

Table 2- Treatment plan

شاخص	تغییرات	محتوای	نفوذپذیری به	خاصیت آنتی	ازدیاد طول	استحکام کششی	شفافیت	حلالیت	ضخامت	تیمار
سفیدی	رنگ	رطوبت	بخار آب	اکسیدانی	Elongation	Tensile strength	Transpa rency	Solubility	Thickness	Treatment
Whiteness index	Color difference	Moisture content	Water vapor permeability	Antioxidant activity						
64.99	28.29	19.121	0.00165	70.566	22.203	4.654	0.96	17.415	0.231	1
53.09	40.48	24.012	0.00208	54.691	19.252	3.102	1.326	21.805	0.192	2
82.71	21.72	21.564	0.00202	61.366	15.102	3.431	1.968	20.525	0.198	3
70.07	30.61	25.365	0.00362	45.988	20.366	2.145	1.589	23.012	0.154	4
76.01	25.73	26.501	0.00402	40.201	16.414	1.687	2.899	23.654	0.148	5
76.15	24.98	26.256	0.00418	39.889	16.023	1.699	2.705	23.054	0.141	6
77.98	26.81	25.606	0.00303	47.802	24.212	2.789	1.121	22.021	0.176	7
65.01	27.88	19.001	0.00162	71.021	22.805	4.64	0.905	17.415	0.228	8
60.02	34.56	20.231	0.00181	65.424	17.561	4.002	1.132	18.252	0.223	9
82.66	20.99	21.505	0.00211	61.902	15.505	3.403	1.881	20.955	0.193	10
65.12	28.04	22.595	0.00196	58.056	23.125	3.995	1.028	19.556	0.204	11
54.09	41.24	23.989	0.00396	54.061	18.989	3.198	1.302	21.805	0.192	12
58.17	33.93	23.421	0.00311	55.015	19.201	3.005	1.389	21.323	0.196	12
51.11	43.47	24.705	0.00322	51.203	16.456	2.361	2.321	22.989	0.161	14
77.98	26.81	25.606	0.00303	47.222	24.405	2.801	1.129	22.301	0.176	15

جدول ۳- آنالیز واریانس ANOVA جهت بررسی اثر عصاره‌های پنیرک و تاج خروس بر فیلم‌های بسته‌بندی بر پایه ژلاتین و نانوفیبر کیتین

Table 3- ANOVA analysis of variance to investigate the effect of malva and amaranth extracts on gelatin and chitin nanofiber-based packaging films

ضریب تعیین / مقدار دقت تعدیل شده	اهمیت	مقدار P	F مقدار	میانگین مربعات	درجه آزادی	اثر	پاسخ
Notes (R ² / Adeq. Precision)	Significance	p-value	F-value	Mean Square	DF	Effect	Response
R ² =0.9665 / AP=36.2	معنی‌دار Significant	<0.0001	172.68	5.54	1	A	ضخامت Thickness
R ² =0.9665 / AP=36.2	معنی‌دار Significant	<0.0001	172.68	5.54	1	B	ضخامت Thickness
R ² =0.9665 / AP=36.2	معنی‌دار Significant	0.002	78.25	2.50	1	AB	ضخامت Thickness
R ² =0.9665 / AP=36.2	معنی‌دار Significant	0.01	56.40	1.80	1	A ²	ضخامت Thickness
R ² =0.9665 / AP=36.2	معنی‌دار Significant	0.01	53.30	1.70	1	B ²	ضخامت Thickness
R ² =0.9698 / AP=22.71	معنی‌دار Significant	<0.0001	57.73	11.42	1	A	حلالیت Solubility
R ² =0.9698 / AP=22.71	معنی‌دار Significant	<0.0001	57.73	11.42	1	B	حلالیت Solubility
R ² =0.9698 / AP=22.71	معنی‌دار Significant	0.03	15.70	3.10	1	AB	حلالیت Solubility
R ² =0.9698 / AP=22.71	غیرمعنی‌دار NS	0.08	7.60	1.50	1	A ²	حلالیت Solubility
R ² =0.9698 / AP=22.71	غیرمعنی‌دار NS	0.09	7.10	1.40	1	B ²	حلالیت Solubility
R ² =0.9945 / AP=49.47	معنی‌دار Significant	<0.0001	327.83	1.14	1	A	شفافیت Transparency
R ² =0.9945 / AP=49.47	معنی‌دار Significant	<0.0001	316.50	1.10	1	B	شفافیت Transparency
R ² =0.9945 / AP=49.47	معنی‌دار Significant	<0.0001	245.50	0.85	1	AB	شفافیت Transparency
R ² =0.9945 / AP=49.47	معنی‌دار Significant	<0.0001	173.40	0.60	1	A ²	شفافیت Transparency
R ² =0.9945 / AP=49.47	غیرمعنی‌دار NS	0.002	115.60	0.40	1	B ²	شفافیت Transparency

استحکام کششی Tensile strength	A	1	6.04	354.33	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9883 / AP=65.27
استحکام کششی Tensile strength	B	1	5.90	345.50	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9883 / AP=65.27
استحکام کششی Tensile strength	AB	1	2.50	146.30	0.01	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9883 / AP=65.27
استحکام کششی Tensile strength	A ²	1	1.80	105.50	0.02	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9883 / AP=65.27
استحکام کششی Tensile strength	B ²	1	1.60	94.00	0.03	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9883 / AP=65.27
ازدیاد طول Elongation	A	1	21.78	278.97	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9789 / AP=39.83
ازدیاد طول Elongation	B	1	17.50	223.80	0.002	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9789 / AP=39.83
ازدیاد طول Elongation	AB	1	10.40	133.20	0.01	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9789 / AP=39.83
ازدیاد طول Elongation	A ²	1	8.90	114.00	0.02	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9789 / AP=39.83
ازدیاد طول Elongation	B ²	1	7.50	95.60	0.03	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9789 / AP=39.83
نفوذپذیری بخار آب Water vapor permeability	A	1	22.16	201.80	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.7928 / AP=12.82
نفوذپذیری بخار آب Water vapor permeability	B	1	20.25	184.50	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.7928 / AP=12.82
نفوذپذیری بخار آب Water vapor permeability	AB	1	10.50	95.20	0.01	غیرمعنی دار NS	R ² =0.7928 / AP=12.82
محتوای رطوبت Moisture content	A	1	41.66	241.52	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9926 / AP=42.70
محتوای رطوبت Moisture content	B	1	39.41	228.10	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9926 / AP=42.70
محتوای رطوبت Moisture content	AB	1	10.25	59.32	0.02	غیرمعنی دار NS	R ² =0.9926 / AP=42.70
فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity	A	1	22.16	201.80	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9937 / AP=78.98
فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity	B	1	21.66	196.50	<0.0001	معنی دار Significant	R ² =0.9937 / AP=78.98
فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity	AB	1	15.50	140.20	0.002	معنی دار Significant	R ² =0.9937 / AP=78.98
تغییرات رنگ Color difference	A	1	0.41	1.04	0.32	غیرمعنی دار NS	R ² =0.679 / AP=5.02
تغییرات رنگ Color difference	B	1	0.39	0.95	0.35	غیرمعنی دار NS	R ² =0.679 / AP=5.02
تغییرات رنگ Color difference	AB	1	0.21	0.61	0.45	غیرمعنی دار NS	R ² =0.679 / AP=5.02
تغییرات رنگ Color difference	A ²	1	0.18	0.52	0.48	غیرمعنی دار NS	R ² =0.679 / AP=5.02
تغییرات رنگ Color difference	B ²	1	0.16	0.46	0.50	غیرمعنی دار NS	R ² =0.679 / AP=5.02
شاخص سفیدی Whiteness index	A	1	0.41	1.01	0.33	غیرمعنی دار NS	R ² =0.8409 / AP=7.84
شاخص سفیدی Whiteness index	B	1	0.39	0.95	0.35	غیرمعنی دار NS	R ² =0.8409 / AP=7.84
شاخص سفیدی Whiteness index	AB	1	0.21	0.61	0.45	غیرمعنی دار NS	R ² =0.8409 / AP=7.84

(Desirability) را داراست. شرایط بهینه‌سازی برای هر پاسخ بر اساس اهداف مورد نظر شامل: در محدود (In range)، حداقل (Minimize) و حداکثر (Maximize) تعریف شد. همچنین، با توجه به اهمیت نسبی هر فاکتور، ضرایب اهمیت مناسبی برای پاسخ‌ها اختصاص یافت (جدول ۴). نتایج حاصل از بهینه‌سازی عددی نشان داد که ترکیب مطلوب شامل ۵۵۸/۰ درصد عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و ۱۶۵/۰ درصد عصاره پنیرک است که بیشترین مطلوبیت کلی را برای ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فیلم نشان داد.

جدول ۴- بهینه یابی متغیرها
Table 4- Optimization of variables

تیمار	عصاره پنیرک	عصاره تاج خروس
Treatment	Malva extract (w/v%)	Amaranth extract (w/v%)
1	0.165	0.558
2	0.05	0.3
3	0.35	0.8
4	0.2	0.55

افزودن عصاره‌های غنی از پلی‌ساکارید موجب افزایش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش ضخامت فیلم‌های پروتئینی می‌شود.

محتوای رطوبتی

تحلیل اثرات اصلی و متقابل نشان داد که هردو عصاره به طور مستقل باعث کاهش محتوای رطوبتی شدند و اثر هم‌زمان آن‌ها بیشترین کاهش رطوبت را ایجاد کرده است. بیشترین کاهش رطوبت مربوط به سطح بالای هردو عصاره و کمترین در سطح پایین بود (شکل ۲). کاهش رطوبت ناشی از افزایش تراکم شبکه پلیمری و کاهش گروه‌های هیدروکسیل آزاد است. مقادیر ضریب تعیین مدل ($R^2=0.9926$) و دقت پیش‌بینی مدل برابر با ۴۲/۷۰ دقت پیش‌بینی بالا را نشان داد.

مطالعات موسوی و همکاران (Mousavi, Rezaei, & Hashemi, 2021) و حسینی و همکاران (Hosseini, Gómez-Regenstein, 2020) نیز نشان دادند که افزودن عصاره‌های غنی از پلی‌فنل به فیلم‌های ژلاتینی و کیتوزانی باعث کاهش رطوبت می‌گردد. همچنین، کازون و همکاران (Cazón, Velazquez, Ramirez, & Vázquez, 2018) گزارش کردند که افزایش غلظت ترکیبات گیاهی موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار می‌گردد.

بهینه‌سازی کلی متغیرها برای فیلم بسته‌بندی هوشمند بر پایه ژلاتین/نانوفیبرکیتین حاوی عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و عصاره پنیرک

به‌منظور تعیین غلظت‌های بهینه دو متغیر مستقل A و B و پیش‌بینی پاسخ‌های بهینه برای دستیابی به فیلمی با بهترین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، بهینه‌سازی عددی با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. در این روش، نقطه‌ای تعیین می‌شود که بیشترین مقدار مطلوبیت

نتایج و بحث

ضخامت

ضخامت یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی خواص مکانیکی و نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها است و تحت تأثیر ترکیب فیلم، پراکندگی و خواص جریانی قرار دارد. آنالیز واریانس (ANOVA) نشان داد که مدل درجه دوم برای پیش‌بینی ضخامت فیلم‌ها معنی‌دار بود ($p < 0/05$) و آزمون عدم پردازش غیرمعنی‌دار گزارش شد ($p > 0/05$)، که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل با داده‌های تجربی است. اثرات خطی غلظت عصاره تاج‌خروس (A) و عصاره پنیرک (B) بر ضخامت فیلم‌ها معنی‌دار بودند، به‌طوری‌که بیشترین ضخامت (۰/۲۳۱ میلی‌متر) مربوط به فیلم حاوی بالاترین غلظت هردو عصاره و کمترین ضخامت (۰/۱۴۱ میلی‌متر) مربوط به پایین‌ترین میزان عصاره‌ها بود (شکل ۱). این افزایش به حضور ترکیبات فنلی و پلی‌ساکاریدی عصاره‌ها و تقویت برهمکنش‌های شبکه پلیمری فیلم ژلاتینی نسبت داده می‌شود. ضریب تعیین مدل ($R^2=0.9665$) و دقت پیش‌بینی مدل برابر با ۳۶/۲ توان پیش‌بینی بالای مدل را تأیید کردند.

نتایج مشابهی توسط دانگ و همکاران (Dong et al., 2020) و الحادف و همکاران (Elhadeef et al., 2024b) گزارش شده است، آنان نیز افزایش ضخامت فیلم‌های زیستی حاوی ترکیبات گیاهی را به حضور ترکیبات پلی‌فنلی و افزایش مقاومت شبکه پلیمری نسبت دادند. همچنین بیلگیک و همکاران (Bilgiç et al., 2019) نشان دادند که

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Thickness (mm)

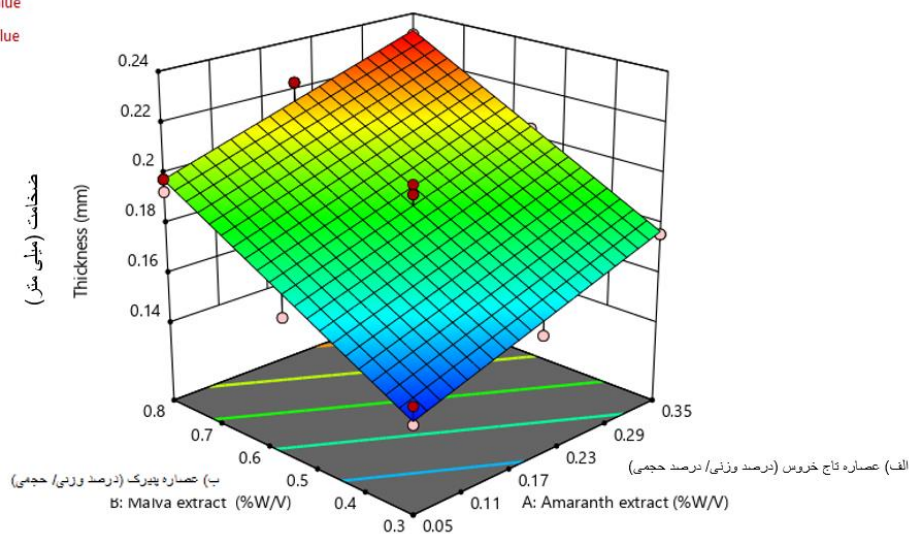
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

0.141 0.231

X1 = A: Amaranth extract

X2 = B: Malva extract



شکل ۱- نمودار سه بعدی ضخامت فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 1. Three-dimensional plot of film thickness based on two variables

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Moisture (%)

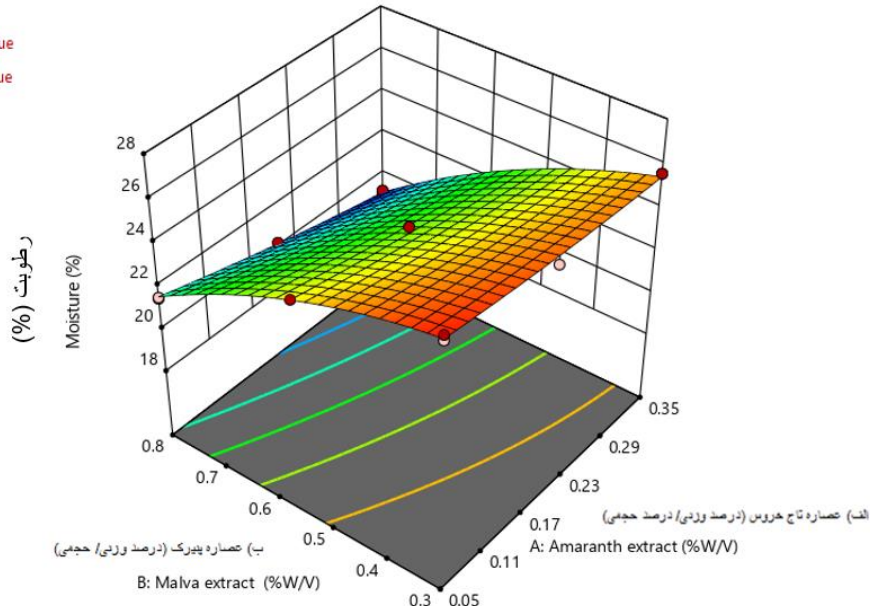
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

19.001 26.501

X1 = A: Amaranth extract

X2 = B: Malva extract



شکل ۲- نمودار سه بعدی رطوبتی محتوای فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 2. Three-dimensional plot of the moisture content of the films based on two variables

شفافیت

اثرات خطی هر دو عصاره و اثر متقابل آن‌ها بر شفافیت معنی‌دار بود. بیشترین کاهش شفافیت در بالاترین سطح عصاره‌ها و کمترین کاهش در پایین‌ترین سطح مشاهده گردید (شکل ۳). کاهش شفافیت ناشی از پراکندگی نور و تغییر ریزساختار ماتریکس فیلم است. ضریب تعیین مدل ($R^2 = 0.9945$) و قدرت پیش‌بینی مدل برابر با ۴۹/۴۷ گزارش می‌گردد.

مطالعات مشابه توسط موسوی و همکاران (Mousavi *et al.*, 2021)، تانگنان چان و همکاران (Tongnuanchan, Benjakul, & Zhao, Liu, & Chen, 2022) و ژائو و همکاران (Prodpran, 2023) گزارش شده‌اند، که افزودن عصاره‌های گیاهی و رنگدانه‌های طبیعی باعث کاهش شفافیت و افزایش جذب نور می‌شود. حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2020). نیز کاهش عبور نور در فیلم‌های ژلاتینی حاوی فنول‌ها را گزارش کردند.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

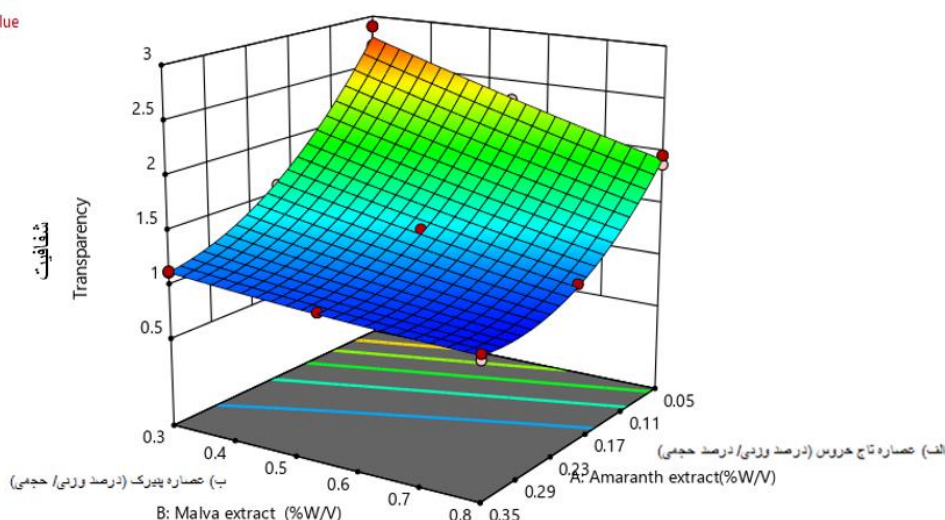
Transparency

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

0.905 2.899

X1 = A: Amaranth extract
X2 = B: Malva extract



شکل ۳- نمودار سه بعدی شفافیت فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 3. Three-dimensional plot of film transparency based on two variables

ساختار و افزایش ناهمگنی سطحی می‌شود. ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2023) گزارش کردند که حضور رنگدانه‌های آنتوسیانینی با اثرات پلاستیکی و تضعیف برهم‌کنش‌های بین مولکولی باعث افزایش نفوذپذیری بخار آب می‌گردد.

حلالیت

اثرات عصاره‌ها بر کاهش حلالیت معنی‌دار بود و بیشترین کاهش در حضور هم‌زمان عصاره‌ها مشاهده شد (شکل ۵). این اثر به افزایش برهم‌کنش‌های هیدروژنی میان ترکیبات فنلی و گروه‌های قطبی ژلاتین و نانوفیبرهای کیتین نسبت داده می‌شود. $R^2 = 0.9698$ و Adequate precision = ۲۲/۷۱ برازش و توان پیش‌بینی مناسب مدل را تأیید کردند.

نفوذپذیری به بخار آب

مدل درجه دوم برای پیش‌بینی نفوذپذیری بخار آب معنی‌دار بود. هر دو عصاره اثر افزایشی معنی‌داری بر نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها داشتند و اثر متقابل آن‌ها نیز قابل توجه بود. بیشترین نفوذپذیری در سطح بالای عصاره‌ها و کمترین در سطح پایین مشاهده شد (شکل ۴). این اثر ناشی از کاهش چگالی شبکه و ایجاد نواحی میکروسکوپی ناهمگن در ماتریکس فیلم است. ضریب تعیین ($R^2 = 0.7928$) با توجه به ماهیت پیچیده انتقال رطوبت قابل قبول است و Adequate precision برابر با ۱۲/۸۲ توان پیش‌بینی مناسب را نشان داد.

مطالعات تانگنان چان و همکاران (Tongnuanchan *et al.*, 2022) نیز گزارش کردند که افزودن عصاره‌های گیاهی یا ترکیبات پلی‌فنلی موجب افزایش نفوذپذیری بخار آب به دلیل کاهش تراکم

۲۰۲۲) نیز کاهش حلالیت فیلم‌های ژلاتینی با افزایش تراکم شبکه پلیمری را گزارش کرده‌اند.

مطالعات نشان داده‌اند که افزودن ترکیبات فنلی و آنتوسیانینی به فیلم‌های پروتئینی موجب کاهش حلالیت و افزایش انسجام ساختار فیلم می‌شود. تانگنان چان و همکاران (Tongnuanchan *et al.*)

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

WVP

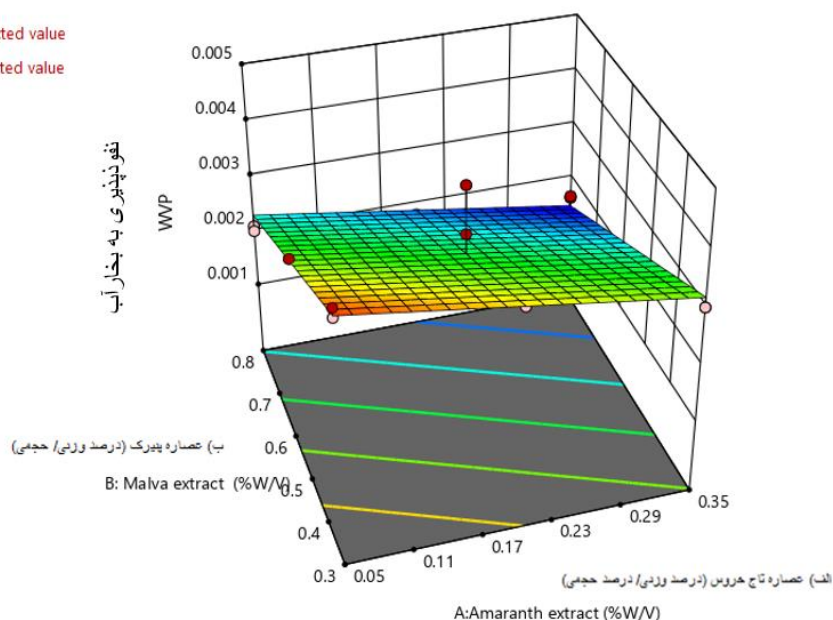
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

0.00162 0.00418

X1 = A: Amaranth extract

X2 = B: Malva extract



شکل ۴- نمودار سه بعدی نفوذپذیری بخار آب فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 4. Three-dimensional plot of the water vapor permeability of the films based on two variables

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Solubility (%)

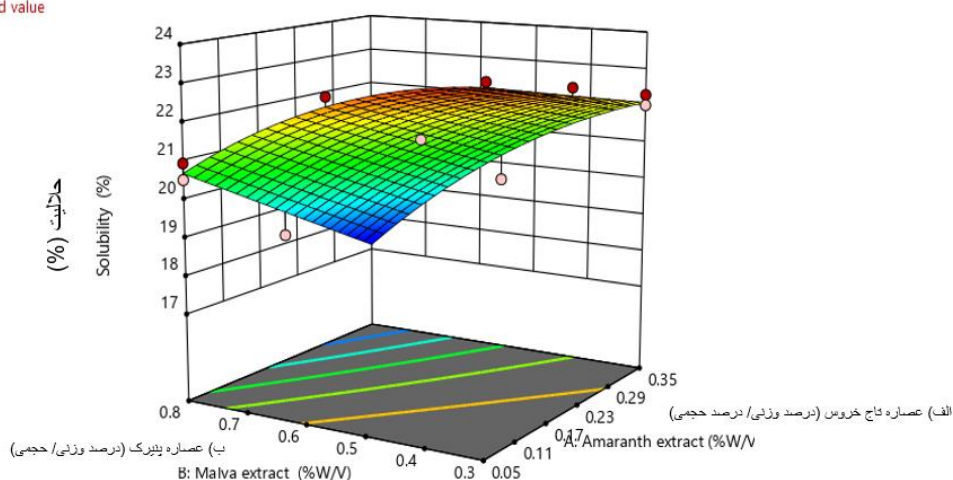
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

17.415 23.654

X1 = A: Amaranth extract

X2 = B: Malva extract



شکل ۵- نمودار سه بعدی حلالیت فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 5. Three-dimensional plot of the solubility of the films based on two variables

خواص مکانیکی

استحکام کششی فیلم‌ها با افزایش غلظت عصاره‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (بیشترین مقدار: ۴/۶۵۴ مگاپاسکال) و ازدیاد طول در نقطه شکست کاهش یافت (کمترین مقدار: ۱۵/۱۰۲٪) (شکل ۶ و ۷). این تغییرات به برهمکنش میان ترکیبات فنلی و گروه‌ای آمینی/هیدروکسیلی ماتریکس فیلم نسبت داده می‌شود. ضریب تعیین $R^2=0.9883$ و $\text{Adequate precision}=65/27$ قدرت پیش‌بینی بالا را نشان داد.

مطالعات ژائو و همکاران (Zhao et al., 2023) نشان داده است که افزودن عصاره‌های گیاهی موجب تقویت شبکه پلیمری، افزایش استحکام کششی و کاهش ازدیاد طول فیلم‌ها می‌گردد. تانگنان چان و همکاران (Tongnuanchan et al., 2022) نیز گزارش کردند که حضور ترکیبات آنتوسیانینی با ایجاد پیوندهای هیدروژنی بیشتر، انعطاف‌پذیری را کاهش و سختی فیلم را افزایش می‌دهد.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیلم‌ها با افزایش غلظت عصاره‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، بیشترین فعالیت (۷۱/۰۲۱٪) مربوط به فیلم با بالاترین غلظت عصاره‌ها و کمترین (۳۹/۸۸۹٪) مربوط به پایین‌ترین میزان عصاره‌ها بود (شکل ۸). این اثر به حضور ترکیبات فنلی و آنتوسیانینی نسبت داده می‌شود که با اهدای هیدروژن و الکترون،

رادیکال‌های آزاد را مهار می‌کنند. $R^2=0.9937$ و $78/98$ $\text{Adequate precision}$ = نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی بسیار بالا است. مطالعات ژائو و همکاران (Zhao et al., 2023) و الحادف و همکاران (Elhadef et al., 2024b) گزارش کردند که افزودن عصاره‌های گیاهی غنی از پلی‌فنل‌ها موجب افزایش معنی‌دار فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیلم‌ها و کاهش اکسیداسیون چربی‌ها در محصولات غذایی می‌شود.

رنگ‌سنجی

شاخص سفیدی (WI) و تغییر رنگ کلی (ΔE) نشان داد که افزایش غلظت عصاره‌ها موجب کاهش شاخص سفیدی و افزایش تغییرات رنگ کلی شد. بیشترین تغییرات رنگ کلی برابر با ۴۳/۴۷ در فیلم با بالاترین غلظت عصاره‌ها مشاهده شد (شکل ۹ و ۱۰). این تغییرات ناشی از حضور رنگدانه‌های طبیعی، آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها در عصاره‌ها است. R^2 برای تغییرات رنگ کلی و شاخص سفیدی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۷۹ و ۰/۸۴۰۹ و مقادیر $\text{Adequate precision}$ قابل قبول را نشان داد.

مطالعات ژائو و همکاران (Zhao et al., 2023) گزارش کرده که افزودن عصاره‌های غنی از آنتوسیانین باعث کاهش سفیدی، افزایش شدت رنگ و کاهش شفافیت فیلم‌های زیستی می‌گردد.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

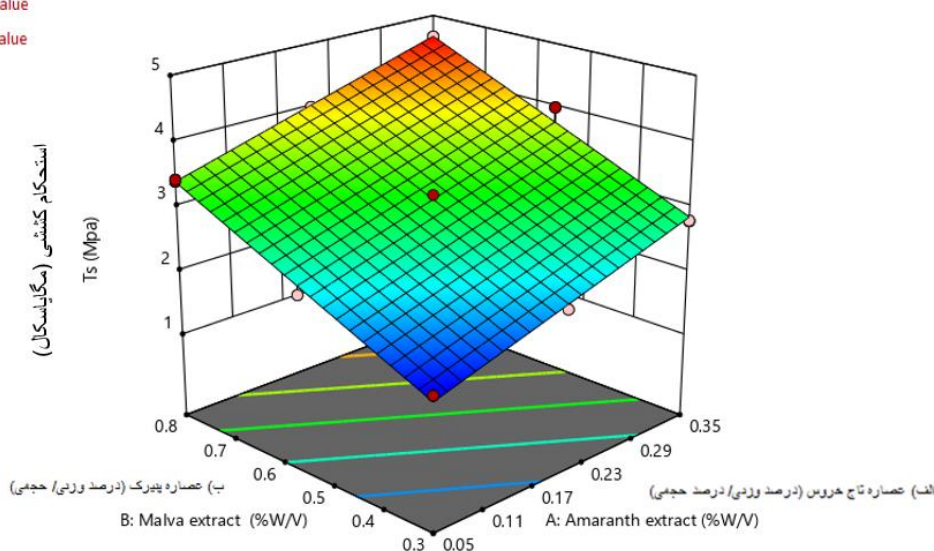
Ts (Mpa)

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

1.687 4.654

X1 = A: Amaranth extract
X2 = B: Malva extract



شکل ۶- نمودار سه بعدی استحکام کششی فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 6. Three-dimensional plot of the tensile strength of the films based on two variables

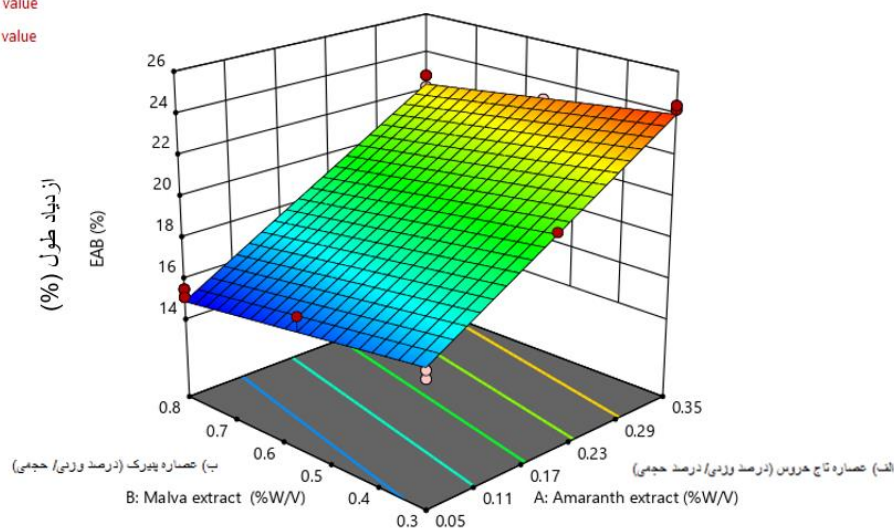
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

EAB (%)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value

15.102 24.405

X1 = A: Amaranth extract
X2 = B: Malva extract



شکل ۷- نمودار سه بعدی ازدیاد طول در شکست بر اساس دو متغیر

Fig. 7. Three-dimensional plot of elongation at break based on two variables

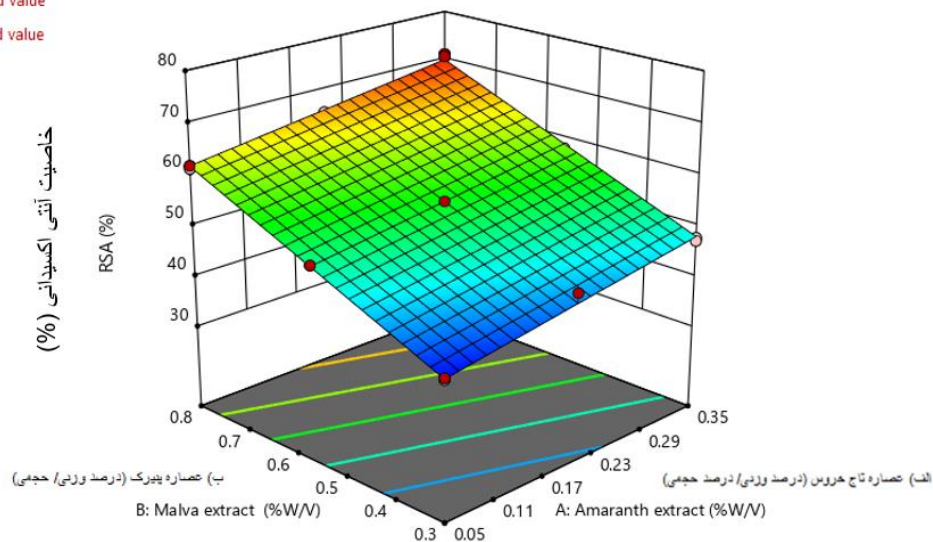
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

RSA (%)

- Design points above predicted value
- Design points below predicted value

39.889 71.021

X1 = A: Amaranth extract
X2 = B: Malva extract



شکل ۸- نمودار سه بعدی خاصیت آنتی اکسیدانی فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 8. Three-dimensional plot of the antioxidant activity of the films based on two variables

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

E

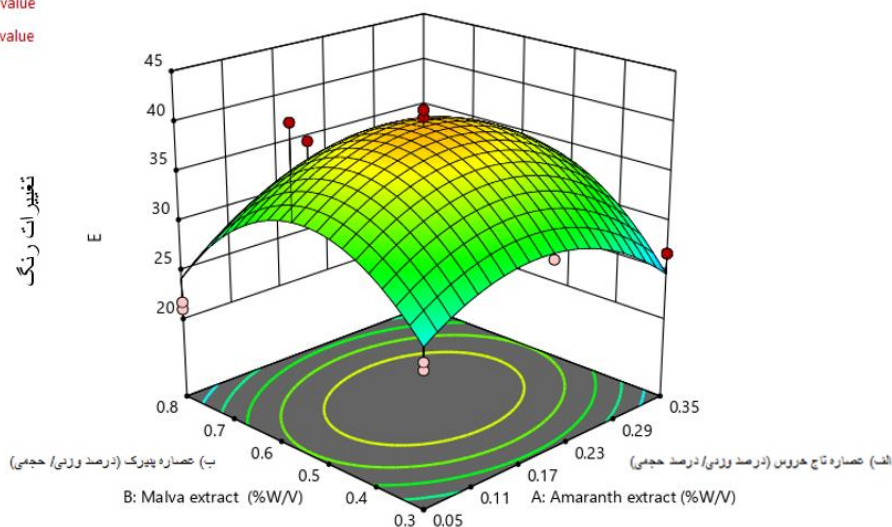
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

20.99 43.47

X1 = A: Amaranth extract

X2 = B: Malva extract



شکل ۹- نمودار سه بعدی اختلاف رنگ فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 9. Three-dimensional plot of the color difference of the films based on two variables

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

WI

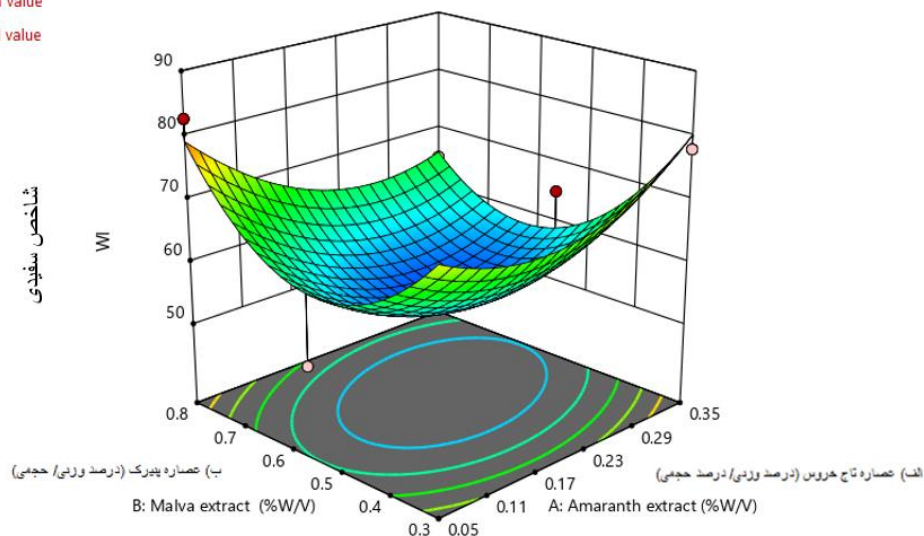
● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

51.11 82.71

X1 = A: Amaranth extract

X2 = B: Malva extract



شکل ۱۰- نمودار سه بعدی شاخص سفیدی فیلم‌ها بر اساس دو متغیر

Fig. 10. Three-dimensional plot of the whiteness index of the films based on two variables

نداشت، در حالی که فیلم‌های حاوی عصاره‌ها مقادیر MIC متفاوتی نشان دادند. کمترین مقدار MIC مربوط به عصاره پنیرک در برابر استافیلوکوکوس اورئوس (۱۳/۸۶ ppm) و بیشترین مقدار آن در برابر اشیشیاکلی (۲۴/۶۷ ppm) بود. این یافته‌ها بیانگر توان بالقوه ترکیبات زیست‌فعال موجود در پنیرک و تاج‌خروس در مهار رشد باکتری‌های

تعیین حداقل غلظت بازدارنده رشد

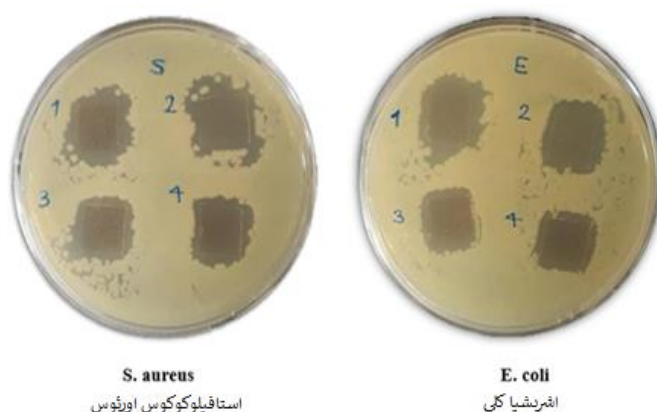
مهار رشد باکتری‌های اشیشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس توسط فیلم‌های ژلاتین و نانوفیبر کیتین حاوی عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و پنیرک با آزمون حداقل غلظت بازدارنده رشد بررسی شد. نتایج نشان داد که فیلم کنترل هیچ‌گونه ممانعتی در برابر رشد باکتری‌ها

بیماری‌زا است. افزایش اثرات ضد میکروبی فیلم‌های غنی‌شده را می‌توان به حضور پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها نسبت داد که از طریق تخریب غشای سیتوپلاسمی، تغییر نفوذپذیری غشاء، مهار آنزیم‌های تنفسی، و اتصال به DNA میکروبی سبب مهار رشد باکتری‌ها می‌شوند. علاوه بر این، ترکیب این عصاره‌ها با ماتریکس ژلاتین و نانوفیبرهای کیتین موجب رهایش تدریجی ترکیبات فعال و حفظ طولانی‌مدت خاصیت ضد میکروبی فیلم‌ها می‌شود (شکل ۱۱).

یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های پرانوتو و همکاران (Pranoto, Rakshit, & Salokhe, 2020) و بنبتایب و همکاران (Benbettaïeb, Karbowiak, & Debeaufort, 2021) مطابقت دارد. این پژوهشگران نشان دادند که افزودن عصاره‌های گیاهی غنی از ترکیبات فنولی به فیلم‌های پروتئینی و پلی‌ساکاریدی، باعث افزایش خاصیت ضد میکروبی در برابر گونه‌های گرم‌مثبت و گرم‌منفی می‌شود. در مطالعه‌ی بنبتایب و همکاران (Benbettaïeb et al., 2021)، فیلم‌های ژلاتینی حاوی عصاره‌های گیاهی در برابر *S. aureus* فعالیت قوی‌تری نسبت به *E. coli* نشان دادند که مشابه یافته‌های حاضر است.

دیسک انتشار

نتایج نشان داد با افزایش غلظت عصاره پنیرک و عصاره تاج‌خروس در فیلم‌ها، قطر هاله عدم رشد در برابر اشیریشیاکلی و استافیلوکوکوس



شکل ۱۱- خاصیت ضد میکروبی فیلم‌ها بر پایه ژلاتین
Fig. 11. Antimicrobial activity of gelatin-based films

و ویژگی‌های رنگی فیلم‌ها اهمیت دارند. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که فیلم ژلاتین/نانوفیبر کیتین حاوی غلظت پایین عصاره تاج‌خروس (۳٪ w/v) و عصاره پنیرک (۰/۵٪ w/v) دارای ناهمگنی و رگه‌هایی در سطح بود. با افزایش غلظت عصاره‌ها (۵۵٪ w/v تاج‌خروس و ۲٪ w/v پنیرک) سطح فیلم صاف‌تر

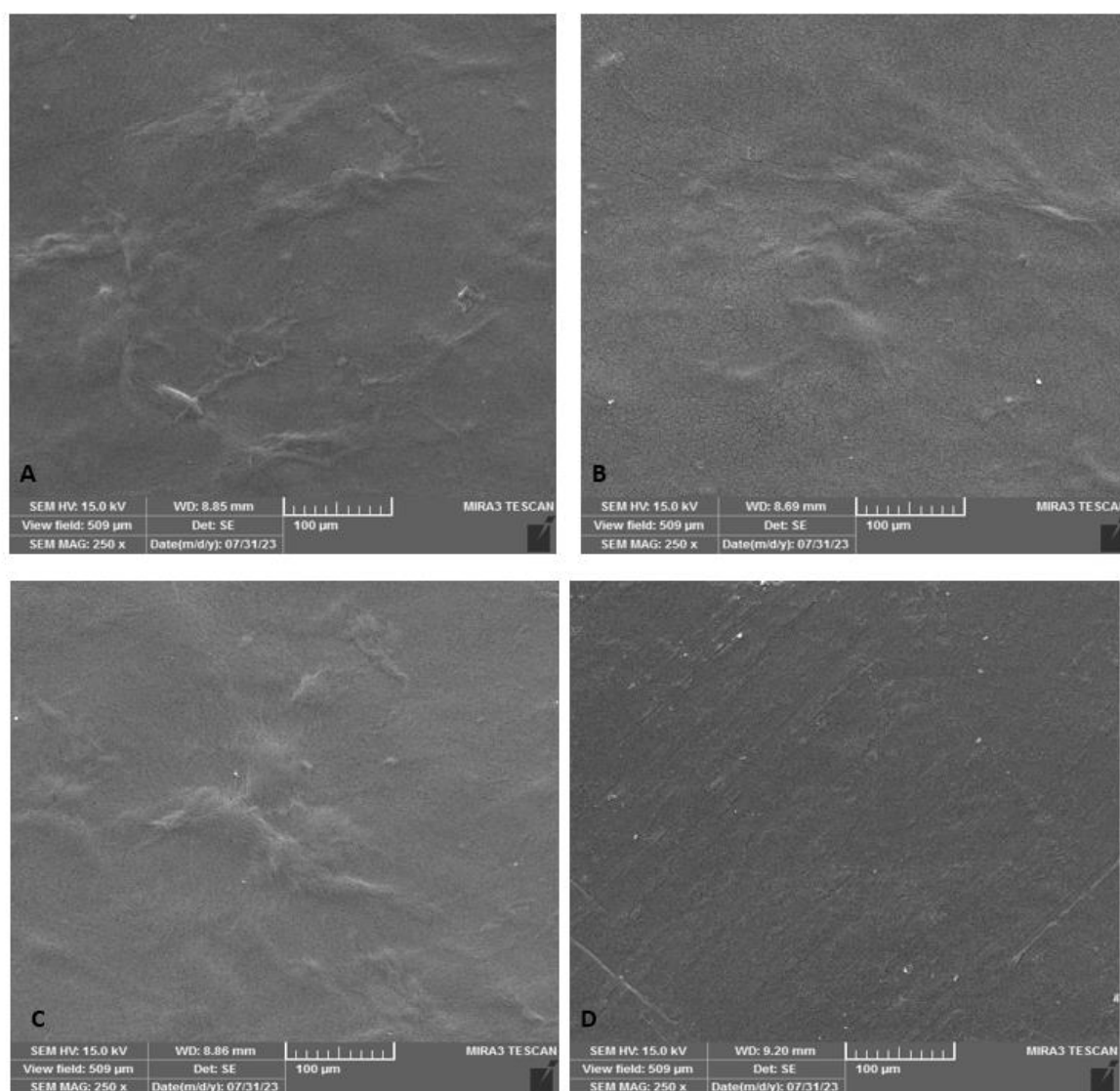
میکروسکوپ الکترونی روبشی

میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌منظور بررسی ریزساختار فیلم‌های هوشمند حاوی مقادیر مختلف عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و عصاره پنیرک و مقایسه آن‌ها با فیلم‌های فاقد عصاره استفاده شد. این بررسی‌ها در تفسیر نتایج آزمون‌های مکانیکی، نفوذپذیری به بخار آب

2024) هم‌خوانی دارد؛ این محققان گزارش کردند که افزودن عصاره‌های گیاهی غنی از آنتوسیانین به فیلم‌های زیستی موجب افزایش یکنواختی سطح، بهبود چسبندگی بین‌فازی و کاهش تخلخل سطحی در تصاویر SEM می‌شود.

گردید و در بالاترین غلظت‌ها (۸٪ w/v) تاج‌خروس و (۳۵٪ w/v) پنیرک) یکنواختی و صافی سطح به‌طور محسوسی افزایش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که آنتوسیانین‌ها موجب بهبود سازگاری بین ژلاتین و نانوفیبر کیتین و ارتقای ریزساختار فیلم‌ها می‌شوند (شکل ۱۲).

نتایج این پژوهش با یافته‌های محققین (Kumar, Prasad, & Yadav, 2021; Liu, Zhao, & Chen, 2022; Zhou et al.,



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی فیلم‌ها

Fig. 12. Scanning electron microscope (SEM) images of the films

رفت (شکل ۱۳). نوار گسترده در 3422 cm^{-1} به ارتعاشات کششی O-H و تشکیل پیوندهای هیدروژنی نسبت داده شد. باندهای مشاهده‌شده در محدوده $3100\text{--}2840\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی C-H در زنجیره پلیمری نانوفیبر کیتین بود. پیک‌های $2120\text{--}2160\text{ cm}^{-1}$ به

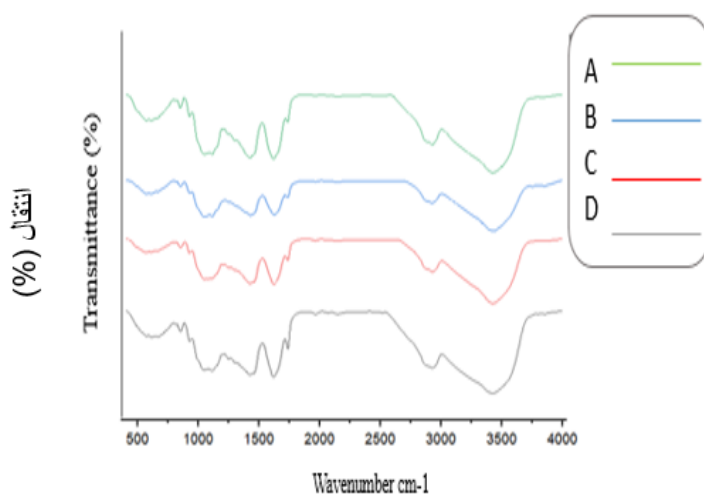
طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه برای بررسی برهم‌کنش‌های مولکولی و گروه‌های عاملی در فیلم‌های ژلاتین/نانوفیبر کیتین حاوی درصد‌های مختلف عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و عصاره پنیرک به‌کار

چسبندگی بین مولکولی و بهبود خواص مکانیکی و ممانعتی فیلم‌ها منجر شده‌اند (شکل ۱۳).

نتایج این تحلیل با یافته‌های محققین، (Liu et al., 2022; Salgado, Ortiz, & Mauri, 2022; Yin et al., 2023; Zhou et al., 2024) مطابقت دارد، که همگی گزارش کردند افزودن عصاره‌های گیاهی غنی از ترکیبات فنولی باعث جابه‌جایی باندهای آمید و O-H در طیف FTIR فیلم‌های زیستی شده و نشان‌دهنده‌ی برهم‌کنش‌های هیدروژنی و الکترواستاتیکی بین ترکیبات گیاهی و ماتریکس پلیمری است.

ارتعاشات گروه‌های N=N=N (آزید) و پیک 1963 cm^{-1} به ارتعاشات C-H در حلقه‌های آروماتیک اختصاص یافت. همچنین جذب قوی در محدوده 1600–1700 cm^{-1} به ارتعاشات خمشی گروه‌های معطر C=H و پیک‌های 1633–1647 cm^{-1} به ارتعاشات C=C در حلقه‌های آروماتیک مربوط بود که نشان‌دهنده حضور ترکیبات فنولی و معطر در عصاره‌های تاج‌خروس و پنیرک است. تغییرات مشاهده‌شده در موقعیت و شدت پیک‌ها بیانگر آن است که افزودن عصاره‌های تاج‌خروس و پنیرک موجب ایجاد برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین ترکیبات زیست‌فعال و ماتریکس ژلاتین/نانوفیبر کیتین شده است. این برهم‌کنش‌ها احتمالاً به تشکیل شبکه‌های پایدارتر، افزایش



طول موج (سانتی متر^{-۱})

شکل ۱۳- الگوهای طیف سنجی مادون قرمز؛ فیلم حاوی ۰/۰۵ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۳ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (A)، فیلم حاوی ۰/۱۶۵۸ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۵۵۸ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (B)، فیلم حاوی ۰/۲ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۵۵ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (C)، فیلم حاوی ۰/۳۵ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۸ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (D)

Fig. 13. Fourier-transform infrared (FTIR) spectra patterns: (A) film containing 0.05% v/v malva extract and 0.3% w/v amaranth extract; (B) film containing 0.1658% w/v malva extract and 0.558% w/v amaranth extract; (C) film containing 0.2% w/v malva extract and 0.55% w/v amaranth extract; (D) film containing 0.35% w/v malva extract and 0.8% w/v amaranth extract

بود. مقایسه منحنی‌های پراش بین فیلم کنترل و فیلم‌های حاوی غلظت‌های مختلف عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس (۰/۳، ۰/۵۵ و ۰/۸) و عصاره پنیرک (۰/۰۵، ۰/۲ و ۰/۳۵) نشان داد که افزودن عصاره‌ها تغییر قابل توجهی در موقعیت پیک‌ها ایجاد نکرد. این موضوع حاکی از آن است که ترکیبات آنتوسیانینی تاج‌خروس و پنیرک بر ماهیت کریستالی ماتریکس ژلاتین/نانوفیبر کیتین اثر بارزی نداشته و بیشتر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطحی مؤثر بوده‌اند. کاهش جزئی شدت پیک‌ها و پهن‌تر شدن آن‌ها می‌تواند ناشی از برهم‌کنش‌های

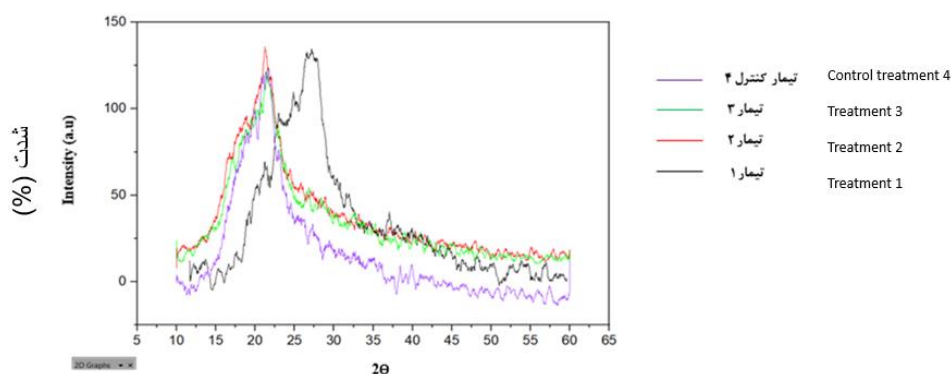
پراش اشعه ایکس

خصوصیات کریستالی مواد بسته‌بندی نقش مهمی در خواص مکانیکی فیلم‌ها دارند. به همین منظور، ساختار فیلم ژلاتین/نانوفیبر کیتین بدون عصاره و فیلم‌های حاوی عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و پنیرک با استفاده از پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت.

فیلم‌های کنترل (فاقد عصاره) پیک پراش مشخصی در محدوده $\Theta = 18-28$ نشان دادند که بیانگر ساختار نیمه‌کریستالی بیوپلیمر

سطحی نقش دارند تا در بازآرایی ساختار کریستالی شبکه‌ی پلیمری (شکل ۱۴).

نتایج حاصل با یافته‌های محققین (Fang, Zhao, & Xu, 2019; Kumar, Prasad, & Yadav, 2022; Zhou et al., 2024) مطابقت دارد؛ این پژوهشگران نیز گزارش کردند که افزودن عصاره‌های گیاهی غنی از ترکیبات فنولی و آنتوسیانینی به فیلم‌های بر پایه‌ی ژلاتین یا کیتوزان تغییر محسوسی در موقعیت پیک‌های XRD ایجاد نمی‌کند، اما موجب کاهش نسبی شدت آن‌ها و افزایش نواحی آمورف می‌شود.



شکل ۱۴- الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های کنترل و تیمار بندی شده؛ فیلم کنترل (تیمار ۴)، فیلم حاوی ۰/۰۵ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۳ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (تیمار ۳)، فیلم حاوی ۰/۱۶۵۸ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۵۵۸ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (تیمار ۲)، فیلم حاوی ۰/۳۵ درصد وزنی حجمی عصاره پنیرک و ۰/۸ درصد وزنی حجمی عصاره تاج خروس (تیمار ۱)
Fig. 14. X-ray diffraction (XRD) patterns of control and treated samples: control film (Treatment 4); film containing 0.05% w/v malva extract and 0.3% w/v amaranth extract (Treatment 3); film containing 0.1658% w/v malva extract and 0.558% w/v amaranth extract (Treatment 2); film containing 0.35% w/v malva extract and 0.8% w/v amaranth extract (Treatment 1)

($Sa=58/65$ و $Sq=60/43$ نانومتر). نهایتاً در بالاترین غلظت‌ها (۰/۳۵ درصد پنیرک و ۰/۸ درصد تاج‌خروس)، بیشترین میزان ناصافی سطح ثبت شد ($Sa=62/56$ و $Sq=64/33$). به‌طور کلی، افزایش غلظت عصاره‌های آنتوسیانینی تاج‌خروس و پنیرک موجب افزایش زبری و ناصافی سطح فیلم‌ها شد که می‌تواند بر ویژگی‌های عملکردی آن‌ها تأثیرگذار باشد (شکل ۱۵).

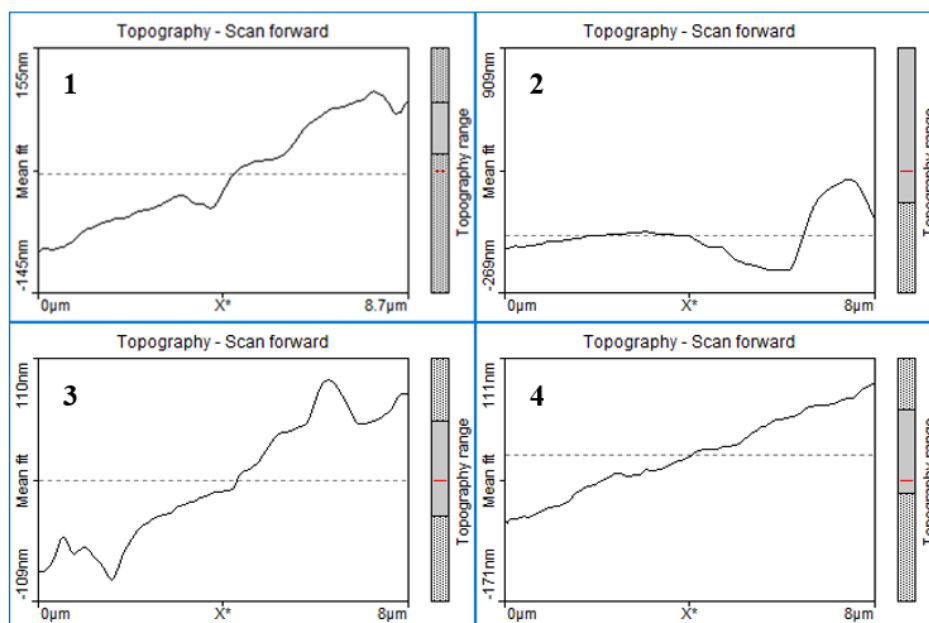
الگوهای به‌دست‌آمده با یافته‌های محققین (Benbettaieb et al., 2021; Zhou et al., 2024; Yin et al., 2023) مطابقت دارد؛ این پژوهشگران نیز گزارش کردند که افزودن عصاره‌های گیاهی غنی از ترکیبات فنولی و آنتوسیانینی باعث افزایش زبری سطحی فیلم‌های بر پایه‌ی ژلاتین و کیتین شده و به‌واسطه‌ی تعاملات بین‌مولکولی جدید، توپوگرافی ناهمگن‌تری ایجاد می‌کند.

هیدروژنی بین گروه‌های فنولی عصاره‌ها و گروه‌های آمینی یا هیدروکسیلی موجود در ماتریکس ژلاتین/نانوفیبر کیتین باشد، که موجب محدود شدن بازآرایی منظم زنجیره‌ها در نواحی کریستالی می‌گردد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزودن عصاره‌های گیاهی عمدتاً باعث افزایش نواحی آمورف و بهبود انعطاف‌پذیری فیلم‌ها می‌شود، بدون اینکه ساختار پایه‌ی کریستالی دچار تخریب گردد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیبات آنتوسیانینی تاج‌خروس و پنیرک بر ماهیت کریستالی ماتریکس ژلاتین/نانوفیبر کیتین تأثیر قابل توجهی ندارند و بیشتر در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و

میکروسکوپ نیروی اتمی

توپوگرافی و زبری سطح فیلم‌های ژلاتین/نانوفیبر کیتین حاوی عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و عصاره پنیرک با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفت. زبری سطح یکی از عوامل مؤثر بر نفوذپذیری و مهاجرت ترکیبات در فیلم‌ها به‌شمار می‌رود.

نتایج نشان داد که فیلم کنترل (ژلاتین/نانوفیبر کیتین بدون عصاره) کمترین میزان زبری سطح را داشت ($Sa=23/04$ نانومتر و $Sq=24/89$ نانومتر). با افزودن ۰/۰۵ درصد عصاره پنیرک و ۰/۳ درصد عصاره تاج‌خروس، میزان زبری افزایش یافت ($Sa=26/07$ و $Sq=28/91$ نانومتر). در غلظت‌های بالاتر (۰/۱۶۵۸ درصد پنیرک و ۰/۵۵۸ درصد تاج‌خروس)، زبری سطح به‌طور محسوسی افزایش پیدا کرد



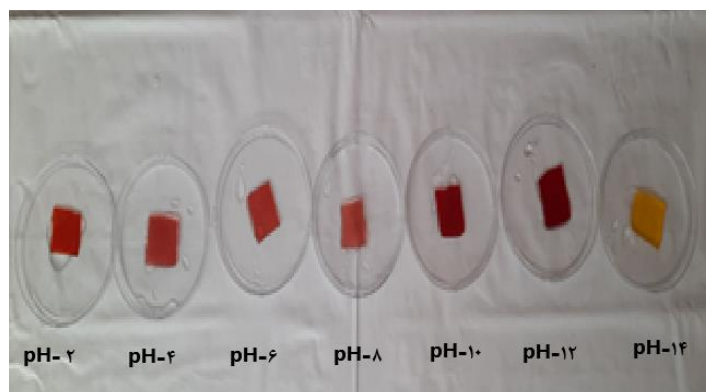
شکل ۱۵- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی فیلم‌های کنترل و تیمار بندی شده
Fig. 15. Atomic force microscopy (AFM) images of control and treated films

عصاره آنتوسیانینی تاج خروس نسبت به پنیرک، واکنش رنگی فیلم‌ها عمده‌تاً تحت‌تأثیر این عصاره قرار داشت. این نتایج نشان می‌دهد فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر حاوی عصاره آنتوسیانینی تاج خروس و پنیرک قابلیت تغییر رنگ در گستره وسیعی از pH را دارند و می‌توانند به‌عنوان بسته‌بندی هوشمند مورد استفاده قرار گیرند (شکل ۱۶).

این یافته‌ها با نتایج محققین (Kumar et al., Lu et al., 2019; Zhou et al., 2024; 2021) هم‌خوانی دارد؛ این پژوهشگران نیز گزارش کردند که فیلم‌های زیستی حاوی رنگدانه‌های آنتوسیانینی از عصاره‌های گیاهی، در گستره‌ی وسیعی از pH تغییر رنگ قابل توجهی نشان می‌دهند و قابلیت کاربرد در بسته‌بندی‌های هوشمند برای پایش تازگی مواد غذایی را دارند.

واکنش فیلم‌ها به تغییرات pH

پاسخ رنگ به‌عنوان شاخصی مهم برای تعیین تغییرات در فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر به‌ویژه زمانی که با عصاره‌های طبیعی غنی از آنتوسیانین ترکیب شوند، مطرح است. نتایج نشان داد فیلم‌های مبتنی بر ژلاتین/نانوفیبرکیتین حاوی عصاره آنتوسیانینی تاج خروس و پنیرک نسبت به تغییرات pH حساسیت بالایی داشته و در مدت کوتاهی تغییر رنگ قابل مشاهده‌ای ایجاد می‌کنند. بررسی طیف رنگی در محلول‌های بافری مختلف نشان داد که این فیلم‌ها در pH اسیدی (۱-۶) قرمز، در pH خنثی قرمز متمایل به صورتی، در pH ۱۰-۱۲ ارغوانی و در محیط‌های قلیایی قوی (۱۳-۱۴) زرد بودند. به‌دلیل غلظت بالاتر



شکل ۱۶- واکنش فیلم‌ها به تغییرات pH
Fig. 16. Response of the films to pH changes

تعیین پروفیل اسیده‌های چرب ماهی کپور با گاز کروماتوگرافی

نتایج نشان می‌دهد که ماهی کپور حاوی مقادیر قابل توجهی از اسیده‌های چرب غیراشباع، به‌ویژه ¹MUFA (اولئیک اسید) و ²PUFA (لینولئیک اسید)، ³EPA و ⁴DHA است که برای سلامت قلب و عروق و عملکرد سیستم ایمنی اهمیت دارند. با این حال، میزان EPA و DHA در کپور نسبت به گونه‌های چرب‌تر مانند سالمون کمتر است. بنابراین، حفظ پایداری این ترکیبات طی فرآیند نگهداری و بسته‌بندی اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند با کاهش اکسیداسیون چربی‌ها به حفظ کیفیت تغذیه‌ای ماهی کمک کند.

نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌راستا بود؛ به‌طوری‌که علی و همکاران (Ali, Rauf, & Ahmad, 2023) نیز گزارش کردند که اولئیک و لینولئیک اسیدها از اجزای اصلی چربی ماهی کپور معمولی هستند و نسبت PUFA/MUFA به‌طور مستقیم بر کیفیت تغذیه‌ای و ارزش سلامتی گوشت ماهی اثر دارد. همچنین ونگ و همکاران (Wang et al., 2024) بیان کردند که گونه‌های چرب‌تر مانند سالمون، مقادیر بالاتری از EPA و DHA نسبت به ماهی‌های آب شیرین مانند کپور دارند که این اختلاف به رژیم غذایی و شرایط محیطی ماهیان نسبت داده می‌شود. در همین راستا، الحادف و همکاران (Elhadeif, Remédio, & Kanatt, 2024) نیز گزارش کردند که استفاده از پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر حاوی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی می‌تواند سرعت اکسیداسیون PUFA را کاهش داده و پایداری چربی‌ها را طی نگهداری افزایش دهد.

از آنجا که PUFA ها به‌ویژه EPA و DHA نسبت به اکسیداسیون بسیار حساس هستند، حفظ پایداری این ترکیبات در طول فرآیند نگهداری و بسته‌بندی اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، استفاده از فیلم‌های ژلاتین/نانوفیبرکیتین حاوی عصاره‌های گیاهی پنیرک و تاج‌خروس به‌دلیل دارا بودن ترکیبات فنلی و خاصیت آنتی‌اکسیدانی قوی، موجب کاهش اکسیداسیون چربی‌ها و حفظ ترکیب اسیده‌های چرب مفید در نمونه‌های بسته‌بندی شده گردید. این یافته‌ها با نتایج تانپچای و همکاران (Tanpichai, Pumpuang, Srimarut, & Woraprayote, 2023) نیز هم‌خوانی دارد که گزارش کردند نانوفیبرهای کیتین به‌عنوان عامل تقویت‌کننده و پایدارکننده چربی‌ها، نقش مؤثری در جلوگیری از تجزیه لیپیدها و بهبود عمر ماندگاری محصولات غذایی ایفا می‌کنند.

آزمون بسته‌بندی

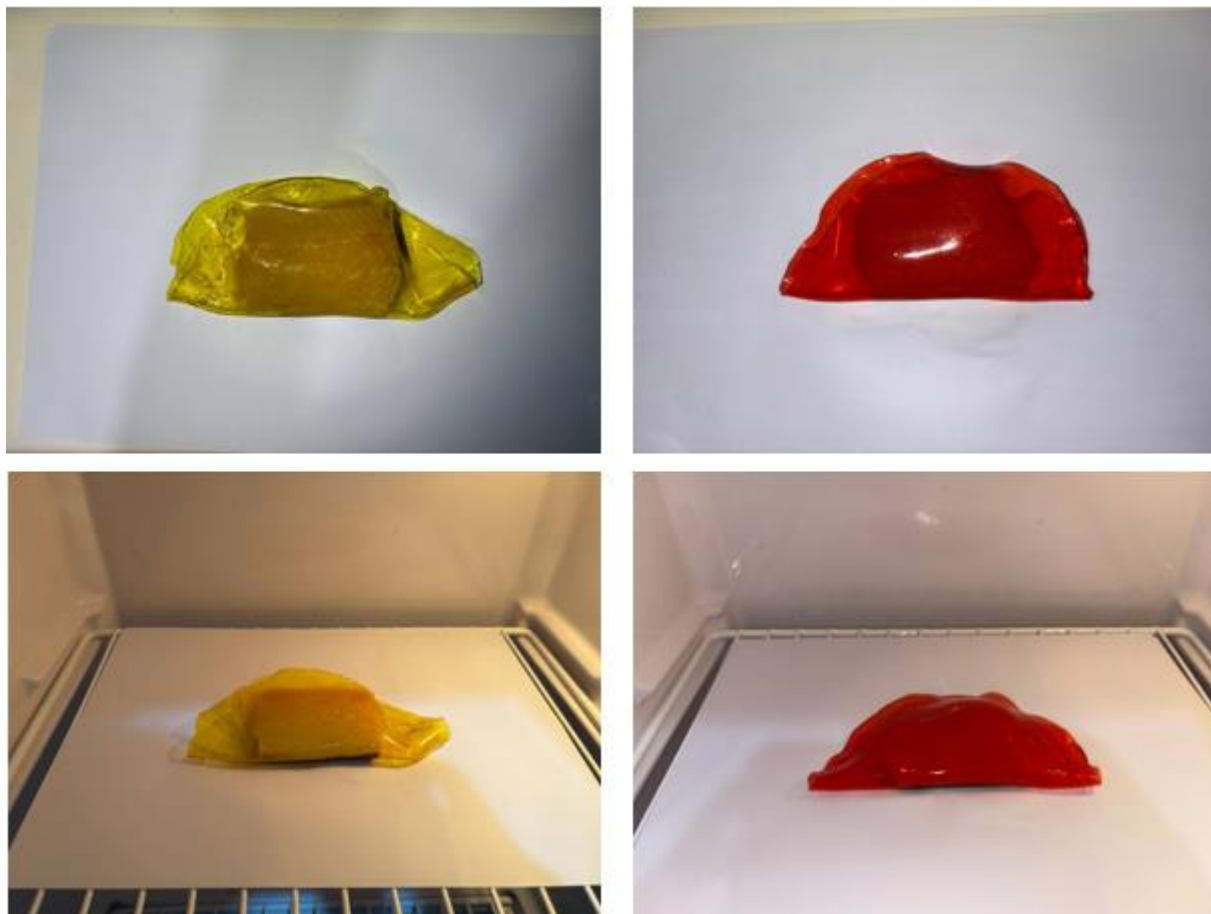
یکی از کاربردهای اصلی فیلم‌های حساس به pH، بررسی تغییرات طراوت محصولات دریایی در طول نگهداری است. فساد ماهی عمدتاً به‌دلیل فعالیت آنزیمی و میکروبی رخ می‌دهد که منجر به تشکیل ترکیبات نیتروژنی فرار و افزایش pH می‌شود. در این پژوهش، از فیلم بهینه ژلاتین/نانوفیبرکیتین حاوی عصاره آنتوسیانینی گل تاج‌خروس و عصاره پنیرک برای بسته‌بندی فیله ماهی کپور استفاده شد. نتایج نشان داد پس از ۷۲ ساعت نگهداری در دمای یخچال (۷ درجه سانتی‌گراد)، فیلم‌های حاوی عصاره تغییر رنگ محسوسی از قرمز به زرد در pH بالا نشان دادند که بیانگر فساد نمونه‌های ماهی بود. این تغییر به تشکیل ترکیبات قلیایی فرار ناشی از تجزیه پروتئین‌ها و چربی‌ها نسبت داده شد. بنابراین، فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر حاوی عصاره آنتوسیانینی گل تاج‌خروس و پنیرک می‌توانند به‌عنوان شاخص بصری کارآمدی برای تشخیص تازگی ماهی عمل کنند (شکل ۱۷).

نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد. برای مثال، طاهیر و همکاران (Tahir et al., 2024) گزارش کردند فیلم ژلاتین حاوی عصاره آنتوسیانینی پوست انگور در بسته‌بندی فیله ماهی آزاد، طی نگهداری در دمای ۲۵ °C تغییر رنگ قابل مشاهده‌ای متناسب با افزایش pH و تولید آمین‌های فرار نشان داد. همچنین هونگ و همکاران (Hong et al., 2022) بیان کردند فیلم‌های مبتنی بر آنتوسیانین توت‌سیاه قادرند فساد میکروبی محصولات دریایی را از طریق تغییر رنگ از قرمز به سبز در بازه‌ی ۲۴ تا ۳۶ ساعت آشکار کنند. در مطالعه‌ای دیگر، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2024) فیلم‌های پکتین حاوی رنگدانه طبیعی را به‌عنوان شاخص مؤثر برای تشخیص تازگی گوشت و ماهی معرفی کردند که در محدوده‌ی pH ۶ تا ۸ پاسخ رنگی خطی نشان دادند.

در پژوهش حاضر نیز همانند مطالعات فوق، رنگ قرمز اولیه فیلم‌های آنتوسیانینی در شرایط اسیدی حفظ شد و با افزایش pH ناشی از فساد، به رنگ‌های زرد و نارنجی تغییر یافت. این رفتار رنگی ناشی از تغییر ساختار شیمیایی آنتوسیانین‌ها از فرم فلاوینیوم (در محیط اسیدی) به فرم کوئینوید باز (در محیط قلیایی) است. چنین پاسخ رنگی سریع و برگشت‌ناپذیر در حضور ترکیبات قلیایی، نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالای فیلم‌های تهیه‌شده برای تشخیص بصری فساد محصولات دریایی است.

3- Eicosapentaenoic acid
4- Docosahexaenoic acid

1- Monounsaturated fatty acid
2- Polyunsaturated fatty acid



شکل ۱۷- تست بسته‌بندی فیلم بهینه

تیمار بهینه حاوی ۰/۵۵۸٪ عصاره تاج خروس و ۰/۱۶۵٪ عصاره پنیرک می باشد.

Fig. 17. Packaging test of the optimized film

The optimal treatment containing 0.558% amaranth extract and 0.165% malva extract.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فیلم‌های بسته‌بندی هوشمند زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه ژلاتین و نانوفیبرکیتین با استفاده از عصاره آنتوسیانینی تاج‌خروس و عصاره پنیرک تولید و ارزیابی شدند. بهینه‌سازی فرمولاسیون نشان داد که ترکیب این عصاره‌ها موجب بهبود خواص مکانیکی، رنگی و عملکردی فیلم‌ها گردید. بررسی‌های میکروسکوپی بیانگر تغییرات ساختار سطحی و یکنواختی بیشتر فیلم‌ها در حضور عصاره‌های طبیعی بود و طیف‌سنجی مادون قرمز نیز برهم‌کنش میان اجزای تشکیل‌دهنده را تأیید کرد. آزمون‌های عملکردی نشان دادند که این فیلم‌ها نسبت به تغییرات pH حساس بوده و توانایی تغییر رنگ در شرایط مختلف را دارند، به‌گونه‌ای که می‌توانند به‌عنوان شاخص بصری برای تعیین تازگی مواد غذایی به‌کار روند. علاوه بر این، فعالیت ضد میکروبی فیلم‌ها علیه باکتری‌های شاخص غذایی ثابت کرد که این نوع بسته‌بندی می‌تواند علاوه بر نظارت بر کیفیت، به افزایش ایمنی و ماندگاری مواد غذایی کمک کند. به‌طور کلی، فیلم‌های تولیدشده قابلیت جایگزینی

مناسبی برای بسته‌بندی‌های متداول دارند و می‌توانند در راستای توسعه بسته‌بندی‌های پایدار و هوشمند در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرند.

میزان مشارکت نویسندگان

نادیا ترقی خواه: پیش‌نویس اصلی، تحقیق و بررسی، مدیریت پروژه. **علی ایاسه:** بررسی و ویرایش مقاله، اعتبارسنجی. **صبا میلانی:** بررسی و ویرایش مقاله، نرم‌افزار، اعتبارسنجی. **شهرک واتگر:** بررسی و ویرایش، نظارت.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

References

1. Ahmed, I., Lin, H., Zou, L., Li, Z., Brody, A.L., Qazi, I.M., Lv, L., Pavase, T.R., Khan, M.U., Khan, S., & Sun, L. (2018). An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products. *Packaging Technology and Science*, 31(7), 449–471. <https://doi.org/10.1002/pts.2380>
2. Ali, M., Rauf, A., & Ahmad, N. (2023). Fatty acid composition and nutritional quality of common carp (*Cyprinus carpio*) from different habitats. *Aquaculture Reports*, 32, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101637>
3. Asdag, A., & Pirs, S. (2020). Bacterial and oxidative control of local butter with smart/active film based on pectin/nanoclay/*Carum copticum* essential oils/ β -carotene. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.192>
4. Batiha, G.E.-S., Tene, S.T., Teibo, J.O., Shaheen, H.M., Oluwatoba, O.S., Teibo, T.K.A., Al-kuraishy, H.M., Al-Garbee, A.I., Alexiou, A., & Papadakis, M. (2023). The phytochemical profiling, pharmacological activities, and safety of *Malva sylvestris*: a review. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 396(3), 421–440. <https://doi.org/10.1007/s00210-022-02329-w>
5. Benbettaieb, N., Karbowiak, T., & Debeaufort, F. (2021). Surface characterization of gelatin-based biofilms incorporated with natural antioxidants using AFM and SEM. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 152–167.
6. Bilgiç, S., Söğüt, E., & Seydim, A.C. (2019). Chitosan and starch based intelligent films with anthocyanins from eggplant to monitor pH variations. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7, 61–66. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7isp1.61-66.2705>
7. Cazón, P., Velazquez, G., Ramírez, J.A., & Vázquez, M. (2018). Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 68, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>
8. Dong, H., Ling, Z., Zhang, X., Zhang, X., Ramaswamy, S., & Xu, F. (2020). Smart colorimetric sensing films with high mechanical strength and hydrophobic properties for visual monitoring of shrimp and pork freshness. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 309, 127752. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127752>
9. Elhadeif, K., Chaari, M., Akermi, S., Ben Hlima, H., Ennouri, M., Abdelkafi, S., Agriopoulou, S., Ali, D.S., Boulekbache-Makhlouf, L., Mellouli, L., & Smaoui, S. a(2024). pH-sensitive films based on carboxymethyl cellulose/date pits anthocyanins: A convenient colorimetric indicator for beef meat freshness tracking. *Food Bioscience*, 57, 103508. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103508>
10. Elhadeif, K., Chaari, M., Akermi, S., Ennouri, K., Ben Hlima, H., Fourati, M., Mtibaa, A., Ennouri, M., Sarkar, T., Shariati, M., Gökşen, G., Mirian, P., Mellouli, L., Lorenzo, J., Smaoui, S. b(2024). Development of bioactive gelatin-based films containing plant phenolic extracts. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 101089.
11. Elhadeif, R., Remédio, L.N., & Kanatt, S. (2024). Active biopolymer films incorporated with plant extracts to retard lipid oxidation in fish fillets. *LWT- Food Science and Technology*, 185, 115002. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115002>
12. Fernández-Marín, R., Fernandes, S.C.M., Sánchez, M.Á.A., & Labidi, J. (2022). Halochromic and antioxidant capacity of smart films of chitosan/chitin nanocrystals with curcuma oil and anthocyanins. *Food Hydrocolloids*, 123, 107119. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107119>
13. Fang, Z., Zhao, Y., & Xu, Z. (2019). Crystallinity and structural modification of gelatin-based films incorporated with natural extracts studied by XRD. *Food Hydrocolloids*, 89, 343–351.
14. Freitas, P. A., de Oliveira, T. V., Silva, R. R., e Moraes, A. R. F., Pires, A. C. D. S., Soares, R. R., ... & Soares, N. F. (2020). Effect of pH on the intelligent film-forming solutions produced with red cabbage extract and hydroxypropylmethylcellulose. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100604.
15. Gasparetto, J.C., Martins, C.A.F., Hayashi, S.S., Otaky, M.F., & Pontarolo, R. (2012). Ethnobotanical and scientific aspects of *Malva sylvestris* L.: a millennial herbal medicine. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 64(2), 172–189. <https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.2011.01383.x>
16. Gasti, T., Dixit, S., D'souza, O.J., Hiremani, V.D., Vootla, S.K., Masti, S.P., Chougale, R.B., & Malabadi, R.B. (2021). Smart biodegradable films based on chitosan/methylcellulose containing *Phyllanthus reticulatus* anthocyanin for monitoring the freshness of fish fillet. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 451–461. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.128>
17. Goluch, Z., Rybarczyk, A., Poławska, E., & Haraf, G. (2023). Fatty acid profile and lipid quality indexes of the meat and backfat from porkers supplemented with EM Bokashi probiotic. *Animals*, 13(20), 3298. <https://doi.org/10.3390/ani13203298>
18. Hashim, S.B.H., Tahir, H.E., Mahdi, A.A., Liu, L., Zhang, J., Zhai, X., Ibrahim, N.A., Mahunu, G.K., Awad, F.N., Hassan, M.M., Xiaobo, Z., & Jiyong, S. (2022). Development of smart colorimetric sensing films carbohydrate-based with soybean wax and purple cauliflower anthocyanins for visual monitoring of shrimp freshness. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(10), 4362–4376. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02483-5>
19. He, Y., Lu, L., Lin, Y., Li, R., Yuan, Y., Lu, X., Zou, Y., Zhou, W., Wang, Z., & Li, J. (2022). Intelligent pH-sensing film based on polyvinyl alcohol/cellulose nanocrystal with purple cabbage anthocyanins for visually

- monitoring shrimp freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 218, 900–908. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.194>
20. Hosseini, S.F., Gómez-Guillén, M.C., & Regenstein, J.M. (2020). Effect of plant polyphenols on fish gelatin films: Physical and structural properties. *Food Hydrocolloids*, 98, 105292.
 21. Hong, Y., Wang, Y., Liu, X., & Zhang, L. (2022). Colorimetric pH indicator films based on natural anthocyanins for intelligent monitoring of seafood spoilage. *Food Hydrocolloids*, 128, 107556. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107556>
 22. Hu, H., Yao, X., Qin, Y., Yong, H., & Liu, J. (2020). Development of multifunctional food packaging by incorporating betalains from vegetable amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) into quaternary ammonium chitosan/fish gelatin blend films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.103>
 23. Kanatt, S.R. (2020). Development of active/intelligent food packaging film containing Amaranthus leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 24(February 2019), 100506. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100506>
 24. Khezerlou, A., Tavassoli, M., Alizadeh Sani, M., Ehsani, A., & McClements, D.J. (2023). Smart packaging for food spoilage assessment based on *Hibiscus sabdariffa* L. anthocyanin-loaded chitosan films. *Journal of Composites Science*, 7(10), 404. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3080770/v1>
 25. Kumar, N., Prasad, P., & Yadav, S. (2021). Morphological and functional characterization of gelatin composite films containing plant polyphenols. *Carbohydrate Polymers*, 255, 117366.
 26. Kumar, N., Prasad, P., & Yadav, S. (2022). Effect of plant polyphenols on structural and crystalline characteristics of gelatin/chitosan biocomposite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 210, 1024–1035.
 27. Kuswandi, B., Oktaviana, D., & Abdullah, A. (2023). Progress in intelligent packaging systems for food freshness monitoring: Mechanisms, materials, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 137, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.005>
 28. Liu, X., Zhao, Y., & Chen, L. (2022). Structural and morphological properties of gelatin–chitosan films enriched with natural anthocyanin extracts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 210, 103–112.
 29. Lu, Y., Weng, L., & Zhang, L. (2019). Colorimetric response of anthocyanin-based biopolymer films as pH indicators. *Food Hydrocolloids*, 90, 114–123.
 30. Mousavi, M., Rezaei, M., & Hashemi, M. (2021). The effect of herbal extracts on the physicochemical and barrier properties of gelatin–chitosan composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 180, 707–716.
 31. Pranoto, Y., Rakshit, S.K., & Salokhe, V.M. (2020). Antimicrobial activity of edible films incorporated with natural plant extracts. *LWT - Food Science and Technology*, 132, 109906. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.09.014>
 32. Sani, M.A., Tavassoli, M., Hamishehkar, H., & McClements, D.J. (2021). Carbohydrate-based films containing pH-sensitive red barberry anthocyanins: Application as biodegradable smart food packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 255, 117488. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117488>
 33. Salgado, P.R., Ortiz, C.M., & Mauri, A.N. (2022). Interactions between protein-based biopolymer films and natural extracts analyzed by FTIR spectroscopy. *Food Hydrocolloids*, 129, 107691.
 34. Sohany, M., Tawakkal, I.S.M.A., Ariffin, S.H., Shah, N.N.A.K., & Yusof, Y.A. (2021). Characterization of anthocyanin associated purple sweet potato starch and peel-based pH indicator films. *Foods*, 10(9), 2005. <https://doi.org/10.3390/foods10092005>
 35. Tahir, H., Ahmad, T., & Mehmood, S. (2024). Development of gelatin-based intelligent films incorporating grape skin anthocyanins for monitoring fish freshness. *Food Packaging and Shelf Life*, 42, 103235. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.103235>
 36. Tanpichai, S., Pumpuang, L., Srimarut, Y., & Woraprayote, W. (2023). Development of chitin nanofiber coatings for prolonging shelf life and inhibiting lipid oxidation in fresh fish. *Scientific Reports*, 13, 13195. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39739-6>
 37. Tongnuanchan, P., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2022). Influence of natural extracts on moisture content and mechanical properties of gelatin-based films. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 101143
 38. Valcarcel, J., Hermida-Merino, C., Piñeiro, M.M., Hermida-Merino, D., & Vázquez, J.A. (2021). Extraction and characterization of gelatin from skin by-products of Seabream, Seabass and Rainbow Trout reared in aquaculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12104. <https://doi.org/10.3390/ijms222212104>
 39. Vidal, C.P., Velásquez, E., Galotto, M.J., & López de Dicastillo, C. (2021). Antimicrobial food packaging system based on ethyl lauroyl arginate-loaded core/shell electrospun structures by using hydrophilic and hydrophobic polymers. *Polymer Testing*, 93, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106937>
 40. Wang, Y., Zhang, H., & Li, J. (2024). Comparative analysis of lipid profiles and omega-3 fatty acids in freshwater and marine fish species. *Food Chemistry*, 431, 137012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.137012>

41. Wu, C., Li, Y., Sun, J., Lu, Y., Tong, C., Wang, L., Yan, Z., & Pang, J. (2020). Novel konjac glucomannan films with oxidized chitin nanocrystals immobilized red cabbage anthocyanins for intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 98, 105245. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105245>
42. Yi, F., Hou, F., Zhan, S., Song, L., Zhang, R., Han, X., Sun, X., & Liu, Z. (2023). Preparation, characterization and application of pH-responsive smart film based on chitosan/zein and red radish anthocyanin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127037. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127037>
43. Yin, X., Zhao, Y., & Qian, Y. (2023). AFM and morphological analysis of bioactive films enriched with anthocyanin-rich plant extracts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 223, 124–136.
44. Zhang, J., Chen, X., Li, P., & Zhao, H. (2024). Recent advances in pH-sensitive indicator films based on natural pigments: A review. *Food Chemistry*, 436, 137247. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.137247>
45. Zhao, R., Liu, Y., & Chen, Y. (2023). Incorporation of anthocyanin-rich plant extracts into biopolymer films: Effects on optical and antioxidant properties. *Carbohydrate Polymers*, 310, 120657.
46. Zhou, L., Zhang, R., & Han, X. (2024). XRD and morphological characterization of anthocyanin-loaded biopolymer films for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 36, 101288. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101351>

Research Article
Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 157-173

Evaluation of Nutritional and Physicochemical Properties of Biscuits Enriched with Roasted Lentil Flour and Rice Bran Powder

A. Ayoubi^{1*}, M. Balvardi¹

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(* - Corresponding Author Email: mayoubi92@uk.ac.ir)

Received: 26.11.2025	How to cite this article:
Revised: 19.01.2026	Ayoubi, A., & Balvardi, M. (2026). Evaluation of nutritional and physicochemical properties of biscuits enriched with roasted lentil flour and rice bran powder. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 22(2), 157-173. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.96693.1523
Accepted: 14.02.2026	
Available Online: 09.05.2026	

Introduction

Addition of dietary fiber sources to high-consumption food products is a smart way to increase the amount of fiber intake through the daily diet. Biscuits are one of the most popular bakery products. Wheat flour is the most significant ingredient for biscuit production in terms of quantity, its quality plays a major role in the quality of the final product, especially in terms of nutritional value and texture. Fiber sources such as cereals, legumes, and other plant products such as nuts, fruits, and vegetables can be used to enrich the wheat flour with the aim of improving the nutritional properties of wheat flour-based products.

Lentils are one of the most important legumes with high nutritional value and low anti-nutritional factors, traditionally consumed as a minimally processed product. The functional properties of lentil proteins are one of the reasons for their special potential application in the production of various types of food products. Due to the presence of various essential amino acids such as leucine, isoleucine, lysine, phenylalanine, and valine, as well as high levels of fiber, B group of vitamins, and minerals, the addition of lentil flour, even flour prepared from low-grade lentils, aids in improving wheat flour and increasing the quality of bakery products.

In recent years, attention of many manufacturers and researchers has been directed towards the use of various cereal bran as a source of fiber in the production of bakery products. Rice bran is a by-product of rice processing and milling and, as a cheap source of fiber, can be included in the human diet. Considering the importance and benefits of using dietary fibers in bakery products, in the present study, the effects of using roasted lentil flour and rice bran powder (at 0, 3, 6, 9, 12 and 15% l) as natural sources of dietary fiber, on the physicochemical and sensory properties of biscuits were studied.

Materials and Methods

To prepare the biscuit dough, 350 gr flour, 105 gr f sugar, 105 gr shortening, one egg, 3.5 gr vanilla, 1.75 gr salt, and 10.5 gr baking powder were used. After molding, baking was done at 160 °C for 15 minutes.

The moisture of biscuit was measured using AACC 44-19 method and pH was measured using a digital pH meter (3020, Jenway, UK). Ash was measured according to AACC 08-01 standard method (2000), protein was measured according to AACC 46-18 standard method (1999), and the raw fiber was measured after acid and alkaline digestion according to AACC 32-10 standard method (2000). The Folin-Ciocalteu method was used to measure the total phenolic content, and free radical scavenging capacity was measured using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) method. Dimensions of biscuit (diameter and thickness) were measured using calipers, biscuit texture firmness was measured using a Brookfield texture analyzer (Brookfield, CT3, USA), and biscuit color (a^* (red-green), b^* (yellow-blue), and L^* (lightness or whiteness) indices were measured using a colorimeter (TES-135A, Taiwan). Evaluation of sensory characteristics including color, taste, crispness and firmness of



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.2026.96693.1523>

texture, and overall acceptance was performed using the five-point hedonic scale method. Data were analyzed by one-way ANOVA (SPSS 26, Duncan, $P < 0.05$).

Results and Discussion

The results of statistical analysis showed that partial replacement of wheat flour in the biscuit formula with roasted lentil flour and rice bran powder increased the contents of fiber (to 1.39%), protein (to 8.62%), ash (to 1.97%), total phenols (to 131.27 mg GAE/kg), diameter (to 4.4 cm), expansion coefficient (to 8.23), yellowness (to 26.79), redness (to 6.92) and browning index (to 58.07) of the biscuit. Following the increase in the level of total phenols, the antioxidant activity (to 31.9%) of the biscuit also increased. Although using roasted lentil flour decreased fat content of the biscuit but rice bran powder retrieve it (to 23.65%). By reducing the amount of wheat flour and increasing the amount of roasted lentil flour and rice bran powder, the pH (to 6.62), moisture (to 2.95%), thickness (to 0.54 cm), texture firmness (to 1686 gf), and lightness (to 66.13) of the biscuit reduced. The scores of sensory attributes decreased with increasing the level of replacement of wheat flour with studied additives. However, the results indicated the overall acceptability of biscuits containing low levels (3-9%) of roasted lentil flour and rice bran powder.

Conclusion

Given that roasted lentil flour and rice bran powder are rich in fiber and contain appropriate amounts of vitamins and minerals, and considering the growing consumer demand for such nutrients, replacing these items with wheat flour (at 3-9%) in production of high-consumption products such as biscuits will contribute significantly to health-related issues, especially in terms of obtaining the recommended amounts of fiber.

Keywords: Antioxidant activity, Cereal bran, Functional properties, Lentil flour, Wheat flour

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۷۳-۱۵۷

ارزیابی خواص تغذیه‌ای و فیزیکوشیمیایی بیسکویت غنی‌شده با آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج

اعظم ایوبی^۱ - محمد بلوردی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از منابع فیبری در تولید فرآورده‌های غذایی عملکردی مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم تولید و مصرف گسترده فرآورده‌های غلات، محتوای فیبر بیشتر آنها پایین است. در پژوهش حاضر آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج به‌عنوان منابع طبیعی فیبر خوراکی در تولید بیسکویت به کار رفت. بدین‌منظور با جایگزین کردن بخشی از آرد گندم با آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج در سطوح ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد، نمونه‌های بیسکویت تولید شد و خواص فیزیکوشیمیایی (pH، رطوبت، فیبر، پروتئین، چربی، خاکستر، فنل کل، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، قطر، ضخامت، ضریب پخش، سفتی و رنگ) و حسی (رنگ، عطر و طعم، بافت و پذیرش کلی) آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آنالیز آماری نشان داد این جایگزینی سبب افزایش محتوای فیبر (تا ۱/۳۹ درصد)، پروتئین (تا ۸/۶۲ درصد)، خاکستر (تا ۱/۹۷ درصد)، فنل کل (تا ۱۳۱/۲۷ میلی‌گرم اسید گالیک در کیلوگرم)، قطر (تا ۴/۴ سانتی‌متر)، ضریب پخش (تا ۸/۲۳)، زردی (تا ۲۶/۷۹)، قرمزی (تا ۶/۹۲)، شاخص قهوه‌ای شدن (تا ۵۸/۰۷) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (تا ۳۱/۹ درصد) و کاهش pH (تا ۶/۶۲)، رطوبت (تا ۲/۹۵ درصد)، ضخامت (تا ۰/۵۴ سانتی‌متر)، سفتی بافت (تا ۱۶۸۹ gf) و روشنی (تا ۶۶/۱۳) بیسکویت شد. اگرچه آرد عدس برشته‌شده چربی را کاهش داد، اما سبوس برنج سبب افزایش چربی شد. نتایج ارزیابی حسی نیز بر مقبولیت مصرف بیسکویت‌های حاوی سطوح پایین (۳ تا ۹ درصد) آرد عدس برشته‌شده و سبوس برنج دلالت داشت. با توجه به این که آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج غنی از فیبر و حاوی مقادیر مناسبی از ویتامین‌ها و مواد معدنی هستند و با در نظر گرفتن تقاضای رو به رشد مصرف‌کننده، گنجاندن آنها در ترکیب محصولات پرمصرف نظیر بیسکویت به تحقق موضوعات مرتبط به سلامتی به‌ویژه در جهت دریافت مقادیر توصیه شده فیبر کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آرد گندم، آرد عدس، خواص عملکردی، سبوس غلات، فعالیت ضداکسایشی

مقدمه

در سال‌های اخیر مصرف فیبر به‌عنوان یکی از اجزای اصلی غذاهای عملکردی مورد توجه قرار گرفته است. فیبرهای رژیمی، پلی ساکاریدهای غیر نشاسته‌ای محلول یا نامحلولی هستند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر هورمون‌های پانکراتیک، قند هپاتیک و متابولیسم چربی‌ها تأثیر می‌گذارند (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019). فیبرهای غذایی توسط آنزیم‌های ترشح شده توسط دستگاه گوارش انسان هیدرولیز نمی‌شوند، اما ممکن است توسط

میکروفلور روده تخمیر شوند. فیبرهای محلول نظیر صمغ و لیگنین در روده بزرگ تخمیر می‌شوند، اما در بین فیبرهای غیرمحلول فقط برخی همی‌سلولزهای موجود در سبزی‌ها توسط فلور میکروبی قابل تخمیر هستند. میوه‌ها، سبزیجات، حبوبات، دانه‌های اسفرزه و سبوس جوی دوسر منابع خوب فیبرهای محلول می‌باشند، در حالی که غلات کامل منابع خوبی از فیبر نامحلول هستند (Sharif, Butt, Anjum, & Khan, 2014). طبق نتایج تحقیقات مصرف فیبرهای رژیمی در بهبود عملکرد دستگاه گوارش و سیستم ایمنی بدن و همچنین کاهش سطح

۱- بخش علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: mayoubi92@uk.ac.ir)

استفاده شد. تأثیر افزودن سبوس جوی دوسر به فرمول خمیر بیسکویت بر خواص رئولوژیکی خمیر و خواص فیزیکوشیمیایی و حسی بیسکویت در نتایج تحقیق مجذوبی و همکاران (Majzoobi, Koshani, & Farahnaky, 2013) گزارش شده است. انواع سبوس برنج نیز به عنوان جایگزین بخشی از آرد گندم در تولید نان مورد استفاده قرار گرفته است (Phimolsiripol, Mukprasirt, & Schoenlechner, 2012; Irakli, Katsantonis, & Kleisaris, 2015; Dewi & Tjahjono, 2022). در پژوهش فتح‌الهی آقای و قره‌خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) سبوس گندم به عنوان فیبر رژیمی در تولید بیسکویت بر پایه آرد برنج مورد استفاده قرار گرفت.

حبوبات، منابعی سرشار از فیبر رژیمی، پروتئین، پلی‌فنل‌ها و انواع ریزمغذی‌ها به‌ویژه ویتامین‌های گروه ب و نیز عناصر معدنی می‌باشند. با توجه به محتوای بالای اسید آمینه لیزین در حبوبات و اسیدهای آمینه گوگردار نظیر متیونین در غلات، استفاده هم‌زمان این محصولات در تولید فرآورده غذایی به تکمیل کیفیت پروتئین دریافتی کمک می‌کند (Salem, Alehosseini, & Jafari, 2021). از طرفی بهره‌برداری از اجزای ترکیبی حبوبات به‌ویژه حبوبات آسیب‌دیده با عواملی نظیر سرمازدگی به عنوان یک مکمل غذایی در تولید فرآورده‌های غذایی مبتنی بر گندم می‌تواند به افزایش بازده تولید کشاورزان و کاهش هزینه‌های تولید کمک کند (Portman et al., 2019; Gharekhani & Mostafazadeh, 2021). در مطالعات محققین مختلف از آرد انواع حبوبات مانند نخود (Rostamian, Milani, & Maleki, 2012; Mohammad, Ahmad, & Senge, 2012; Ouazib, Dura, Ziadi, & Rosell, 2016; Alaei, Movahhed, & Ahmadi Nateghi, 2018; Hesarinejad, 2018; Chenarbon, 2018)، لوبیا (Siyar, & Rezaiyan Attar, 2019; El-Gohery, 2021 Sahraiyani, Mazaheri Tehrani, Naghipour, Ghiafeh Davoodi, & Soleimani, 2013; Milani, Sedighi, & Mirzaei, 2018; Shahsavan Tabrizi, Ataye Salehi, & Turfani, Narducci, 2020) و عدس (Sheikholesalami, 2020) و عدس (Durazzo, Galli, & Carcea, 2017) جهت بهبود کیفیت تغذیه‌ای فرآورده‌های نانوائی استفاده شده است. مشخص شده است با افزودن آرد حبوبات (نخود، ماش و عدس) به آرد گندم مورد استفاده در تولید نان مسطح (چاپاتی)، ظرفیت جذب آب آرد افزایش و ظرفیت جذب روغن آن کاهش یافته و ضمن حفظ طعم مطلوب در نان کیفیت تغذیه‌ای (به‌ویژه از نظر سطح اسید آمینه لیزین، فیبر خام و مواد معدنی) بهبود یافته است (Parveen, Pasha, Abrar, Khan, & Jamil, 2024). نتایج تحقیق پورتمن و همکاران (Portman et al., 2019) بر امکان افزایش ارزش غذایی و خواص عملکردی کوکی با استفاده از آرد عدس دلالت داشت. مطالعه پتانسیل پنج نوع عدس با رنگ‌های مختلف در تولید کوکی‌های بدون گلوتن بر پایه آرد برنج نشان داد

کلسترول مضر، ایجاد احساس سیری و در نتیجه کنترل وزن مؤثر هستند (Lebesi & Tzia, 2011). طبق توصیه سازمان‌های بهداشتی مقدار مصرف فیبر غذایی روزانه بین ۲۵ تا ۳۸ گرم می‌باشد. این در حالی است که میزان مصرف فیبر در اغلب افراد کمتر از میزان توصیه شده می‌باشد (Martínez-Cervera, Salvador, Muguerza, Moulay, & Fiszman, 2011). افزودن منابع فیبر خوراکی به فرآورده‌های غذایی پرمصرف راهکار هوشمندانه‌ای جهت افزایش سطح فیبر دریافتی از طریق رژیم غذایی روزانه است. بیسکویت یکی از محبوب‌ترین فرآورده‌های پخت به شمار می‌رود. با توجه به قیمت پایین، سهولت تهیه، ماندگاری بالا، تنوع فرمولاسیون و طعم مطلوب، بسیاری از بزرگسالان و کودکان انواع مختلف این فرآورده را مصرف می‌کنند و لذا صنعت تولید بیسکویت در اکثر کشورها در حال توسعه روزافزون است (Azami & Roufegari-Nejad, 2019). کمیت و کیفیت ترکیبات مورد استفاده در تولید بیسکویت از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آن است. نظر به اینکه بیسکویت غالباً از آرد، شکر و شورتینگ یا کره تهیه می‌شود محتوای کربوهیدرات با درجه هضم بالا و چربی آن زیاد بوده و محتوای فیبر، پروتئین، ترکیبات معدنی و ویتامین‌های آن کم است. لذا تولید بیسکوئیت با محتوای فیبر، پروتئین و ریزمغذی‌های بالا خصوصاً در جوامع محروم، چالشی سودمند در جهت ارتقای سطح سلامت به شمار می‌رود (Aminpour Daphchahi, Zakipour Rahimabadi, Rostamzad, & Nejat Pirsaraii, 2021).

با توجه به اینکه از لحاظ کمیت آرد گندم فراوان‌ترین ترکیب فرمول بیسکویت است، لذا کیفیت آن نقش اصلی را در کیفیت فرآورده نهایی به‌ویژه از نظر ارزش غذایی، ساختار و بافت ایفا می‌کند. منابع فیبری غلات، حبوبات و دیگر محصولات گیاهی نظیر آجیل‌ها، میوه‌ها و سبزیجات می‌توانند به عنوان جایگزین بخشی از آرد گندم مصرفی، با هدف بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای در تولید فرآورده‌های مبتنی بر آرد گندم مورد استفاده قرار گیرند. در سال‌های اخیر توجه بسیاری از تولیدکنندگان و محققین به سمت بهره‌گیری از انواع سبوس غلات به عنوان منابع سرشار فیبر در تولید فرآورده‌های پخت معطوف شده است. نتایج مطالعه لبسی و تزیا (Lebesi & Tzia, 2011) بر تأثیر استفاده از سبوس جو، ذرت و برنج بر پارامترهای کیفی کیک شامل افزایش ویسکوزیته خمیر و تخلخل و حجم ویژه کیک دلالت داشت. نتایج پژوهش ریز-پرز و همکاران (Reyes-Pérez, Salazar-García, Romero-Baranzini, Islas-Rubio, & Wong, 2013) نشان داد افزودن سبوس گندم اکستروده شده به فرمول کوکی سبب افزایش محتوای فیبر رژیمی و کاهش شاخص گلیسمی شد. در مطالعه سودها و همکاران (Sudha, Vetrimani, & Leelavathi, 2007) از سبوس گندم، برنج، جو و جوی دو سر به عنوان منابع فیبر در تولید بیسکویت

فنی و خواص عملکردی نظیر ظرفیت تورم، جذب رطوبت، جذب روغن، قابلیت تشکیل ژل و کف و پایدار نمودن امولسیون آنها را نیز به دنبال دارد (Ozolina, Sarenkova, & Muizniece-Brasava, 2024). حرارت برشته کردن سبب دنا توره شدن پروتئین‌ها و آزاد شدن اسیدهای آمینه قطبی و قرار گرفتن آنها در معرض روغن و آب می‌شود (Hatamian, Noshad, Abdanan-Mehdizadeh, & Barzegar, 2020). به علاوه حرارت بالای برشته کردن، سبب تشدید واکنش‌های میلارد و تشکیل محصولاتی نظیر ملانوئیدین‌ها شده و لذا رنگ حبوبات برشته شده، تیره‌تر می‌گردد (Zhang et al., 2023).

با توجه به اهمیت و مزایای فیبرهای خوراکی در فرآورده‌های نانوائی، در پژوهش حاضر اثرات استفاده از سطوح مختلف آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج (۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد) به عنوان منابع طبیعی فیبر خوراکی، بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و حسی بیسکویت مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد

آرد گندم (آرد نول) مورد استفاده در تهیه بیسکویت از کارخانه آرد دانه‌سایان کرمان و آرد عدس برشته شده (سویق عدس) و پودر سبوس برنج از شرکت صنایع غذایی ۱۱۱ مازندران تهیه شد. با استفاده از روش‌های استاندارد، ویژگی‌های شیمیایی آرد گندم، آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج، شامل فیبر ((AACC ۱۰-۳۲(۲۰۰۰)، رطوبت ((AACC 44-19(۱۹۹۹)، چربی ((AACC ۲۵-۳۰(۲۰۰۰)، پروتئین ((AACC 46-18(۱۹۹۹) و خاکستر ((AACC 08-01(۲۰۰۰) تعیین گردید. سایر مواد مورد استفاده در تهیه بیسکویت شامل روغن صاف قنادی (دیاموند)، نمک طعام (کمند)، شکر، وانیل (گل‌ها) و بکینگ پودر (مهسا) از فروشگاه‌های سطح شهر کرمان خریداری شد. معرف DPPH مورد استفاده جهت اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی از شرکت سیگما-آلد ریج آمریکا و سایر مواد شیمیایی از شرکت مرک آلمان تهیه گردید.

تهیه بیسکویت

برای تهیه بیسکویت ابتدا تمام مواد اولیه شامل ۳۵۰ گرم آرد، ۱۰۵ گرم شکر، ۱۰۵ گرم روغن صاف قنادی، یک عدد تخم مرغ، ۳/۵ گرم وانیل، ۱/۷۵ گرم نمک و ۱۰/۵ گرم بکینگ پودر برای هر خمیر توزین شد. در مرحله اول روغن و شکر به خوبی با دور متوسط هم‌زن Eurolux (مدل EU-HM3816DSB ساخت انگلستان) به مدت پنج دقیقه مخلوط شدند تا بافتی سبک و کرمی شکل ایجاد شود. سپس

کوکی‌های حاوی عدس، محتوای پروتئین خام، فنل کل، ظرفیت آنتی اکسیدانی و قابلیت پذیرش مصرف بالاتری داشتند (Hajas et al., 2022).

سبوس برنج فرآورده جانبی فرآوری و آسیاب برنج بوده و به عنوان یک منبع ارزان قیمت غنی از فیبر در تغذیه انسان مورد توجه قرار گرفته است. سبوس برنج شامل لایه بیرونی قهوه‌ای دانه برنج می‌باشد که عمدتاً از پریکارپ، آلرون، لایه زیر آلرون و جوانه تشکیل شده است. سبوس برنج علاوه بر مقادیر بالای فیبر (۲۵ تا ۴۰ درصد)، حاوی مقادیر قابل توجهی کربوهیدرات (۵۱ تا ۵۵ درصد)، پروتئین (۱۱ تا ۱۷ درصد) و چربی (۱۵ تا ۲۲ درصد) بوده و منبعی سرشار از ویتامین‌های گروه ب، ای و مواد معدنی نظیر کلسیم، منیزیم، پتاسیم، آهن و فسفر است. از آنجا که وجود روغن در فرمول بیسکویت از افزایش بیش از حد ویسکوزیته خمیر و تشکیل کامل شبکه گلوئی جلودگی نموده و میزان تورم و ژلاتینه شدن نشاسته را کاهش می‌دهد سبب تردی، نرمی و قابلیت جویدن بهتر بیسکویت می‌شود (Payan, 2001). لذا انتظار می‌رود وجود مقادیر قابل توجه چربی در سبوس برنج به بهبود بافت بیسکویت کمک کند. وجود آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند توکوفرول‌ها، توکوترینول‌ها و ۷-اوریزانول، چشم‌انداز استفاده از سبوس برنج را برای انسان به عنوان یک ماده عملکردی برای کاهش اختلالات تهدیدکننده سلامتی روشن می‌کند (Esmaeili, Rafe, Shahidi, & Ghorbani Hasan Saraei, 2016).

عدس با نام علمی *لنس کولیناریس*^۱ یکی از مهم‌ترین حبوبات با ارزش تغذیه‌ای بالا و عوامل ضدتغذیه‌ای پایین است که به طور سنتی به عنوان محصولی با حداقل فرآوری مصرف می‌شود. خصوصیات عملکردی پروتئین‌های عدس از قبیل نگهداری آب، اتصال به چربی و ایجاد ژل از دلایل پتانسیل ویژه آن برای استفاده در تولید انواع مختلف فرآورده‌های غذایی است. با توجه به حضور اسیدهای آمینه ضروری مختلف نظیر لوسین، ایزولوسین، لیزین، فنیل آلانین و والین و همچنین مقادیر بالای فیبر، ویتامین‌های گروه ب و مواد معدنی افزودن آرد عدس حتی آرد تهیه شده از عدس درجه پایین به تکمیل آرد گندم و افزایش کیفیت خوراکی فرآورده‌های پخت کمک می‌کند (Portman et al., 2019; Gharekhani & Mostafazadeh, 2021). حضور عوامل ضد تغذیه‌ای نظیر اسید فیتیک، تانن‌ها و مهارکننده‌های تریپسین در حبوبات فراهمی زیستی پروتئین‌ها و عناصر کمیاب را کاهش می‌دهد. روش‌های معمول فرآوری نظیر خیساندن، پوست‌کندن، پختن و برشته کردن سبب غیرفعال کردن یا حذف این عوامل شده و به بهبود کیفیت تغذیه‌ای و استفاده مؤثر از آنها کمک می‌کند (El-Gohery, 2021). برشته کردن به عنوان یک روش مهم فرآوری حبوبات تغییر ترکیبات

پلی اتیلنی زیپ بگ در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند (El-Gohery, 2021). برای تهیه خمیر تیمارهای حاوی آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج، ابتدا آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج با الک مش ۴۰ الک شدند و سپس در سطوح ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد جایگزین آرد مصرفی در تهیه خمیر بیسکویت شدند. درصد آردهای به کار رفته در تولید نمونه‌های مختلف بیسکویت در جدول ۱ نشان داده شده است.

تخم مرغ و وانیل اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه فرآیند اختلاط ادامه یافت. پس از آن آرد همراه با نمک طعام و بکینگ پودر به تدریج به سایر مواد خمیر اضافه و به خوبی مخلوط شد. در مرحله بعدی خمیر بیسکویت به کمک قالب استیل به قطعات دایره‌ای شکل با ضخامت ۳/۵ میلی‌متر و قطر ۳۵ میلی‌متر برش داده شد. پخت بیسکویت در فر آلتون مدل MX5W با دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه انجام گرفت. نمونه‌های بیسکویت پس از پخت به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق خنک شدند و سپس تا زمان آزمون‌های بعدی در کیسه‌های

جدول ۱- سطوح آرد گندم، آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج در فرمولاسیون نمونه‌های مختلف بیسکویت
Table 1- Wheat flour, roasted lentil flour, and rice bran powder levels in the formulations of different biscuit samples

تیمار	آرد گندم	آرد عدس برشته شده	پودر سبوس برنج
Treatment	Wheat flour (%)	Roasted lentil flour (%)	Rice bran powder (%)
Control	100	0	0
RLF3	97	3	0
RLF6	94	6	0
RLF9	91	9	0
RLF12	88	12	0
RLF15	85	15	0
RBP3	97	0	3
RBP6	94	0	6
RBP9	91	0	9
RBP12	88	0	12
RBP15	85	0	15

با استفاده از روش ۲،۲-دی-فیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) اندازه‌گیری شد و در نهایت فعالیت آنتی‌اکسیدانی بر حسب درصد مهارکنندگی از رابطه ۱ به‌دست آمد (Hajimohammadi Farimani, 2021):

$$(1) \quad 100 \times ((\text{جذب شاهد} / \text{جذب نمونه}) - 1) = \text{فعالیت آنتی‌اکسیدانی (درصد)}$$

ابعاد بیسکویت (قطر و ضخامت) با استفاده از کولیس پس از نمونه‌برداری تصادفی و قرار دادن ۱۰ نمونه روی هم و محاسبه میانگین‌ها تعیین شد (Savitha, Indrani, & Prakash, 2008). ضریب پخش بیسکویت از نسبت قطر به ضخامت به‌دست آمد (Krishnan, Dharmaraj, Manohar, & Malleshi, 2011).

سفتی بافت بیسکویت با استفاده از دستگاه بافت‌سنج بروکفیلد (Brookfield, CT3, USA) با آزمون خمش به‌وسیله پروب تیغه‌ای شکل مدل TA7 با سرعت حرکت ۱۰ میلی‌متر در ثانیه تا لحظه شکست نمونه و ثبت نیرو در زمان شکست به‌عنوان سفتی اندازه‌گیری گردید (Tavakoli, Ayoubi, & Khorasany, 2025). تعیین رنگ بیسکویت (شاخص‌های a^* (قرمز-سبزی)، b^* (زردی-آبی) و L^* (روشنی یا سفیدی) توسط دستگاه رنگ‌سنج (TES-135A, Taiwan) صورت گرفت.

آزمون‌های بیسکویت

رطوبت بیسکویت با استفاده از روش AACC 44-19 (۱۹۹۹) توسط آون UF75 Memmert ساخت آلمان و pH محلول آبی ۱۰ درصد بیسکویت با استفاده از دستگاه pH متر دیجیتالی (Jenway, UK) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری خاکستر نمونه‌ها طبق روش استاندارد AACC 08-01 (۲۰۰۰) و به کمک کوره الکتریکی مارک اکسیشن، مدل آتش ۱۲۰۰، ساخت ایران، اندازه‌گیری پروتئین طبق روش استاندارد AACC 46-18 (۱۹۹۹) و با استفاده از دستگاه میکروکلدال مارک آرتور و توماس، مدل ۱۹۱۰۵، ساخت آمریکا، اندازه‌گیری چربی از روش سوکسله طبق روش استاندارد AACC 25-30 (۲۰۰۰) و اندازه‌گیری فیبر خام پس از انجام مراحل هضم اسیدی و قلیایی طبق روش استاندارد AACC 10-32 (۲۰۰۰) صورت گرفت. برای اندازه‌گیری محتوای فنل کل موجود در نمونه‌ها از روش فولین سیوکالتیو استفاده شد و میزان جذب توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UNICO, 2802, China) در طول موج ۷۵۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. میزان ترکیبات فنلی موجود در نمونه‌ها، با استفاده از معادله به دست آمده از منحنی استاندارد (استفاده از اسید گالیک به‌عنوان استاندارد)، محاسبه شد (Ayoubi, Balvardi, Hajimohammadi, Farimani, & Akhavan, 2023). ظرفیت مهارکنندگی رادیکال آزاد

ارزیابی حسی

ارزیابی ویژگی‌های حسی تیمارهای مختلف، شامل رنگ ظاهری، طعم و مزه، تردی و سفتی بافت و پذیرش کلی یک روز پس از پخت توسط ۲۰ نفر ارزیاب آموزش دیده به روش هدونیک پنج نقطه‌ای (امتیاز ۱ برای خیلی بد و امتیاز ۵ برای خیلی خوب) صورت پذیرفت. شاخص پذیرش (AI) نیز بر اساس رابطه ۲ محاسبه شد، که در آن X میانگین نمرات به‌دست آمده برای پذیرش کلی است (Lucas, de Morais, Santos, & Costa, 2018)

$$AI (\%) = \frac{X}{5} \times 100 \quad (2)$$

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی یک طرفه با روش تجزیه واریانس (ANOVA)، با استفاده از نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. تمامی آزمایشات در ۳ تکرار صورت گرفت. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۵ درصد و برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel2016 استفاده گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی آرد گندم، آرد عدس برشته‌شده و

سیوس برنج

نتایج آنالیز ترکیبات شیمیایی آرد گندم، آرد عدس برشته‌شده و پودر سیوس برنج در **جدول ۲** نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین محتوای خاکستر، فیبر، چربی، فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی مربوط به سیوس برنج بوده و کمترین مقادیر خاکستر، پروتئین، فیبر، فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در آرد گندم به‌دست آمده است. آرد عدس برشته‌شده نیز حاوی بیشترین محتوای پروتئین و کمترین مقدار چربی بود. پروین و همکاران (Parveen et al., 2024) نتایج مشابهی را در مقایسه ترکیب شیمیایی آرد عدس و آرد گندم گزارش نمودند.

ویژگی‌های شیمیایی بیسکویت

همان‌طور که در **جدول ۳** مشاهده می‌شود، جایگزین کردن آرد گندم با آرد عدس برشته‌شده و پودر سیوس برنج به‌طور معنی‌داری بر pH، رطوبت، فیبر، پروتئین، چربی و خاکستر بیسکویت تأثیر گذاشته است.

نتایج تأثیر جایگزینی آرد گندم با آرد عدس برشته‌شده و پودر سیوس برنج بر pH بیسکویت در **جدول ۳** ملاحظه می‌شود. طبق این نتایج جایگزین کردن آرد گندم با آرد عدس برشته‌شده و پودر سیوس برنج باعث کاهش pH بیسکویت شد. با افزایش سطح آرد عدس برشته‌شده و پودر سیوس برنج از pH فرآورده کاسته شد.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی آرد گندم، آرد عدس برشته‌شده و پودر سیوس برنج

Table 2- The chemical composition of wheat flour, roasted lentil flour, and rice bran powder

ترکیب شیمیایی Chemical composition	آرد گندم Wheat flour	آرد عدس برشته‌شده Roasted lentil flour	پودر سیوس برنج Rice bran powder
خاکستر Ash (%)	0.50±0.03 ^c	2.93±0.11 ^b	10.21±0.54 ^a
پروتئین Protein (%)	11.41±1.02 ^c	24.56±2.01 ^a	15.68±1.01 ^b
فیبر Fiber (%)	1.68±0.05 ^c	5.39±0.41 ^b	14.00±0.98 ^a
چربی Fat (%)	8.59±0.43 ^b	6.66±0.16 ^c	22.77±1.20 ^a
فنل Phenol (mgGAE.kg ⁻¹)	36.29±2.11 ^c	112.28±5.13 ^b	146.87±6.05 ^a
آنتی‌اکسیدان Antioxidant (%)	39.10±1.10 ^c	42.20±0.80 ^b	49.80±1.40 ^a

در هر ردیف حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (آزمون دانکن، $P \leq 0.05$).

In each row, different letters indicate significant differences (Duncan's test, $P \leq 0.05$).

جدول ۳- اثر آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر ویژگی‌های شیمیایی بیسکویت

Table 3- Effect of roasted lentil flour and rice bran powder on the chemical properties of biscuits

تیمار Treatment	pH	رطوبت Moisture (%)	فیبر Fiber (%)	پروتئین Protein (%)	چربی Fat (%)	خاکستر Ash (%)
Control	7.09±0.15 ^a	4.65±0.10 ^a	0.23±0.02 ^g	7.12±0.50 ^d	20.78±1.12 ^{bc}	0.68±0.05 ^f
RLF3	6.85±0.11 ^b	3.94±0.12 ^b	0.28±0.03 ^g	7.63±0.37 ^{bcd}	20.30±1.37 ^c	0.77±0.06 ^{ef}
RLF6	6.82±0.10 ^{bc}	3.66±0.08 ^c	0.57±0.02 ^e	8.13±0.21 ^{abc}	20.14±1.15 ^c	0.88±0.06 ^e
RLF9	6.78±0.05 ^{bcd}	3.62±0.13 ^c	0.68±0.06 ^d	8.24±0.44 ^{abc}	20.09±1.11 ^c	0.89±0.09 ^e
RLF12	6.75±0.07 ^{bcd}	2.98±0.03 ^d	0.78±0.05 ^c	8.34±0.56 ^{ab}	20.05±1.51 ^c	1.08±0.04 ^d
RLF15	6.73±0.09 ^{bcd}	2.97±0.05 ^d	0.94±0.07 ^b	8.62±0.63 ^a	19.89±1.72 ^c	1.16±0.08 ^d
RBP3	6.86±0.12 ^b	3.93±0.07 ^b	0.47±0.01 ^f	7.52±0.25 ^{cd}	22.11±2.03 ^{abc}	1.21±0.10 ^d
RBP6	6.74±0.04 ^{bcd}	3.60±0.10 ^c	0.49±0.01 ^{ef}	7.55±0.34 ^{cd}	23.17±1.40 ^{ab}	1.43±0.09 ^c
RBP9	6.69±0.06 ^{bcd}	3.00±0.02 ^d	0.79±0.05 ^c	7.66±0.14 ^{bcd}	23.01±1.21 ^{ab}	1.66±0.12 ^b
RBP12	6.64±0.13 ^{cd}	2.99±0.01 ^d	1.36±0.08 ^a	7.70±0.43 ^{bcd}	23.23±1.17 ^{ab}	1.74±0.10 ^b
RBP15	6.62±0.05 ^d	2.95±0.04 ^d	1.39±0.10 ^a	7.80±0.36 ^{bcd}	23.65±1.50 ^a	1.97±0.07 ^a

در هر ستون حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (آزمون دانکن، $P \leq 0.05$).In each column, different letters indicate significant differences (Duncan's test, $P \leq 0.05$).

است. این محققین بالا بودن مقدار سیستین و توانایی اسیدهای آمینه قطبی برای ایجاد اتصالات جانبی را علت بالاتر بودن محتوای رطوبت کیک حاوی ۱۰۰ درصد آرد گندم نسبت به کیک دارای مقادیر مختلف آرد لوبیاجیتی عنوان کردند. این در حالی است که ال گوهری (El-Gohery, 2021) افزایش محتوای رطوبت بیسکویت با جایگزین کردن آرد گندم با آرد لوبیای خام و فرآوری شده را به علت اختلاف در ترکیب و ظرفیت نگهداری آب نمونه‌ها گزارش نمود.

با جایگزین کردن آرد گندم با آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج محتوای فیبر بیسکویت بین ۱/۲۲ تا ۴/۹۱ برابر افزایش یافت. تأثیر استفاده از سبوس برنج بر افزایش محتوای فیبر بیسکویت بیشتر بود؛ به طوری که بیشترین محتوای فیبر در بیسکویت‌های حاوی ۱۲ و ۱۵ درصد سبوس برنج مشاهده شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است محتوای فیبر پودر سبوس برنج بیشتر از آرد عدس برشته شده بود و لذا این نتیجه دور از انتظار نمی‌باشد. افزایش محتوای فیبر کیک با افزودن آرد نخود (Alaei et al., 2017)، سبوس جوی دوسر (Jamehdor, Movahhed, & Ghiassi Tarazi, 2019) و سبوس گندم (Milani, Hashemi, Golimovahed, & Davari, 2021) در مطالعات سایر محققین گزارش شده است. نتایج مطالعه پورتمن و همکاران (Portman et al., 2019) نیز بر افزایش محتوای فیبر کل کوکی به دلیل جایگزین کردن آرد گندم با آرد عدس دلالت داشت. این محققین بیان کردند افزایش فیبر ناشی از افزودن آرد عدس به فرمول کوکی عمدتاً به دلیل افزودن مواد پوسته دانه عدس است که حاوی سلولز، همی سلولز و فیبرهای لیگنین است. نتایج مشابهی در اثر جایگزینی بخشی از آرد گندم مورد استفاده در تولید بیسکویت با آرد اکارا توسط زمانی و عباسی (Zamani & Abbasi, 2017) گزارش شده است. طبق نتایج مطالعه فتح‌الهی آقایی و قره‌خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) نیز در اثر افزودن پوسته گندم به

در بین نمونه‌های مورد مطالعه شاهد بیشترین (۷/۰۹) و بیسکویت حاوی ۱۵ درصد سبوس برنج کمترین (۶/۶۲) مقدار pH را داشت. لازم به ذکر است از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین مقدار pH نمونه بیسکویت حاوی ۱۵ درصد سبوس برنج و سطوح ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد آرد عدس برشته شده و ۶، ۹ و ۱۲ درصد سبوس برنج مشاهده نشد. کاهش pH کوکی بدون گلوتن در اثر افزودن آرد عدس به فرمولاسیون آن در نتایج پژوهش هاجاز و همکاران (Hajas et al., 2022) نیز گزارش شده است.

استفاده از آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج در تولید بیسکویت سبب کاهش رطوبت بیسکویت شد. با افزایش سطح جایگزینی، مقدار کاهش رطوبت نمونه‌های بیسکویت نسبت به شاهد بیشتر شد، به گونه‌ای که بیسکویت‌های حاوی ۱۵ درصد آرد عدس برشته شده و نیز نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر سبوس برنج کمترین مقدار رطوبت را داشتند؛ اگرچه از نظر آماری اختلاف محتوای رطوبت این نمونه‌ها با سطوح ۱۲ درصد آرد عدس برشته شده و ۹ و ۱۲ درصد سبوس برنج معنی‌دار نبود. به نظر می‌رسد کاهش سطح گلوتن سبب کم شدن نواحی آب‌دوست جهت اتصال با آب در بیسکویت‌های حاوی آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج شده و لذا رطوبت این نمونه‌ها کمتر شده است (Portman et al., 2019). نتایج مطالعه فتح‌الهی آقایی و قره‌خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) نیز بر کاهش رطوبت بیسکویت بر پایه آرد برنج در اثر افزودن پوسته گندم به عنوان منبع فیبر رژیمی دلالت داشت. روند کاهشی محتوای رطوبت مغز نان با افزایش مقدار سبوس از صفر تا ۹ درصد در پژوهش طایفه و همکاران (Tayefe, Shahidi, Mohammadzadeh Milani, & Sadeghi, 2021) نیز مشاهده شده است. کاهش معنی‌دار رطوبت کیک در اثر جایگزینی بخشی از آرد گندم با آرد لوبیاجیتی از نتایج پژوهش حصاری نژاد و همکاران (Hesarinejad et al., 2019) بوده

فرمول بیسکویت بر پایه آرد برنج مقدار فیبر فرآورده نهایی افزایش یافت.

افزودن آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج به فرمول خمیر بیسکویت سبب افزایش محتوای پروتئین فرآورده نهایی شد. با توجه به این که محتوای پروتئین آرد عدس برشته شده از آرد گندم و سبوس برنج بیشتر بود، بیسکویت‌های حاوی آرد عدس برشته شده پروتئین بیشتری داشتند. این نتایج با نتایج بررسی هاجاز و همکاران (Hajas *et al.*, 2022) که نشان‌دهنده افزایش محتوای پروتئین خام کوکی بدون گلوتن بر پایه آرد برنج با افزودن آرد عدس بود مطابقت دارد. نتایج مشابهی نیز در مطالعه زمانی و عباسی (Zamani & Abbasi, 2017) مبتنی بر افزایش مقدار پروتئین بیسکویت در اثر جایگزینی بخشی از آرد گندم با آرد اکارا به دست آمده است.

محتوای چربی بیسکویت تحت تأثیر مقادیر آرد گندم، آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج قرار گرفت. مقدار چربی بیسکویت شاهد ۲۰/۷۸ درصد بود؛ اگرچه استفاده از آرد عدس برشته شده محتوای چربی را کاهش داد، اما افزودن پودر سبوس برنج سبب افزایش ۶/۴ تا ۱۳/۸۱ درصدی محتوای چربی بیسکویت شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است محتوای چربی آرد عدس برشته شده کمتر از آرد گندم و پودر سبوس برنج بود و لذا نمونه‌های بیسکویت دارای آرد عدس برشته حاوی مقدار چربی کمتری بودند.

طبق نتایج مربوط به محتوای خاکستر بیسکویت در جدول ۳، جایگزینی آرد گندم بر مقدار خاکستر بیسکویت تأثیر داشت. با کاهش مقدار آرد گندم و افزایش مقدار مکمل‌های فیبر خوراکی مورد استفاده در این مطالعه (آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج)، بر میزان خاکستر بیسکویت افزوده شد. با توجه به محتوای خاکستر بالای سبوس برنج (جدول ۲)، تأثیر این افزودنی بر افزایش مقدار خاکستر بیشتر بود؛ به‌طوری که بیسکویت حاوی ۱۵ درصد سبوس برنج بیشترین (۱/۹۷ درصد) مقدار خاکستر را داشت. این نتایج، با نتایج پژوهش زمانی و عباسی (Zamani & Abbasi, 2017) مطابقت دارد. با در نظر گرفتن این موضوع که آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج منابعی سرشار از ترکیبات معدنی به شمار می‌روند، افزایش محتوای خاکستر به موازات افزایش میزان جایگزینی قابل انتظار می‌باشد.

فنل کل

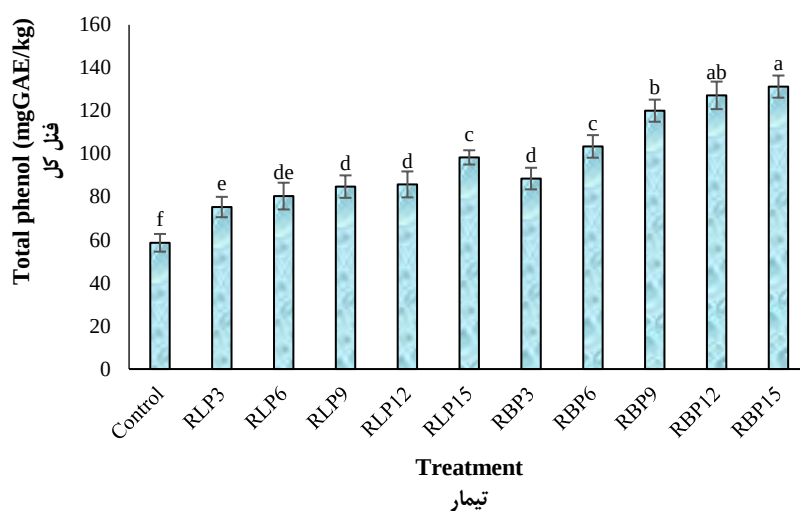
بر اساس نتایج ارزیابی آماری، جایگزین کردن آرد گندم با آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج میزان فنل کل بیسکویت را افزایش داد (شکل ۱). با توجه به این که محتوای فنل کل آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج از آرد گندم بیشتر بود، لذا بیسکویت‌های دارای آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج نیز مقدار فنل کل

بیشتری نسبت به شاهد داشتند. با افزایش سطح جایگزینی، محتوای فنل کل نمونه‌های بیسکویت افزایش یافت. تأثیر سبوس برنج در افزایش محتوای فنل کل بیسکویت بیشتر بود و لذا بالاترین مقدار فنل کل (۱۳۱/۲۷ میلی گرم اسید گالیک در کیلوگرم) مربوط به نمونه بیسکویت دارای ۱۵ درصد سبوس برنج بود. افزایش میزان ترکیبات فنلی کوکی بدون گلوتن با جایگزینی آرد برنج با آرد عدس در نتایج مطالعه هاجاز و همکاران (Hajas *et al.*, 2022) نیز گزارش شده است. نتایج مشابهی در پژوهش زمانی و عباسی (Zamani & Abbasi, 2017) به دست آمده است. طبق نتایج گزارش پورتمن و همکاران (Portman *et al.*, 2019) سه ترکیب فنلی کامپفرول تری‌هگزوز و کامپفرول گلیکوزید و همچنین فلاونوئید پروسیانیدین در کوکی‌های حاوی آرد عدس شناسایی شدند که در نمونه کوکی تولید شده با ۱۰ درصد آرد گندم موجود نبودند. مطالعات اپیدمیولوژیک، ارتباط بالای بین مصرف میوه‌ها و حبوبات حاوی مشتقات کامپفرول و کاهش خطر ابتلا به بیماری‌هایی از جمله سرطان ریه، معده و تخمدان و بیماری‌های قلبی عروقی را نشان داده‌اند (Cui *et al.*, 2008; Calderon-Montano, Burgos-Morón, Pérez-Guerrero, & López-ázaro, 2011).

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی

روغن به‌عنوان یکی از اجزای مهم فرمولاسیون بیسکویت، اغلب پس از آرد و شکر بیشترین مقدار مواد اولیه خمیر این فرآورده را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به زمان ماندگاری بالا و احتمال اکسیداسیون چربی طی دوره انبارداری، امکان ایجاد طعم و عطر تند و کاهش کیفیت در زمان مصرف پس از دوره نگهداری طولانی مدت وجود دارد. لذا افزایش سطح ترکیبات آنتی‌اکسیدان در فرآورده، در جلوگیری از وقوع واکنش‌های اکسیداسیون چربی و کاهش میزان این تغییرات نامطلوب مؤثر می‌باشد (Arabshahi Delouee, Mardani Ghahfarokhi, & Aalami, 2014).

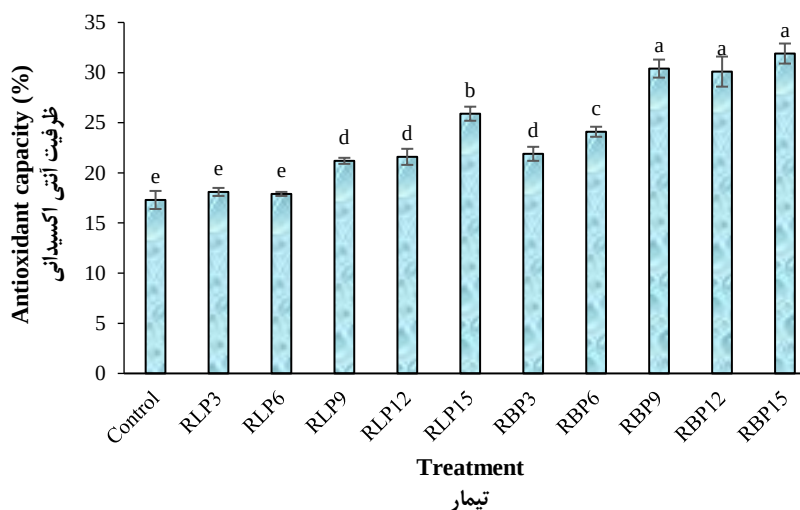
نتایج آنالیز واریانس حاکی از آن بود که تأثیر کاربرد آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج در تولید بیسکویت با افزایش معنی‌دار ظرفیت آنتی‌اکسیدانی فرآورده همراه است (شکل ۲). استفاده از سطوح مختلف آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج با افزایش ۳/۵ تا ۸۴/۴ درصدی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی همراه بود. طبق نتایج جدول ۲ ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آرد عدس برشته شده و سبوس برنج از آرد گندم بیشتر است و لذا این مسئله سبب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بیسکویت‌های حاوی این افزودنی‌ها شده است.



شکل ۱- اثر آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر فنل کل بیسکویت

حروف متفاوت نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار است ($p < 0.05$).

Fig. 1. The effect of roasted lentil flour and rice bran powder on total phenolic content of biscuits
Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$).



شکل ۲- اثر آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر ظرفیت آنتی اکسیدانی بیسکویت

حروف متفاوت نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار است ($p < 0.05$).

Fig. 2. The effect of roasted lentil flour and rice bran powder on antioxidant capacity of biscuits
Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$).

خصوصیات فیزیکی بیسکویت

نتایج مربوط به ارزیابی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های بیسکویت در جدول ۴ ارائه گردیده است. نتایج آنالیز واریانس قطر، ضخامت و ضریب پخش بیسکویت نشان داد تأثیر جایگزینی آرد گندم با آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر این ویژگی‌ها معنی دار بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آرد عدس برشته شده و پودر

نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه پورتمن و همکاران (Portman et al., 2019) که بر افزایش قابل توجه فعالیت آنتی اکسیدانی کوکی با افزایش سطح آرد عدس دلالت داشت، مطابقت دارد. به علاوه، طبق گزارش هاجاز و همکاران (Hajas et al., 2022) جایگزین کردن آرد برنج با آرد عدس در فرمولاسیون کوکی بدون گلوتن، سبب برتری سطح فعالیت آنتی اکسیدانی کوکی در مقایسه با نمونه شاهد شد.

با آرد عدس در کوکی بدون گلوتن مشابهت دارد. اثر تغییرات قطر و ضخامت بین بیسکویت‌های حاوی آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج و بیسکویت شاهد در ضریب پخش که نشان‌دهنده نسبت قطر به ارتفاع است، منعکس شده است. ضریب پخش به‌عنوان یک پارامتر مهم برای تعیین کیفیت آرد مصرف شده در تولید بیسکویت استفاده می‌شود. بیسکویت با مقدار بالاتر ضریب پخش مطلوب‌تر از بیسکویت‌هایی با مقدار پایین‌تر این پارامتر فیزیکی است.

سبوس برنج در فرمولاسیون بیسکویت از ضخامت فرآورده بین ۱۱/۱ تا ۴۰ درصد کاسته شد، مقدار قطر آن بین ۲/۱ تا ۱۳/۹ درصد افزایش یافت و ضریب پخش ۱/۱۵ تا ۱/۹۱ برابر بیشتر شد. روند تغییرات مشخصات هندسی بیسکویت در مطالعه فتح‌الهی آقایی و قره‌خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) بر تأثیر افزودن پوسته گندم به‌عنوان فیبر رژیمی در ترکیب بیسکویت بر پایه آرد برنج، مشابه نتایج پژوهش حاضر بود. به علاوه این نتایج، با نتایج مطالعه هاجاز و همکاران (Hajas et al., 2022) در جایگزین کردن آرد برنج

جدول ۴- اثر آرد عدس برشته‌شده و سبوس برنج بر ویژگی‌های فیزیکی بیسکویت
Table 4- Effect of roasted lentil flour and rice bran on the physical properties of biscuits

تیمار	ضخامت	قطر	ضریب پخش
Treatment	Thickness (cm)	Diameter (cm)	Expansion coefficient
Control	0.90±0.05 ^a	3.89±0.03 ^f	4.30±0.21 ^f
RLF3	0.80±0.01 ^b	3.97±0.03 ^e	4.96±0.03 ^e
RLF6	0.80±0.03 ^b	4.11±0.05 ^d	5.14±0.13 ^e
RLF9	0.75±0.01 ^c	4.21±0.05 ^c	5.61±0.01 ^d
RLF12	0.62±0.03 ^d	4.30±0.07 ^b	6.94±0.23 ^b
RLF15	0.62±0.02 ^d	4.44±0.02 ^a	7.17±0.20 ^b
RBP3	0.64±0.01 ^d	4.07±0.01 ^d	6.36±0.08 ^c
RBP6	0.64±0.03 ^d	4.19±0.04 ^c	6.55±0.25 ^c
RBP9	0.60±0.03 ^d	4.21±0.02 ^c	7.03±0.32 ^b
RBP12	0.55±0.02 ^e	4.34±0.03 ^b	7.90±0.23 ^a
RBP15	0.54±0.02 ^e	4.44±0.05 ^a	8.23±0.21 ^a

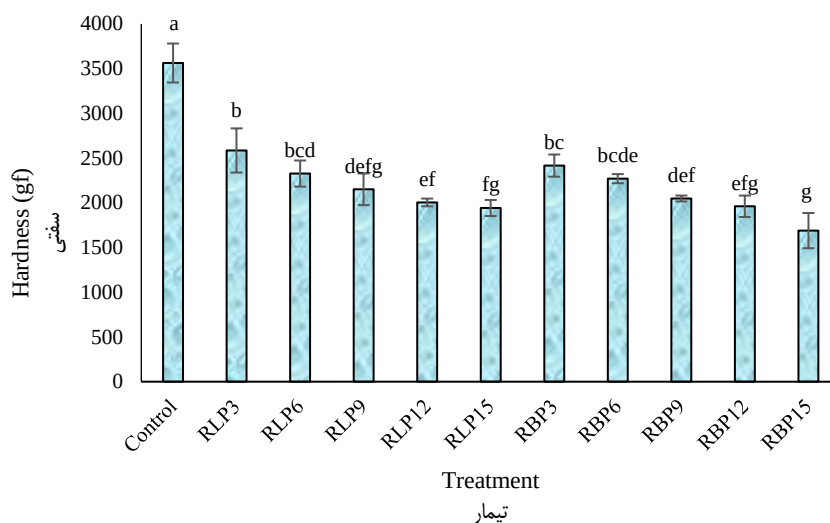
در هر ستون حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد. (آزمون دانکن، $P \leq 0.05$).

In each column, different letters indicate significant differences (Duncan's test, $P \leq 0.05$).

ویژگی‌های بافتی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در قابلیت پذیرش هر محصول غذایی فرآیند شده محسوب می‌شوند. از طرفی شرایط فرآوری و فرمولاسیون فرآورده غذایی نیز به‌طور مستقیم بر رفتار بافتی آن تأثیر می‌گذارد (Tayefe et al., 2021). نتایج ارزیابی آماری سفتی بافت بیسکویت بر تأثیر معنی‌دار افزودن آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج به فرمول بیسکویت بر سفتی بافت فرآورده دلالت داشت (شکل ۳). به‌دنبال استفاده از آرد عدس برشته‌شده و پودر سبوس برنج در فرمولاسیون بیسکویت از سفتی بافت فرآورده نهایی کاسته شد؛ به‌طوری‌که نمونه شاهد بیشترین مقدار سفتی (۳۵۶۳ گرم نیرو) را داشت و کمترین مقدار سفتی (۱۶۸۹ گرم نیرو) برای بیسکویت دارای ۱۵ درصد سبوس برنج به‌دست آمد. مشخص شده است، یکی از اثرات غنی‌سازی محصولات مبتنی بر آرد گندم، رقیق شدن پروتئین‌های گلوته‌نی و به‌دنبال آن تغییر در رفتار رئولوژیکی خمیر می‌باشد که این تغییر موجب تضعیف شبکه پروتئینی و تغییر ویژگی‌های تکنولوژیکی فرآورده می‌شود (Salem et al., 2021).

افزایش قطر و کاهش ضخامت در کوکی‌های حاوی آرد عدس در نتایج پژوهش پورتمن و همکاران (Portman et al., 2019) نیز گزارش شده است. علت کاهش ضخامت بیسکویت با افزودن منابع فیبر خوراکی به فرمول آن، کاهش مقدار گلوته‌نی و عدم توانایی خمیر در نگهداری گازها و بخارات آب در زمان پخت بیان شده است (Azami & Roufegari-Nejad, 2019). نتایج مطالعه ال گوهری (El-Gohery, 2021) نشان داد جایگزین کردن بخشی از آرد گندم با آرد لوبیا در فرمول بیسکویت منجر به افزایش قطر، ضخامت و ضریب پخش شد. این محقق اظهار کرد علی‌رغم محتوای پروتئین بالا در آرد لوبیا، احتمالاً کاهش محتوای گلوته‌نی و ویسکوزیته خمیر بیسکویت، در نتیجه افزودن لوبیای خام یا فرآوری شده به فرمول، سبب تغییرات ویژگی‌های فیزیکی بیسکویت شده است.

سفتی بافت



شکل ۳- اثر آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر سفتی بافت بیسکویت
حروف متفاوت نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار است ($p < 0.05$).

Fig. 3. The effect of roasted lentil flour and rice bran powder on hardness of biscuits
Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$).

نتایج ارزیابی تغییرات شاخص‌های رنگی بیسکویت در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تأثیر جایگزینی آرد گندم با آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر شاخص‌های رنگی روشنی (L^*)، قرمزی (a^*)، زردی (b^*) و شاخص قهوه‌ای شدن بیسکویت معنی‌دار است. با استفاده از آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج کاهش ۴/۱ تا ۱۶/۱ درصدی روشنی مشاهده شد و قرمزی ۱/۲۳ تا ۲/۳۹ برابر افزایش یافت. افزایش ۱/۱۴ تا ۱/۳۴ برابری زردی و ۱/۲۳ تا ۱/۸۶ برابری شاخص قهوه‌ای شدن از دیگر تأثیرات این جایگزینی بر شاخص‌های رنگی بیسکویت بود. با توجه به اینکه با افزایش سطح جایگزینی، شاخص‌های رنگی تغییر کرد، کمترین مقدار روشنی و بیشترین مقدار قرمزی، زردی و شاخص قهوه‌ای شدن، در نمونه‌های بیسکویت حاوی بالاترین سطح (۱۵ درصد) آرد عدس برشته شده و سبوس برنج مشاهده شد.

طی فرآیند پخت فراورده‌های نانوائی، وقوع واکنش‌های قهوه‌ای شدن به‌ویژه واکنش میلارد رنگ فرآورده را تغییر می‌دهد. شدت این واکنش‌ها به عواملی نظیر غلظت عوامل شرکت‌کننده در واکنش (نظیر قند، نشاسته و پروتئین) و شرایط فرآیند به‌ویژه دما و میزان کاهش رطوبت وابسته است (Milani et al., 2021). از طرفی ماهیت شیمیایی و نوع و مقدار رنگدانه‌های طبیعی موجود در فرآورده‌های غذایی بر شدت تغییرات رنگ آنها تأثیر می‌گذارد (Laddomada, Caretto, & Mita, 2015). لذا به نظر می‌رسد تأثیر ترکیبات تشکیل دهنده آرد عدس برشته شده و سبوس برنج علت تغییرات رنگ بیسکویت‌های حاوی آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج نسبت به نمونه شاهد

لذا به نظر می‌رسد تضعیف شبکه گلوتنی علت کاهش سفتی و انسجام کمتر و تردتر شدن بافت بیسکویت‌های حاوی آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بوده است. کاهش سفتی نان برآیند با افزایش مقدار آرد عدس در نتایج مطالعه قره‌خانی و مصطفی‌زاده (Gharekhani & Mostafazadeh, 2021) گزارش شده است. نتایج مشابهی در پژوهش رستمیان و همکاران (Rostamian et al., 2012) در زمینه تولید نان بدون گلوتن با استفاده از ترکیب آرد ذرت و آرد نخود به‌دست آمده است. این در حالی است که در برخی تحقیقات مشابه عدم تغییر معنی‌دار بافت یا افزایش سفتی محصولات پخت در اثر افزودن آرد حبوبات و انواع سبوس گزارش شده است که این تفاوت‌ها می‌تواند به عواملی هم‌چون فرمولاسیون و فرآیند مرتبط باشد. برای مثال خورسند و همکاران (Khorsand, Aliabadi, & Jarrahiferiz, 2018) گزارش کردند آرد سویا سفتی بافت دونات را کاهش داد اما آرد عدس موجب افزایش سفتی بافت آن شد. افزایش سفتی بافت بیسکویت با افزودن آرد اکارا در مطالعه زمانی و عباسی (Zamani & Abbasi, 2017) گزارش شد. ال گوهری (El-Gohery, 2021) نیز افزایش سفتی بافت بیسکویت حاوی آرد لوبیا را به‌دلیل افزایش محتوای فیبر و پروتئین و تعامل بین ترکیبات مختلف گزارش نمود. در مطالعه دیگری که توسط فتح‌الهی آقایی و قره‌خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) انجام شد، افزودن فیبر گندم تأثیر معنی‌داری بر سفتی بافت بیسکویت بر پایه آرد برنج نگذاشت.

رنگ

بوده است. نتایج پژوهش پورتمن و همکاران (Portman et al., 2019) نیز بر تیره‌تر شدن رنگ کوکی در اثر جایگزینی بخشی از آرد گندم با آرد عدس دلالت داشت.

جدول ۵- اثر آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر رنگ بیسکویت
Table 5- Effect of roasted lentil flour and rice bran powder on biscuit color indices

تیمار	روشنی	قرمزی	زردی	شاخص قهوه‌ای شدن
Treatment	Lightness (L^*)	Redness (a^*)	Yellowness (b^*)	Browning index
Control	78.84±1.01 ^a	2.89±0.08 ^g	19.94±0.22 ^f	31.26±0.63 ^h
RLF3	74.13±0.68 ^c	3.55±0.33 ^f	23.18±0.47 ^d	39.62±0.62 ^g
RLF6	71.25±0.59 ^d	4.31±0.15 ^e	23.62±0.26 ^{cd}	43.91±0.42 ^{ef}
RLF9	70.71±0.74 ^d	4.99±0.27 ^d	24.60±0.22 ^c	47.51±0.77 ^d
RLF12	68.31±0.95 ^e	5.65±0.27 ^c	26.27±0.34 ^b	53.57±0.15 ^b
RLF15	66.21±1.00 ^f	6.61±0.19 ^{ab}	26.79±0.22 ^a	58.07±1.39 ^a
RBP3	75.61±0.25 ^b	3.65±0.31 ^f	22.65±0.42 ^e	38.48±0.81 ^g
RBP6	73.80±0.35 ^c	4.95±0.16 ^d	23.69±0.18 ^c	42.91±0.75 ^f
RBP9	72.77±1.16 ^c	5.49±0.18 ^c	24.31±0.25 ^c	45.10±0.89 ^e
RBP12	70.79±0.28 ^d	6.28±0.12 ^b	25.95±0.23 ^b	51.27±0.12 ^c
RBP15	66.13±0.77 ^f	6.92±0.17 ^a	26.29±0.37 ^b	57.32±1.83 ^a

در هر ستون حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد (آزمون دانکن، $P \leq 0.05$).

In each column, different letters indicate significant differences (Duncan's test, $P \leq 0.05$).

ارزیابی آماری صفات حسی بر تأثیر معنی‌دار افزودن آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر خواص حسی بیسکویت دلالت داشت. امتیاز حسی رنگ تیمارهای آرد عدس برشته شده در سطح ۳ درصد و پودر سبوس برنج در سطوح ۳ و ۶ درصد تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت؛ اما در سطوح بالاتر این ترکیبات، کاهش معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۶). از نظر ویژگی حسی عطر و طعم، امتیازات داده شده به نمونه‌های دارای آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج تا سطح ۱۲ درصد اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشت. طبق نتایج مطالعه هاجاز و همکاران (Hajas et al., 2022) از نظر ارزیابان حسی مطلوبیت مصرف کوکی‌های بدون گلوتن حاوی آرد عدس به‌ویژه از نظر طعم بیشتر از نمونه شاهد تهیه شده با ۱۰۰ درصد آرد برنج بود.

امتیاز بافت بیسکویت‌های حاوی سطح ۳ درصد آرد عدس برشته شده تفاوت معنی‌داری با شاهد نشان نداد؛ اما از آنجاکه با افزایش سطح جایگزینی آرد گندم از سفتی بافت بیسکویت کاسته شد، امتیاز حسی بافت در سطوح بالای جایگزینی کاهش یافت. امتیاز بافت تمامی نمونه‌های دارای سبوس برنج نیز کمتر از شاهد بود. از نظر ارزیابان حسی، نمونه‌های بیسکویت حاوی آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج تا سطح ۹ درصد، مطلوبیت مصرف بیشتری نسبت به سایر سطوح جایگزینی داشته و لذا امتیاز پذیرش کلی بالاتری را به‌دست آوردند؛ اما از نظر امتیاز پذیرش کلی، تیمارهای حاوی ۱۲ و ۱۵ درصد آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج مقبولیت حسی کمتری را دریافت نمودند.

به علاوه کاهش شاخص روشنی نان بروتچن با افزایش مقدار آرد عدس در نتایج بررسی قره‌خانی و مصطفی‌زاده (Gharekhani & Mostafazadeh, 2021) نیز گزارش شده است. حصارى‌نژاد و همکاران (Hesarinejad et al., 2019) کاهش روشنی و افزایش قرمزی و زردی پوسته و مغز کیک در اثر جایگزینی بخشی از آرد گندم با آرد لوبیاجیتی را گزارش کردند. نتایج مطالعه فتح‌اللهی آقایی و قره‌خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) نیز بر کاهش روشنی و عدم تغییر معنی‌دار قرمزی و زردی بیسکویت بر پایه آرد برنج در اثر افزودن آرد پوسته گندم به‌عنوان منبع فیبر رژیمی دلالت داشت. افزایش تیرگی رنگ نان با افزودن سبوس برنج در بررسی طایفه و همکاران (Tayefe et al., 2021) نیز مشاهده شده است. کاهش شاخص رنگی L^* و افزایش شاخص‌های رنگی a^* و b^* در اثر جایگزینی بخشی از آرد اکارا با آرد گندم در بیسکویت، در نتایج بررسی زمانی و عباسی (Zamani & Abbasi, 2017) گزارش شده است. خورسند و همکاران (Khorsand et al., 2018) افزایش زردی و تیرگی دونات حاوی آرد عدس را به تشدید واکنش‌های قهوه‌ای شدن میلارد به‌دلیل حضور مقادیر زیاد اسید آمینه لیزین در آرد عدس و همچنین وجود رنگدانه‌های طبیعی این آرد نسبت دادند.

ویژگی‌های حسی

در صنعت غذا، میزان مطلوبیت مصرف و پذیرش فرآورده از طرف مصرف‌کننده، تداوم تولید و عرضه آن در بازار را تضمین می‌کند. نتایج

جدول ۶- اثر آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج بر خواص حسی بیسکویت

Table 6- The effect of roasted lentil flour and rice bran powder on the sensory properties of biscuits

تیمار	رنگ	عطر و طعم	بافت	پذیرش کلی	شاخص پذیرش
Treatment	Color	Flavor and taste	Texture	Total acceptability	Acceptance index (%)
Control	4.9 ^a	4.7 ^a	4.8 ^a	4.8 ^a	96
RLF3	4.8 ^{ab}	4.6 ^a	4.6 ^{ab}	4.7 ^a	94
RLF6	4.6 ^{bc}	4.6 ^a	4.4 ^{bc}	4.5 ^{abc}	90
RLF9	4.3 ^{de}	4.6 ^a	4.1 ^{de}	4.5 ^{abc}	90
RLF12	3.9 ^{fg}	4.4 ^{ab}	4.0 ^e	4.2 ^c	84
RLF15	3.7 ^g	4.1 ^b	3.7 ^f	3.8 ^d	76
RBP3	4.8 ^{ab}	4.7 ^a	4.5 ^{bc}	4.7 ^a	94
RBP6	4.7 ^{ab}	4.7 ^a	4.3 ^{cd}	4.6 ^{ab}	92
RBP9	4.4 ^{cd}	4.6 ^a	4.1 ^{de}	4.5 ^{abc}	90
RBP12	4.1 ^{ef}	4.4 ^{ab}	3.9 ^e	4.3 ^{bc}	86
RBP15	4.0 ^f	4.1 ^b	3.6 ^f	3.9 ^d	78

در هر ستون حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار می باشد (آزمون دانکن، $P \leq 0.05$).In each column, different letters indicate significant differences (Duncan's test, $P \leq 0.05$).

پیشنهاد شد. نتایج مشابهی در ارتباط با افزودن سبوس برنج به فرمول نان در پژوهش طایفه و همکاران (Tayefe et al., 2021) نیز به دست آمده است.

نتیجه گیری

به دلیل مزایای سلامت بخش بالا و ویژگی های حسی مطلوب فرآورده های پخت، امروزه غنی سازی این فرآورده ها، توجه بسیاری از تولیدکنندگان را به خود جلب نموده است. در این پژوهش جهت ارتقای ارزش تغذیه ای بیسکویت با تأکید بر افزایش سطح فیبر خوراکی، آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج جایگزین بخشی از آرد گندم مصرفی در تولید بیسکویت شد. نتایج ارزیابی خصوصیات کیفی بیسکویت بر افزایش محتوای فیبر، پروتئین، چربی، خاکستر و فنل کل بیسکویت دلالت داشت. به دنبال افزایش سطح فنل کل، فعالیت آنتی اکسیدانی بیسکویت نیز افزایش یافت. با کاهش مقدار آرد گندم و افزایش مقدار آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج از سفتی بافت کاسته شده، رنگ بیسکویت تیره تر، قرمزتر و زردتر شد. با توجه به عدم تأثیر نامطلوب آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج در سطوح پایین تر بر صفات حسی، این نمونه ها مطلوبیت مصرف بالاتری داشتند. به طور کلی با در نظر گرفتن پایین بودن ارزش غذایی آرد مورد استفاده در تولید بیسکویت، رونق گرفتن بازار این فرآورده به دلیل تغییر الگوی زندگی و نیز مناسب بودن این ماده غذایی برای پذیرش مکمل ها، استفاده از آرد عدس برشته شده و پودر سبوس برنج به عنوان افزودنی در جهت ارتقای کیفیت خوراکی و بهبود خواص عملکردی بیسکویت توصیه می گردد.

در مطالعات مشابه در زمینه استفاده از منابع فیبر خوراکی نیز علی رغم تأثیر سطوح بالای این منابع بر مقدار ترکیبات سلامتی بخش و عملکرد، به دلیل تأثیر منفی بر خصوصیات حسی فرآورده نهایی، این سطوح کاربرد پیشنهاد نشده است. برای مثال طبق نتایج مطالعه پروین و همکاران (Parveen et al., 2024) استفاده از سطوح بالای آرد حبوبات (نخود، ماش و عدس) به عنوان جایگزین بخشی از آرد گندم در تولید نان مسطح (چاپاتا) سبب کاهش امتیازات صفات حسی (رنگ، طعم و مزه، بافت و پذیرش کلی) شد. این محققین گزارش نمودند در بین نان های تولید شده با سطوح مختلف آرد عدس (۱۰ تا ۵۰ درصد)، سطح ۱۰ درصد بیشترین امتیاز پذیرش کلی را کسب کرد. مشخص شده است، در بین سطوح مختلف آرد لوبیایی خام و فرآوری شده (خیسانده شده، پخته شده و برشته شده و پوست گیری شده در سطح های ۱۰ تا ۵۰ درصد)، سطح متوسط (۳۰ درصد)، بیسکویتی تولید کرد که از نظر ویژگی های حسی (ظاهر، رنگ، عطر، طعم، بافت و پذیرش کلی) تفاوت معنی داری با بیسکویت تولید شده با ۱۰۰ درصد آرد گندم نداشت (El-Gohery, 2021). کاهش امتیاز پذیرش کلی دونات حاوی سطوح بالای آرد عدس نسبت به نمونه شاهد در نتایج پژوهش خورسند و همکاران (Khorsand et al., 2018) نیز به چشم می خورد.

طبق نتایج بررسی حصارنی ژاد و همکاران (Hesarinejad et al., 2019) سطح پایین جایگزینی آرد گندم با آرد لوبیایی از جذابیت های خوراکی کیک نکاست و بر ذائقه ارزیاب ها تأثیر نامطلوب نگذاشت؛ اما در سطوح بالاتر امتیازهای طعم، بافت، رنگ، ظاهر، بو و پذیرش کلی به طور معنی داری کاهش یافت. در گزارش فتح الهی آقایی و قره خانی (Fathollahi Aghaei & Gharakhani, 2019) نیز نمونه بیسکویت آرد برنج با درصد سبوس گندم کم (۱۵ درصد) با بیشترین امتیاز ارزیابی های حسی به عنوان بهترین نمونه بیسکویت حاوی فیبر رژیمی

میزان مشارکت نویسندگان

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

ایوبی: مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، تأمین مالی، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، منابع، نرم‌افزار، نظارت، نوشتن. **بلوردی:** مدیریت داده‌ها، تأمین مالی، نوشتن (بررسی و ویرایش)، نظارت، اعتبارسنجی.

References

1. AACC. (1999). Approved Methods of the AACC. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN. (Methods 46-18, 44-19).
2. AACC. (2000). Approved Methods of the AACC. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN. (Methods 08-01).
3. AACC. (2000). Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th Ed. American Association of Cereal Chemists, ST. Paul, (Methods 32-10) Minnesota, USA. <https://doi.org/10.1002/star.19890411114>
4. AACC. (2000). Approved Methods of the AACC (10th ed). American Association of cereal Chemists, st Paul, (Methods 30-25).
5. Alaei, M., Movahhed, S., & Ahmadi Chenarbon, H. (2018). Evaluation of adding chickpea flour on quality properties of oil and sponge cakes. *Journal of Food Science and Technology*, 73(14), 279-287.
6. Aminpour Daphchahi, E., Zakipour Rahimabadi, E., Rostamzad, H., & Nejat Pirsaraii, E. (2021). The effect of enrichment with silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) protein powder on amino acid profile, proximate analysis and sensory characteristic of biscuit. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 17(4), 559-568. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v17i5.87661>
7. Arabshahi Delouee, S., Mardani Ghahfarokhi, V., & Aalami, M. (2014). A functional biscuit prepared by addition of phenolic extracts of mint (*Mentha spicata* L.) and mulberry (*Morus indica* L.) leaves. *Journal of Food Research*, 24(3), 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.013>
8. Ayoubi, A., Balvardi, M., Hajimohammadi-Farimani, R., & Akhavan, H.R. (2023). Response surface optimization of cupcake formula fortified with date seed powder, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(2), 638-651. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05016-5>
9. Azami, S., & Roufegari-Nejad, L. (2019). The effect of red grape pomace powder replacement on physical characteristics and acrylamide content of biscuit. *Iranian Journal of Nutrition Science and Food Technology*, 14(1), 109-117.
10. Calderon-Montano, J., Burgos-Morón, E., Pérez-Guerrero, C., & López-ázaro, M. (2011). A review on the dietary flavonoid kaempferol. *Mini Rreviews in Medicinal Chemistry*, 11(4), 298-344. <https://doi.org/10.2174/138955711795305335>
11. Cui, Y., Morgenstern, H., Greenland, S., Tashkin, D.P., Mao, J.T., Cai, L., Cozen, W., Mack, T.M., Lu, Q.Y., & Zhang, Z.F. (2008). Dietary flavonoid intake and lung cancer—A population based case control study. *Cancer*, 112(10), 2241-2248. <https://doi.org/10.1002/cncr.23398>
12. Dewi, A.D.R., & Tjahjono, A. (2022) The making of rice bran flour-based sourdough bread. *Journal Pangan dan Agroindustri*, 10(1), 28-37. <https://doi.org/10.21776/ub.jp.a.2022.010.01.4>
13. El-Gohery, S. (2021) Effect of different treatments on nutritionalv of lima bean (*Phaseolus lunatus*) and its utilization in biscuit manufacture. *Food and Nutrition Sciences*, 12, 372-391. <https://doi.org/10.4236/fns.2021.124029>
14. Esmaeili, M., Rafe, A., Shahidi, S.A., & Ghorbani Hasan Saraei, A. (2016). Functional properties of rice bran protein isolate at different pH levels. *Cereal Chemistry*, 93(1), 58-63. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-04-15-0078-R>
15. Fathollahi Aghaei, M., & Gharakhani, M. (2019). Effect of adding wheat flour as dietary fiber in rice flour based biscuit composition and its quality assessment. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 11(3), 59-72. <https://doi.org/10.30495/JFST.2019.544968>
16. Gharekhani, M., & Mostafazadeh, B. (2021). Optimization of producing gluten free brotchen bread based on corn containing lentils flour and mucilage to the quince seeds. *Innovation in Food Science and Technology*, 13(2), 119-133.
17. Hajas, L., Sipos, L., Csobod, É.C., Bálint, M.V., Juhász, R., & Benedek, C. (2022). Lentil (*Lens culinaris* Medik.) flour varieties as promising new ingredients for gluten-free cookies. *Foods*, 11, 2028. <https://doi.org/10.3390/foods11142028>

18. Hajimohammadi Farimani, R., & Balvardi, M. (2021). Investigation of physicochemical properties and identification of dominant bacteria in several samples of traditional date vinegar. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 18(110), 165-176.
19. Hatamian, M., Noshad, M., Abdanan-Mehdizadeh, S., & Barzegar, H. (2020). Effect of roasting treatment on functional and antioxidant properties of chia seed flours. *Nutrition and Food Science Journal*, 21, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.07.004>
20. 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. *Journal of Food Science and Technology*, 16(86), 213-222. <https://doi.org/10.22067/ijstrj.v16i3.81666>
21. Irakli, M., Katsantonis, D., & Kleisiaris, F. (2015). Evaluation of quality attributes, nutraceutical components and antioxidant potential of wheat bread substituted with rice bran. *Journal of Cereal Science*, 65, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.010>
22. Jamehdor, S., Movahhed, S., & Ghiassi Tarazi, B. (2019). Determining the qualitative, textural and sensory characteristics of oil cakes made with flaxseed and oat bran as a fat replacement. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(5), 715-724.
23. Khorsand, M., Aliabadi, M., & Jarraiferiz, J. (2018). The effect of adding flour soy and lentil to doughnut on its physicochemical properties. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 7(2), 197-212. <https://doi.org/10.22101/JRIFST.2018.07.17.726>
24. Krishnan, R., Dharmaraj, U., Manohar, R.S., & Malleshi, N.G. (2011). Quality characteristics of biscuits prepared from finger millet seed coat based composite flour. *Food Chemistry*, 129, 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.107>
25. Laddomada, B., Caretto, S., & Mita, G. (2015). Wheat bran phenolic acids: bioavailability and stability in whole wheat-based foods. *Molecules*, 20(9), 15666-15685. <https://doi.org/10.3390/molecules200915666>
26. Lebesi, D.M., & Tzia, C. (2011). Effect of the addition of different dietary fiber and edible cereal bran sources on the baking and sensory characteristics of cupcakes. *Journal of Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 710-722. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0181-3>
27. Lucas, B.F., de Moraes, M.G., Santos, T.D., & Costa, J.A.V. (2018). Spirulina for snack enrichment: Nutritional, physical and sensory evaluations. *LWT - Food Science and Technology Journal*, 90, 270-276. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.12.032>
28. Majzoobi, M., Koshani, R., & Farahnaky, A. (2013). Determination of some characteristics of dough and biscuit enriched with oat bran. *Journal of Food Research*, 23(1), 37-45.
29. Martínez-Cervera, S., Salvador, A., Muguera, B., Moulay, L., & Fiszman, S.M. (2011). Cocoa fibre and its application as a fat replacer in chocolate muffins. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 729-736. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.06.035>
30. 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 of Nutrition Science and Food Technology*, 16(1), 85-94. <https://doi.org/10.52547/nsft.16.1.85>
31. Milani, J.M., Sedighi, N., & Mirzaei, H. (2018). Effect of germinated and non-germinated soybean flour on quality of Barbari bread. *Food Processing and Preservation Journal*, 10(1), 73-84. <https://doi.org/10.22069/efpp.2018.10294.1315>
32. Mohammad, I., Ahmad, A.R., & Senge, B. (2012). Effect of chickpea flour on wheat pasting properties and bread making quality. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 1902-1910. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0733-9>
33. Nateghi, L. (2018). The effect of carboxymethyl cellulose and diethyl tartaric acid on physicochemical, sensory, and shelf- life of toasted enriched by chickpea and bean flour. *Innovation in Food Science and Technology*, 9(2), 41-59.
34. Ouazib, M., Dura, A., Ziadi, F., & Rosell, C.M. (2016). Effect of partial substitution of wheat flour by processed (germinated, toasted, cooked) chickpea on bread quality. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 4, 8-18. <https://doi.org/10.12783/ijast.2016.0401.02>
35. Ozolina, K., Sarenkova, I., & Muizniece-Brasava, S. (2024) Estimation of roasted and raw faba bean and lentil flour functional properties. *Food and Nutrition Journal*, 9, 283. <https://doi.org/10.29011/2575-7091.100183>
36. Parveen, S., Pasha, A.I., Abrar, M., Khan, M.R., & Jamil, J. (2024). Application of chickpea, mung bean and lentil as sustainable protein source for the formulation of pulse based composite flour chapatti. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 57(4).281-295. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4923830>
37. Payan, R. (2001). *Introduction to thechnology of cereal products*. Noorpardazan press. Tehran. 190.
38. Phimolsiripol, Y., Mukprasirt, A., & Schoenlechner, R. (2012). Quality improvement of rice-based gluten-free bread using different dietary fiber fractions of rice bran. *Journal of Cereal Science*, 56, 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.06.001>

39. Portman, D., Maharjan, P., McDonald, L., Laskovska, S., Walker, C., Irvin, H., Blanchard, C., Naiker, M., & Panozzo, J.F. (2019). Nutritional and functional properties of cookies made using down-graded lentil – A candidate for novel food production and crop utilization. *Cereal Chemistry*, 00, 1–9. <https://doi.org/10.1002/cche.10232>
40. Reyes-Pérez, F., Salazar-García, M.G., Romero-Baranzini, A.L., Islas-Rubio, A.R., & Wong, B.R. (2013). Estimated glycemic index and dietary fiber content of cookies elaborated with extruded wheat bran. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68(1), 52-56. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0338-0>
41. Rostamian, M., Milani, J., & Maleki, G. (2012). Utilization of maize and chickpea flour for gluten-free bread making. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 1(2), 117-128. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2013-0004>
42. Sahraian, B., Mazaheri Tehrani, M., Naghipour, F., Ghiafeh Davoodi, M., & Soleimani, M. (2013). The effect of mixing wheat flour with rice bran and soybean flour on physicochemical and sensory properties of baguettes. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 8(3), 229-240.
43. Salem, A., Alehosseini, E., & Jafari, S.M. (2021). Enrichment of biscuits with protein to improve health effects. *Journal of Food Science and Technology*, 18(113), 377-387. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.113.377>
44. Savitha, Y.S., Indrani, M., & Prakash, J. (2008). Effect of replacement of sugar with sucralose and maltodextrin on rheological characteristics of wheat flour dough and quality of soft dough and quality of soft dough biscuits. *Journal of Texture Studies*, 39, 605- 616. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2008.00160.x>
45. Shahsavan Tabrizi, A., Ataye Salehi, E., & Sheikholesalami, Z. (2020). The effect of activated soy flour on the physicochemical, textural and sensory properties of pan bread. *Journal of Food Researches*, 30(3), 89-105.
46. Sharif, M.K., Butt, M.S., Anjum, F.M., & Khan, S.H. (2014). Rice Bran: A novel functional ingredient. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(6), 807-816. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.608586>
47. Sudha, M.L., Vetrimani, R., & Leelavathi, K. (2007). Influence of fibre from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food Chemistry*, 100, 1365-1370. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.013>
48. Tavakoli, F., Ayoubi, A., & Khorasany, S. (2025). Formulation and production of functional cookies based on roasted flour mixture (savigh) and jujube. *Food Processing and Preservation Journal*, 17(2), 65-90. <https://doi.org/10.22069/fppj.2025.23818.1891>
49. Tayefe, M., Shahidi, S., Mohammadzadeh Milani, J., & Sadeghi, M. (2021). Effect of hydrothermally treated rice bran addition on bread physical, textural and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 18(112), 43-52. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.112.43>
50. Turfani, V., Narducci, V., Durazzo, A., Galli, V., & Carcea, M. (2017). Technological, nutritional and functional properties of wheat bread enriched with lentil or carob flours. *LWT- Food Science and Technology*, 78, 361-6. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.030>
51. Zamani, S., & Abbasi, H. (2017). Investigation the effect of okara flour and protease enzyme on physicochemical and sensorial properties of semi-sweet biscuit. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 6(3), 261-276. <https://doi.org/10.22101/JRIFST.2017.11.18.634>
52. Zhang, C., Guo, X., Guo, R., Zhu, L., Qiu, X., et al. (2023) Insights into the effects of extractable phenolic compounds and Maillard reaction products on the antioxidant activity of roasted wheat flours with different maturities. *Food Chemistry*, 17, 100548. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100548>

Research Article

Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 175-192

Application of Ultrasound as Pretreatment to Improve the Functionality of Whey Protein Powder during Spray Drying

M. Aram Nabi Nia¹, H. Karazhiyan^{2*} 

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

2- Department of Food Science and Technology, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran

(*- Corresponding Author Email: hojjat.karazhiyan@iau.ac.ir)

Received: 05.02.2026

Revised: 15.04.2026

Accepted: 21.04.2026

Available Online: 09.05.2026

How to cite this article:

Aram Nabi Nia, M., & Karazhiyan, H. (2026). Application of ultrasound as pretreatment to improve the functionality of Whey protein powder during spray drying. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(2), 175-192. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97587.1550>

Introduction

Whey proteins are among the most valuable functional ingredients derived from dairy industry. Whey proteins possess high nutritional quality, rapid digestibility, and multifunctional techno-functional properties such as solubility, emulsifying capacity, foaming ability, and fat-binding potential. The major whey protein fractions, including β -lactoglobulin, α -lactalbumin, immunoglobulins, lactoferrin, and bovine serum albumin, play a crucial role in improving texture, stability, and sensory quality of food formulations. Consequently, whey protein powders are extensively utilized in dairy products, functional foods, beverages, sports nutrition, and pharmaceutical formulations. Drying is a critical step in whey protein powder production, directly influencing product quality and functionality. Spray drying is the most widely used industrial method due to its cost-effectiveness and scalability; however, thermal stress during the process may induce protein denaturation, aggregation, reduced solubility, and wall deposition, ultimately decreasing powder yield and functional performance. Freeze drying, although effective in preserving protein structure, is limited by high energy consumption, long processing time, and low economic feasibility. Therefore, improving spray drying efficiency while maintaining or enhancing whey protein functionality remains a major industrial challenge. In recent years, ultrasound has gained attention as a non-thermal and environmentally friendly processing technology capable of modifying protein structures through cavitation-induced mechanical effects. High-intensity ultrasound can disrupt protein aggregates, alter secondary and tertiary structures, reduce particle size, and improve dispersion stability. Despite numerous studies reporting the positive effects of ultrasound on dairy proteins, comprehensive investigations on the combined effects of ultrasound pretreatment and drying methods on whey protein powder characteristics are still limited. Accordingly, the present study aimed to evaluate the influence of ultrasound pretreatment and to compare its effects with conventional spray drying and freeze drying on the physicochemical, structural, and functional properties of whey protein powder.

Materials and Methods

Pasteurized low-fat milk (1.5% fat) was used for whey protein extraction using an acid precipitation method. The obtained whey was subjected to ultrasound pretreatment using an ultrasonic bath operating at 20 kHz. Treatments were applied at power levels of 100, 200, and 300 W for durations of 5, 15, and 25 min. The treatment temperature was maintained below 30 °C using an ice-water bath to prevent thermal denaturation. Ultrasound-treated samples were dried using a spray dryer under controlled conditions (inlet temperature 170 °C, outlet temperature 70 °C, feed solids 20%). Control samples were produced without ultrasound pretreatment and dried either by spray drying or freeze drying. Freeze drying was performed at -80 °C followed by sublimation under vacuum (0.01 mbar). Powder yield, protein solubility, fat absorption capacity, emulsifying activity index,



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.2026.97587.1550>

and foaming capacity were determined using standard methods. Structural and physicochemical properties were analyzed using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), particle size analysis, and zeta potential measurements. All experiments were conducted in triplicate. Statistical analysis was performed using ANOVA, and optimization of ultrasound conditions was carried out using response surface methodology.

Results and Discussion

Ultrasound pretreatment significantly improved spray drying performance and functional properties of whey protein powder ($p < 0.05$). Powder yield increased from 46.29% in the control spray-dried sample to a maximum of 72.27% in ultrasound-treated samples, primarily due to improved atomization, reduced feed viscosity, and decreased wall deposition. Protein solubility showed a substantial increase, reaching up to 98.11% after ultrasound pretreatment, which was attributed to protein unfolding, exposure of hydrophilic groups, and reduced aggregation. Although fat absorption capacity decreased in ultrasound-treated samples compared to freeze-dried controls, extended ultrasound treatment partially restored this property, indicating a balance between structural unfolding and reorganization. Emulsifying activity and foaming capacity were markedly enhanced in the optimized ultrasound-assisted spray-dried sample, correlating with reduced particle size, higher surface charge, and improved colloidal stability. FTIR analysis revealed changes in amide I and II bands, suggesting alterations in secondary protein structure without affecting the primary structure. XRD patterns indicated an amorphous structure for all samples, with ultrasound-treated powders exhibiting a more compact amorphous arrangement. SEM images confirmed that ultrasound-assisted spray drying produced smoother, more uniform particles with fewer surface irregularities. Optimization results identified ultrasound treatment at approximately 273.5 W for 25 min as the optimal condition for maximizing yield and functional performance.

Conclusion

This study demonstrates that ultrasound pretreatment prior to spray drying is an effective and practical strategy for enhancing the quality and functionality of whey protein powder. The synergistic combination of ultrasound and spray drying significantly improved powder yield, solubility, emulsifying activity, and foaming capacity while promoting favorable structural modifications such as reduced particle size, improved surface uniformity, and increased colloidal stability. Compared to conventional spray drying and freeze drying, ultrasound-assisted spray drying offered superior overall performance with higher industrial feasibility. From an application perspective, this approach provides a cost-effective, non-thermal, and environmentally friendly solution for producing high-quality whey protein powders suitable for use in functional foods, beverages, and protein-enriched formulations. The findings support the industrial potential of ultrasound technology as pretreatment step for optimizing whey protein powder production.

Keywords: Freeze drying, Functional properties, Spray drying, Structural modification, Ultrasound pretreatment, Whey protein powder

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۷۵-۱۹۲

کاربرد امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار در بهبود عملکرد پودر پروتئین آب پنیر طی خشک کردن پاششی

مجید آرام نبی^۱ - حجت کاراژیان^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

چکیده

پروتئین های آب پنیر به دلیل ارزش تغذیه ای بالا و ویژگی های عملکردی مطلوب، کاربرد گسترده ای در صنایع غذایی دارند؛ با این حال، فرآیندهای خشک کردن متداول می توانند منجر به کاهش کیفیت عملکردی این ترکیبات شوند. هدف از این پژوهش، بررسی اثر پیش تیمار غیرحرارتی امواج فراصوت و مقایسه روش های خشک کردن پاششی و انجمادی بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی، ساختاری و عملکردی پودر پروتئین آب پنیر بود. بدین منظور، از روش سطح پاسخ (RSM) جهت بررسی اثر توان های فراصوت (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات) و زمان های تیمار (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) استفاده شد. بازده تولید پودر، حلالیت در آب، ظرفیت جذب چربی، شاخص فعالیت امولسیون، ظرفیت کف کنندگی، ویژگی های ریزساختاری (SEM)، ساختار کریستالی (XRD)، طیف سنجی FTIR، پتانسیل زتا و اندازه ذرات مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اعمال پیش تیمار فراصوت تأثیر معنی داری بر بهبود ویژگی های عملکردی دارد. بر اساس بهینه سازی مدل های ریاضی، شرایط بهینه در توان ۲۷۳/۴۷ وات و زمان ۲۴/۸ دقیقه تعیین گردید. در این شرایط، بازده تولید پودر به ۷۱/۴۲ درصد و حلالیت در آب به ۹۸/۱۱ درصد رسید که به ترتیب نشان دهنده افزایش ۵۴/۲۸ و ۱۷/۸۹ درصد نسبت به نمونه شاهد (بدون تیمار) بود. همچنین در نقطه بهینه، ظرفیت جذب چربی ۱۲۹/۸ درصد و مطلوبیت نهایی مدل ۰/۹۵۶ برآورد شد. نتایج نشان داد که زمان تیمار نقش برجسته تری نسبت به توان در بهبود ویژگی ها دارد. تحلیل های ساختاری (FTIR و XRD) و تصاویر SEM بیانگر اصلاح ریزساختار، کاهش تجمعات پروتئینی و ایجاد ذرات یکنواخت تر در نمونه های تیمار شده با امواج فراصوت بودند. همچنین، کاهش اندازه ذرات و افزایش قدر مطلق پتانسیل زتا در نمونه بهینه، پایداری کلوئیدی بالاتری را نشان داد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می دهد که ترکیب پیش تیمار امواج فراصوت و خشک کن پاششی، روشی کارآمد، کم هزینه و سازگار با محیط زیست برای بهبود کیفیت و عملکرد پودر پروتئین آب پنیر بوده و قابلیت کاربرد صنعتی بالایی دارد.

واژه های کلیدی: پودر پروتئین آب پنیر، پیش تیمار امواج فراصوت، خشک کن پاششی، خشک کن انجمادی، خصوصیات عملکردی

مقدمه

ویژگی های خاصی مانند افزایش حلالیت، بهبود امولسیون کنندگی، خاصیت آنتی اکسیدانی و اثرات ایمنی زا هستند. این ترکیبات به دلیل داشتن ارزش بیولوژیکی بالا و جذب سریع، در صنایع غذایی، دارویی و ورزشی به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند (Kilara, & Vaghela, 2018; Xiong, Li, Boeren, Vervoort, & Hettinga, 2020). با توجه به اهمیت عملکردی پروتئین های آب پنیر، تولید این محصول با کیفیت بالا نقش مهمی در بهبود ویژگی های تغذیه ای و فیزیکی محصولات غذایی دارد. عواملی مانند حلالیت بالا، پایداری حرارتی، قابلیت ژل سازی، اندازه ذرات مناسب و

پروتئین های آب پنیر شامل بتا-لاکتوگلوبولین، آلفا-لاکتالبومین، ایمونوگلوبولین ها، لاکتوفیرین و سرم آلبومین هستند که هر کدام دارای

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
۲- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: hojjat.karazhiyan@iaui.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97587.1550>

فرآیند خشک کردن نسبت به روش‌های دیگر اشاره کرد (Marín, Alemán, Montero, & Gómez-Guillén, 2018; Kabeer, & Ledari, Milani, Shahidi, & Nagamanniammai, 2023; Golkar, 2024). به منظور بهبود کیفیت پودر پروتئین آب پنیر و افزایش کارایی فرآیند خشک کردن پاششی، می‌توان از روش‌های پیش‌تیمار مانند امواج فراصوت، تغییر در شرایط عملیاتی خشک‌کن و استفاده از حامل‌های پایدارکننده بهره برد. امواج فراصوت به عنوان یک روش غیرحرارتی، با کاهش اندازه ذرات و بهبود حلالیت پروتئین‌ها، می‌تواند کیفیت نهایی پودر را بهبود ببخشد و اثرات منفی دما را کاهش دهد. خشک کردن پاششی در تولید پودر پروتئین آب پنیر کاربرد اساسی دارد، اما چالش‌های مرتبط با افت کیفیت پروتئین، چسبندگی و کاهش بازده، بهینه‌سازی شرایط فرآیند را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد (Song et Prabhuzantye, Khaire, & Gogate, 2019; al., 2022).

پراپهوزانتی و همکاران (Prabhuzantye et al., 2019) بهبود فرآیند جداسازی غشایی آب پنیر و خشک‌کن پاششی پس از آن، به منظور بازیافت کنسانتره پروتئین آب پنیر را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات انجام‌شده روی اولترافیلتراسیون همراه با فراصوت نشان داد که استفاده از امواج فراصوت باعث کاهش گرفتگی غشا و افزایش میزان شار تراوش می‌شود.

سرانبندی و همکاران (Sarabandi et al., 2022) کنسانتره پروتئین آب پنیر را تحت تیمار امواج فراصوت یا هیدرولیز نسبی با آنزیم آلکالاز قرار دادند. تیمارهای اصلاحی باعث افزایش محتوای اسیدهای آمینه آزاد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی شدند و همچنین حلالیت، فعالیت امولسیفایری و توانایی کف‌زایی کنسانتره پروتئین آب پنیر را بهبود بخشیدند.

التایبانی و همکاران (Al-Thaibani et al., 2024) کنسانتره پروتئین آب پنیر شتر را در دماهای مختلف به روش خشک‌کن پاششی خشک نمودند و در زمان‌های مختلف تحت تیمار امواج فراصوت قرار دادند و سپس با استفاده از خشک‌کن انجمادی به پودر ریز تبدیل نمودند. مشاهده شد که تیمار فراصوت به طور قابل‌توجهی باعث افزایش تجزیه پروتئین در مقایسه با تیمار خشک‌کن پاششی می‌شود. هر دو تیمار روش خشک‌کن پاششی و فراصوت به میزان کمی فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های کنسانتره پروتئین آب پنیر را افزایش دادند.

هدف از انجام این مطالعه، بررسی و مقایسه اثر دو روش فرآوری شامل خشک کردن پاششی (به عنوان روش حرارتی متداول) و فراصوت‌دهی (به عنوان روش غیرحرارتی) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (مانند اندازه ذرات، توزیع بار سطحی و بازده تولید پودر)، تکنولوژیکی (نظیر حلالیت و قابلیت جذب روغن) و عملکردی

توانایی تشکیل کف از جمله ویژگی‌های مهمی هستند که می‌توانند کیفیت و کاربرد آب پنیر را در محصولات مختلف افزایش دهند. تولید پودر پروتئین آب پنیر با کیفیت می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود بهره‌وری صنعت لبنیات و افزایش ارزش اقتصادی این محصول داشته باشد (Kumar, Chauhan, Shinde, Subramanian, & Nadanasabapathi, 2018; Kandasamy et al., 2021).

بنابراین، با توجه به ارزش تغذیه‌ای و کاربردهای گسترده پروتئین‌های آب پنیر، انجام فرآیندهای تولید و بهبود خصوصیات عملکردی آن‌ها از طریق فناوری‌های نوین می‌تواند نقش کلیدی در ارتقای کیفیت محصولات غذایی و افزایش بهره‌وری صنعت لبنیات ایفا کند.

تکنولوژی‌های مختلفی برای اصلاح ویژگی‌های ساختاری و فیزیکوشیمیایی پروتئین‌ها به کار گرفته شده‌اند. در میان این فناوری‌ها، امواج فراصوت به عنوان یک تکنیک غیرحرارتی به طور گسترده برای اصلاح پروتئین‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Jambrak, Mason, Lelas, Paniwnyk, & Herceg, 2014).

فراصوت به طور گسترده در صنایع غذایی در عملیات‌های مختلفی مانند همگن‌سازی، آب‌زدایی، امولسیون‌سازی، نرم کردن گوشت، غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها، کاهش اندازه ذرات و بسیاری رویکردهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. فراصوت با فرکانس پایین معمولاً به عنوان تولیدکننده حفره‌زایی در محلول‌ها به کار می‌رود، در حالی که فرکانس‌های بالاتر (۵-۱۰ مگاهرتز) برای اهداف تحلیلی و کنترل فرآیند استفاده می‌شوند. این فناوری با ایجاد حباب‌های ریز و انفجار آنها، موجب تخریب دیواره سلولی و افزایش نفوذپذیری بافت مواد غذایی می‌شود. کاربرد امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در فرآیند خشک کردن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا با ایجاد ریزکانال‌هایی در ساختار ماده غذایی، مسیر خروج آب را هموار کرده و به طور چشمگیری زمان خشک شدن و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. این پیش‌تیمار در نهایت منجر به تولید محصولی با بافت مطلوب‌تر، قابلیت جذب آب مجدد بالاتر و حفظ بهتر ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای می‌شود (Jambrak, Mason, Lelas, Paniwnyk, & Herceg, 2014).

خشک‌کن پاششی یکی از رایج‌ترین و کارآمدترین روش‌های حرارتی برای خشک کردن و فرآوری پروتئین آب پنیر است که در صنایع غذایی و لبنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Both, Boom, & Haas, Kim, Atamer, Wu, & Dallas, Schutyser, 2020; 2024). خشک کردن انجمادی یا لیوفیلیزاسیون به دلیل حفظ ساختار و ترکیبات شیمیایی ماده، به‌ویژه برای مواد حساس به حرارت بسیار مؤثر است. این روش به‌ویژه برای محصولاتی که نیاز به حفظ ساختار و خواص خود دارند، مناسب است. از معایب این روش می‌توان به هزینه‌های بالای تجهیزات و مصرف انرژی زیاد و زمان طولانی‌تر

ظرفیت جذب چربی و شاخص فعالیت امولسیون بود برای انجام آزمون‌های بعدی انتخاب شدند.

تولید پودر پروتئین آب پنیر با روش خشک کن انجمادی/پاششی

پودر پروتئین آب پنیر شیر به دو روش خشک کن انجمادی (به عنوان کنترل خشک کن انجمادی) و خشک کن پاششی (به عنوان کنترل خشک کن پاششی) بدون پیش فرآیند تولید شد. به طور خلاصه، خشک کن انجمادی روی نمونه‌های از پیش منجمد شده در دمای -80°C درجه سانتی‌گراد با استفاده از خشک کن انجمادی (Telstar freeze-dryer, Terrassa, Spain) تحت فشار 0.1 میلی‌بار انجام شد (Al-Thaibani et al., 2024). فرآیند خشک کن پاششی با استفاده از یک خشک کن پاششی اجرا شد که در آن شرایط عملیاتی زیر اعمال شدند: دمای ورودی 170°C درجه سانتی‌گراد و دمای خروجی 70°C درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. نرخ تغذیه جامد 20% و رطوبت نسبی حدود $8/5\%$ تنظیم شد. نرخ جریان هوای خشک کن $7/5$ متر مکعب بر دقیقه بود. فشار پاشش 0.52 مگاپاسکال در کل فرآیند خشک کردن ثابت نگه داشته شد (Al-Thaibani et al., 2024).

بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر

بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر از طریق جمع‌آوری پودر آزاد در بخش مخروطی پایین محفظه خشک کن طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

$$(1) \times 100 = \text{بازده خشک کردن } (\%) \text{ جرم آب پنیر ورودی/جرم پودر آب پنیر خشک جمع شده}$$

تعیین خواص عملکردی و تکنولوژیکی پودر پروتئین آب پنیر

حلالیت پروتئین طبق روش گزارش شده توسط الشمسی و همکاران (Al-Shamsi, Mudgil, Hassan, & Maqsood, 2018) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، 200 میلی‌گرم از نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر در 20 میلی‌لیتر آب دیونیزه حل شد و به مدت 2 دقیقه ورتکس شد. سپس، محلول به مدت 15 دقیقه در دمای 25°C درجه سانتی‌گراد و با نیروی $7500 \times \text{g}$ سانتریفیوژ شد. میزان حلالیت پروتئین بر اساس مقدار پروتئین موجود در مایع رویی (mg پروتئین بر g نمونه) با استفاده از روش بیوره تعیین شد.

(از جمله خاصیت امولسیون‌کنندگی و کف‌کنندگی) پودر پروتئین آب پنیر است. اگرچه خشک کردن پاششی به طور گسترده در صنعت کاربرد دارد، اما چالش‌های مرتبط با تخریب حرارتی پروتئین‌ها و کاهش کیفیت محصول، ضرورت به کارگیری روش‌های مکمل یا جایگزین را ایجاد می‌کند. استفاده هم‌زمان و مقایسه‌ای دو رویکرد حرارتی و غیرحرارتی در فرآوری پودر پروتئین آب پنیر و بررسی اثرات افتراقی آن‌ها بر طیف وسیعی از ویژگی‌های کیفی، نوآوری این پژوهش است. با توجه به اینکه مطالعات محدودی به مقایسه سیستماتیک این دو روش پرداخته‌اند، یافته‌های این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و دستیابی به محصولی با کیفیت برتر و کارایی عملکردی بالاتر گردد.

مواد و روش‌ها

مواد

شیر پاستوریزه کم‌چرب برند کاله ($1/5\%$ چربی و $9/7\%$ ماده خشک) تهیه شد. پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای 4°C درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و ظرف 2 ساعت فرآوری شدند.

روش‌ها

استخراج پروتئین‌های آب پنیر

پروتئین‌های آب پنیر از شیر طبق روش جعفر و همکاران (Jafar, Kamal, Mudgil, Hassan, & Maqsood, 2018) استخراج شد.

پیش تیمار آب پنیر با امواج فراصوت

پیش تیمار امواج فراصوت بر روی آب پنیر با استفاده از فراصوت نوع حمام (bath-type EGS5HD, Enge Solutions, São Paulo-SP, Brazil) و بر اساس روش احمدی و همکاران (Ahmadi, Razavi, & Varidi, 2017) انجام شد. به طور خلاصه، آب پنیر تحت تیمار امواج فراصوت حمام با فرکانس 20 کیلوهرتز به مدت 5 ، 15 و 25 دقیقه در توان‌های 100 ، 200 و 300 وات قرار گرفت. در طول فرآیند، دمای نمونه‌ها با استفاده از حمام یخ-آب زیر 30°C درجه سانتی‌گراد حفظ شدند. نمونه‌های تیمار شده با امواج فراصوت سپس با استفاده از دستگاه خشک کن پاششی (Armfield, UK) خشک شدند تا پودر پروتئین آب پنیر ریزدانه تولید شود و تا زمان انجام آزمایش‌های بعدی در دمای 18°C درجه سانتی‌گراد ذخیره شدند. **جدول ۱** طراحی آزمون‌ها را نشان می‌دهد. بازده تولید پودر، حلالیت پروتئین در آب و ظرفیت جذب چربی به عنوان پاسخ جهت بهینه‌سازی شرایط امواج فراصوت در نظر گرفته شدند. یک نمونه بهینه که دارای بالاترین بازده تولید پودر، حلالیت پروتئین در آب،

جدول ۱- طراحی آزمون‌ها

Table 1- Method's design

اجرا	توان-وات	زمان-دقیقه
Run	Power (wat)	Time (min)
1	100	5
2	200	5
3	300	5
4	100	15
5	200	15
6	300	15
7	100	25
8	200	25
9	300	25

ظرفیت جذب چربی

ظرفیت جذب چربی مطابق روش توصیف‌شده توسط مقصود و همکاران (Maqsood et al., 2019) طبق رابطه (۲) بررسی شد. ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر با ۱۰۰۰ میکرولیتر روغن آفتابگردان مخلوط شد و به مدت ۱ دقیقه ورتکس شد. سپس تعلیق پروتئین در روغن با سرعت $13600 \times g$ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. مایع رویی جدا شده و لوله‌ها در زاویه ۴۵ درجه به مدت ۱ تا ۲ دقیقه تخلیه شدند.

(۲) $(\%) \text{ ظرفیت جذب چربی} = (\text{وزن روغن جذب شده}) / (\text{وزن نمونه پروتئین}) \times 100$

تحلیل ساختاری مادون قرمز

طیف‌های جذب مادون قرمز نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر با استفاده از طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون قرمز اندازه‌گیری شدند. این اندازه‌گیری در بازه فرکانسی ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} انجام شد. برای هر طیف، ۳۲ اسکن از اینترفروگرام‌ها ثبت شدند و وضوح طیفی برابر با 4 cm^{-1} در نظر گرفته شد (Al-Shamsi et al., 2018).

تحلیل ساختاری کریستالی

با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس ساختار کریستالی نمونه‌ها بررسی شد. شرایط عملیاتی این آزمون شامل طول موج پرتو ایکس (۸) برابر با $1/5418 \text{ \AA}$ آنکستروم، ولتاژ ۴۰ کیلوولت و دقت ۳۰ میلی‌آمپر بود. نمونه‌های پودری درون یک صفحه آلومینیومی قرار گرفتند و پروفایل پراش اشعه ایکس برای زاویه 2θ در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درجه با نرخ اسکن $0.2^\circ/\text{s}$ درجه بر دقیقه ثبت شد.

ریزساختار نمونه‌های آب پنیر

ویژگی‌های ریزساختاری نمونه‌های آب پنیر تیمارشده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر بررسی شدند (Razavi, Kenari, Farmani, & Jahanshahi, 2020).

شاخص فعالیت امولسیون

شاخص فعالیت امولسیون نمونه‌های مختلف پودر پروتئین آب پنیر مطابق روش توصیف‌شده توسط الشمسی و همکاران (Al-Shamsi et al., 2018) طبق رابطه (۳) اندازه‌گیری شد. ۳۰۰ میلی گرم از نمونه‌های مختلف با ۳۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه (۱٪ وزنی/حجمی) مخلوط و pH روی ۷ تنظیم شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر روغن آفتابگردان اضافه شد. مخلوط‌ها با استفاده از هموژنایزر در سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱ دقیقه هموژن شدند. پس از آن، ۵۰ میکرولیتر از امولسیون از پایین ظرف در ۰ و ۱۰ دقیقه نمونه‌برداری و با ۵ میلی‌لیتر محلول ۰/۱٪ سدیم دودسیل سولفات (SDS) مخلوط شد. جذب نوری محلول رقیق‌شده در ۵۰۰ نانومتر با استفاده از طیف‌سنج اندازه‌گیری شد.

(۳) $\text{وزن پروتئین} \times 25 / (2 \times 2.303 \times A_0) = \text{شاخص فعالیت امولسیون} (\%)$
که در آن A_0 جذب نمونه بلافاصله پس از همگن‌سازی است.

ظرفیت کف‌کنندگی

ظرفیت کف‌کنندگی نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر طبق روش گزارش‌شده توسط مقصود و همکاران (Maqsood et al., 2019)

اندازه ذرات و توزیع بار سطحی

پتانسیل زتا و توزیع اندازه ذرات بر اساس روش توصیف شده توسط احمد و همکاران (Ahmad et al., 2019) و با استفاده از دستگاه زتاسایزر ارزیابی شد. برای اندازه گیری پتانسیل زتا، نمونه های آب پنیر با غلظت ۰/۱ درصد در ۰/۱ میلی مولار KCl حل شدند، pH محلول روی ۶ تنظیم شد، سپس نمونه ها به مدت یک شب برای تعادل سازی نگهداری شدند و پس از آن سنجش انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری و بهینه یابی

در این پژوهش، جهت بررسی اثرات تیمار فراصوت و بهینه یابی شرایط فرآیند، از روش سطح پاسخ (RSM) در قالب طرح مرکب مرکزی وجه مرکز (Face-Centered CCD) استفاده شد. متغیرهای مستقل شامل توان فراصوت (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ وات) و زمان فراصوت (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) بودند که در مجموع ۹ ترکیب تیماری توسط نرم افزار Design-Expert (نسخه ۱۱) ارائه و به صورت تصادفی اجرا گردید. جهت تعیین مدل ریاضی حاکم بر هر پاسخ، از آنالیز واریانس (ANOVA) و شاخص های آماری نظیر ضریب تبیین (R^2) و آزمون عدم برازش (Lack of Fit) استفاده شد. برای پارامترهایی که رفتار غیرخطی داشتند (نظیر حلالیت)، مدل درجه دوم (Quadratic) و برای سایر پارامترها، مدل خطی (Linear) جهت ترسیم سطوح پاسخ و تعیین نقطه بهینه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، جهت مقایسه میانگین تیمارها در موارد لازم، از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد.

نتایج و بحث

بازده خشک کردن

در این پژوهش از دو روش خشک کن انجمادی و پاششی و پیش تیمار امواج فراصوت جهت خشک کردن آب پنیر استفاده شد. نتایج مربوط به بازده خشک کردن نمونه های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. در روش خشک کن انجمادی ۳۳/۲۵٪ و در روش پاششی ۴۶/۲۹٪ بود. پرابهوزانتی و همکاران (Prabhuzantye et al., 2019) بازده پودر آب-پنیر اسیدی بدون پیش تیمار که با روش خشک کن پاششی تهیه شده بود را حدود ۳۱ درصد گزارش نمودند. در پژوهش دیگر پیرس و همکاران (Pierce, Skonberg, Dumas, & Jin, 2024; Calder, ۲۰۲۴) بازده بازیابی پروتئین را حدود ۵۷٪ اعلام نمودند. آنها بازده را به صورت جرم لخته حاصل بعد از خشک کن انجمادی نسبت به جرم آغازین آب پنیر محاسبه نمودند و بازیابی پروتئین از مایع قبل از خشک سازی را به صورت لیوفیلیز انجام دادند

(Pierce et al., 2024). مطالعات پیشین گزارش کرده اند که خشک کن پاششی معمولاً بیشترین بازده را می دهد (زیرا تلفات چسبندگی/رسوب روی دیواره وجود ندارد) ولی بسته به نمونه می تواند به مقادیر مشابه نزدیک شود. به ویژه زمانی که غلظت سازی و سیستم های بازیابی سیکلون مناسب برقرار باشد (Wang et al., 2020; Singh, Pandey, Singh, & Dar, 2024).

جدول ۲ مقادیر بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر خشک شده به روش خشک کردن پاششی پس از اعمال پیش تیمار فراصوت را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، بازده تولید پودر در تمام تیمارهای امواج فراصوت به طور معنی داری ($p < 0.05$) بالاتر از شاهد بوده است. در تیمار شاهد، بازده خشک کن انجمادی و پاششی به ترتیب برابر با ۳۳/۲۵ و ۴۶/۲۹ درصد به دست آمد، در حالی که اعمال پیش تیمار فراصوت موجب افزایش بازده تا دامنه ای بین ۵۳/۱۷ تا ۷۲/۲۷ درصد گردید. بیشترین بازده در شرایط توان ۳۰۰ وات و زمان ۲۵ دقیقه (ران ۹) به مقدار ۷۲/۲۷ درصد ثبت شد. به طور کلی، افزایش توان و زمان فراصوت تأثیر مثبتی بر بازده تولید داشت؛ به گونه ای که با افزایش توان از ۱۰۰ به ۳۰۰ وات و زمان از ۵ به ۲۵ دقیقه، روندی صعودی در بازده مشاهده گردید. این موضوع می تواند به اثرات مکانیکی و کاویتاسیونی امواج امواج فراصوت نسبت داده شود که منجر به تغییر در ساختار پروتئین ها، کاهش ویسکوزیته محلول و بهبود خصوصیات رئولوژیکی می شود. این تغییرات در نهایت سبب بهبود پاشش محلول در محفظه خشک کن پاششی، کاهش چسبندگی ذرات به دیواره محفظه و افزایش جمع آوری پودر در بخش مخروطی دستگاه می گردد (Prabhuzantye et al., 2019; Haas et al., 2024). می توان نتیجه گرفت که فراصوت نه تنها به عنوان یک پیش تیمار مؤثر در بهبود بازده فرآیند خشک کردن پاششی عمل می کند، بلکه می تواند محدودیت های ذاتی این روش از جمله چسبندگی و تجمع ذرات را تا حد زیادی برطرف نماید. به طور کلی، یافته های این تحقیق نشان می دهند که استفاده از امواج فراصوت پیش از خشک کردن، یک راهکار کارآمد برای افزایش راندمان تولید پودر پروتئین آب پنیر است. این امر از دیدگاه صنعتی حائز اهمیت بوده و می تواند علاوه بر کاهش ضایعات و هزینه های تولید، امکان بهره برداری اقتصادی تر از پروتئین های با ارزش تغذیه ای آب پنیر را فراهم سازد.

مطالعه ای در حوزه مسیل کازئین نشان داد که امواج فراصوت قبل از خشک کن پاششی باعث بهبود جریان پذیری پودر و رفتار جذب رطوبت آن می شود (Song et al., 2022). مقایسه تجاری بین خشک کن پاششی و انجمادی برای کنسانتره پروتئینی آب پنیر توسط هس و همکاران (Haas et al., 2024) انجام شد که تفاوت

معنی‌داری در حفظ پروتئین‌های زیست فعال بین دو روش وجود نداشت. همچنین خشک‌کن انجمادی در شرایط پس از چند مرحله پاستوریزاسیون، مزیت قابل‌توجهی بر خشک‌کن پاششی نداشت (Haas et al., 2024).

حلالیت در آب پروتئین

جدول ۲ مقادیر حلالیت پودر پروتئین آب‌پنیر تحت شرایط مختلف تیمار امواج فراصوت و دو روش خشک‌کردن پاششی و انجمادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال پیش‌تیمار فراصوت اثر معنی‌داری بر افزایش حلالیت داشته است ($p < 0.05$). در نمونه شاهد که تنها با روش خشک‌کردن پاششی بدون تیمار امواج فراصوت تهیه شد، حلالیت ۸۳/۲۲٪ اندازه‌گیری شد که به‌طور معناداری پایین‌تر از سایر تیمارها بود. در حالی که در روش خشک‌کردن انجمادی، میزان حلالیت به ۹۰/۶۸٪ رسید که نسبت به شاهد افزایش داشت، اما همچنان کمتر از تیمارهای امواج فراصوت بود. با افزایش توان و زمان فراصوت، روندی صعودی در حلالیت پروتئین‌ها مشاهده شد. در توان ۱۰۰ وات و زمان ۵ دقیقه، مقدار حلالیت ۹۲/۱۷٪ به‌دست آمد، در حالی که در توان ۳۰۰ وات و زمان ۱۵ دقیقه، این مقدار به ۹۸/۰۵٪ افزایش یافت. بیشترین مقدار حلالیت نیز در توان ۳۰۰ وات و زمان ۲۵ دقیقه ثبت شد (۹۸/۱۱٪). از نظر آماری، این تیمار با تیمار ران ۶ (توان ۳۰۰ وات و زمان ۱۵ دقیقه) در یک گروه قرار گرفت و اختلاف معنی‌داری نشان نداد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال فراصوت با شدت بالا و زمان متوسط تا طولانی می‌تواند حلالیت پروتئین وی را به حداکثر برساند، اما افزایش بیشتر زمان پس از نقطه بهینه، اثر افزایشی محسوسی نخواهد داشت. امواج امواج فراصوت منجر به تشکیل و انفجار حباب‌های میکروسکوپی در محلول می‌شوند که اثرات مکانیکی و حرارتی شدیدی ایجاد کرده و موجب باز شدن ساختارهای دوم و سوم پروتئین‌ها، آشکار شدن گروه‌های آب‌دوست و در نتیجه افزایش برهم‌کنش پروتئین‌ها با مولکول‌های آب می‌گردد. همچنین، فراصوت باعث کاهش تجمعات پروتئینی و توزیع یکنواخت‌تر ذرات شده که در نهایت حلالیت را بهبود می‌بخشد.

مطالعات پیشین نیز یافته‌های حاضر را تأیید می‌کنند. در مطالعه کلاسیک ماوروپولو و کسکوسکی (Mavropoulou, & Kosikowski, 1973) حلالیت پروتئین‌های وی در محدوده ۹۱/۴ تا ۹۹/۷٪ گزارش شد که با مقادیر به‌دست‌آمده در این تحقیق مطابقت دارد. در پژوهشی جدیدتر، التایبانی و همکاران (Al-Thaibani et al., 2024) بر روی پروتئین شیر شتر نشان دادند که تیمار امواج فراصوت به‌مدت ۱۵ دقیقه موجب افزایش حلالیت تا ۱۰۰٪ شد، در

حالی که نمونه خشک‌شده با خشک‌کن پاششی در دمای بالا (۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) تنها حلالیت ۹۲/۷٪ داشت. این نتایج بیانگر اثر مثبت امواج فراصوت بر ساختارپذیری پروتئین‌ها و کاهش حساسیت آن‌ها به فرآیند خشک کردن است. همچنین، مینج و اناند (Minj, & Anand, 2022) و جین و همکاران (Jin et al., 2022) گزارش کردند که اعمال امواج فراصوت علاوه بر افزایش بازده فرآیند خشک‌کن پاششی، موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی پودرهای پروتئینی شامل جریان‌پذیری، حلالیت و پایداری امولسیون می‌شود. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق در کنار شواهد علمی موجود نشان می‌دهد که امواج فراصوت پیش از خشک‌کن پاششی نه تنها بازده تولید را افزایش می‌دهد بلکه نقش مهمی در افزایش حلالیت پروتئین آب پنیر دارد. در حالی که روش خشک‌کردن انجمادی علی‌رغم حفظ نسبی ساختار پروتئین‌ها، حلالیت کمتری نشان داد (حدود ۹۰/۶۸٪)، اعمال امواج فراصوت موجب ارتقای این ویژگی تا مقادیر نزدیک به ۹۸٪ گردید.

ظرفیت جذب چربی

ظرفیت جذب چربی به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کلیدی عملکردی پروتئین‌های شیر، توانایی پروتئین را در برهم‌کنش با ترکیبات چربی و نگهداری روغن در ماتریس پودری نشان می‌دهد. همان‌طور که در **جدول ۲** مشاهده می‌شود، ظرفیت جذب چربی نمونه‌های تیمار شده با امواج فراصوت و خشک‌کن پاششی (۱۱۹/۸ تا ۱۲۹/۸٪) به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) پایین‌تر از نمونه‌های شاهد خشک شده به روش پاششی (۱۵۶٪) و انجمادی (۱۶۱/۲٪) بوده است. این کاهش ظرفیت در تیمارهای امواج فراصوت را می‌توان به تغییرات ساختاری پروتئین نسبت داد. امواج فراصوت با پدیده‌های کاویتاسیون، برشی و تولید رادیکال‌های آزاد سبب بازآرایی و دناتوراسیون جزئی پروتئین‌ها می‌شوند (Chandrapala, Zisu, Kenari, & Razavi, Kentish, & Ashokkumar, 2012). چنین تغییراتی معمولاً باعث بازشدگی بخشی از ساختار سوم پروتئین و برون‌نمایی گروه‌های قطبی می‌شود که منجر به کاهش در دسترس بودن گروه‌های آب‌گریز برای برهم‌کنش با مولکول‌های چربی می‌گردد (Jambrak et al., 2014). به همین دلیل در تیمارهای ۵ دقیقه‌ای، ظرفیت جذب چربی در کمترین مقدار (۱۱۹/۸-۱۲۳٪) قرار گرفت. با افزایش زمان تیمار به ۱۵ و ۲۵ دقیقه، افزایش نسبی در ظرفیت جذب چربی مشاهده شد (تا ۱۲۹/۸٪). این روند می‌تواند ناشی از دو پدیده متضاد باشد: از یک‌سو، افزایش زمان تیمار امواج فراصوت می‌تواند بازشدگی بیشتری در ساختار پروتئین و آشکار شدن بخش‌هایی از نواحی هیدروفوبیک را به همراه داشته باشد که موجب افزایش جذب چربی می‌شود؛ از سوی دیگر، اعمال بیش از حد

انرژی فراصوت می تواند منجر به تجمع و بازآرایی دوباره پروتئین ها و در نتیجه محدود شدن دسترسی گروه های هیدروفوبیک گردد. در نتایج حاضر، به نظر می رسد اثر غالب در زمان های بالاتر، همان باززدگی و افزایش سطح تماس پروتئین با روغن بوده است. در نمونه انجمادی، فرآیند خشک کردن در دمای پایین و بدون تنش حرارتی شدید انجام می شود، لذا ساختار پروتئین ها تقریباً دست نخورده باقی می ماند و گروه های هیدروفوبیک بیشتری برای برهم کنش با روغن در دسترس قرار دارند (O'Callaghan, & Hogan, 2013). در خشک کن پاششی اگرچه دمای بالا می تواند تا حدی دناتوراسیون ایجاد کند، اما ایجاد ذرات متخلخل تر نسبت به بکار گیری پیش تیمار فراصوت و سپس خشک کردن پاششی، به حفظ ظرفیت جذب چربی بیشتر کمک می کند (Schmitz-Schug, Kulozik, & Foerst, 2016). مطالعات مشابه نیز نتایج حاضر را تأیید می کنند. مقصود و همکاران (Maqsood et al., 2019) گزارش کردند که کاربرد امواج فراصوت قبل از خشک کن پاششی در پروتئین آب پنیر شتر، موجب کاهش معنی دار ظرفیت جذب چربی (۱۱۹-۱۲۵٪) در مقایسه با نمونه های شاهد خشک کن پاششی (۱۵۳-۱۶۰٪) و انجمادی (۱۶۱٪) می شود (Maqsood et al., 2019). همچنین چاندراپالا و همکاران (Chandrapala et al., 2012) و جامبارک (Jambrak et al.,)

(2014) اثر مشابهی را در پروتئین های شیر گزارش کردند که نشان دهنده کاهش توانایی نگهداری روغن به دلیل تغییرات ساختاری ناشی از کاویتاسیون فراصوت است. سونگ و همکاران (Song et al., 2022) در مطالعه ای بررسی نمودند که پیش تیمار فراصوت باعث بهبود قابل توجهی در ویژگی های جریان پذیری پودر و جذب رطوبت کنسانتره میسل کازئین می شود. با افزایش شدت انرژی امواج فراصوت، میانگین اندازه ذرات پودر (D_{50}) افزایش و چربی سطح کاهش یافت و افزایش آبدوستی سطحی مشاهده شد؛ همه این عوامل اثرات بهبوددهنده ای بر خصوصیات عملکردی پودر دارند. در پژوهش دیگر ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) نشان دادند که با افزایش زمان پیش تیمار فراصوت، ویژگی هایی نظیر حلالیت، خواص امولسیون و ساختار ثانویه کنسانتره میسل کازئین به طور معنی داری بهبود یافت. همچنین، افزایش هیدروفوبیسیتة سطح و کاهش اندازه ذرات تأیید شد. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت که فرآیند امواج فراصوت پیش از خشک کن پاششی ظرفیت جذب چربی پودر پروتئین آب پنیر را کاهش می دهد، اما با افزایش زمان تیمار تا حدودی این ویژگی بهبود می یابد. بالاتر بودن ظرفیت جذب چربی در نمونه انجمادی نیز نشان دهنده مزیت این روش در حفظ ویژگی های عملکردی پروتئین است.

جدول ۲- مقادیر بازده تولید پودر پروتئین آب پنیر (%، حلالیت در آب (% و ظرفیت جذب چربی (%)

Table 2- Values of Whey Protein powder yield (%), water solubility (%), and oil absorption capacity (%)

اجرا	توان	زمان	بازده تولید	حلالیت در آب	ظرفیت جذب چربی
Run	Power (wat)	Time (min)	Product Yield (%)	Water solubility (%)	Oil absorption capacity (%)
1	100	5	53.17 ^h	92.17 ^g	119.80 ^h
2	200	5	58.69 ^f	93.37 ^f	121.50 ^g
3	300	5	64.92 ^d	94.25 ^e	123.00 ^f
4	100	15	57.88 ^g	95.19 ^d	124.20 ^e
5	200	15	63.19 ^e	96.44 ^c	124.70 ^e
6	300	15	66.66 ^c	98.05 ^a	127.10 ^d
7	100	25	63.47 ^e	96.48 ^c	127.30 ^d
8	200	25	68.93 ^b	97.53 ^b	129.00 ^c
9	300	25	72.27 ^a	98.11 ^a	129.80 ^c

* حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار بین نمونه ها می باشد (p<0.05)

(p<0.05) *Different letters the indicator Significant difference It is between samples

معادله نهایی حاصل از برازش مدل خطی به صورت زیر ارائه شد:

$$+63.24 + 4.89 * A + 4.65 * B$$

این معادله نشان می دهد که هم توان و هم زمان تیمار امواج فراصوت به صورت خطی و مثبت بر بازده خشک کردن اثرگذارند. به عبارت دیگر، با افزایش هر یک از این عوامل، بازده خشک کردن به شکل معنی داری افزایش می یابد. ضریب رگرسیون مربوط به توان (۴/۸۹) کمی بزرگتر از زمان (۴/۶۵) است، بنابراین می توان گفت

بهینه سازی و تعیین فرمولاسیون بهینه

بازده خشک کردن

به منظور بررسی اثر فاکتورهای توان فراصوت (P, Watt) و زمان تیمار (T, min) بر بازده خشک کردن، مدل های مختلف ریاضی شامل خطی (Linear)، دو فاکتور تعاملی (2FI)، درجه دوم (Quadratic) و مکعبی (Cubic) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل خطی (Linear) با توجه به مقادیر آماره های F و P، بهترین برازش را برای توصیف تغییرات بازده خشک کردن دارد.

افزایش توان اثر بیشتری بر بازده خشک کردن نسبت به افزایش زمان دارد.

به طور کلی، تحلیل‌ها نشان دادند که مدل خطی ساده‌ترین و در عین حال قوی‌ترین مدل برای پیش‌بینی بازده خشک کردن در شرایط این مطالعه است و می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای بهینه‌سازی شرایط فرآیند استفاده شود. این نتایج با مطالعات مشابهی که نشان داده‌اند افزایش توان و زمان تیمار امواج فراصوت سبب بهبود انتقال جرم و افزایش راندمان خشک کردن می‌شود، هم‌راستا است.

حلالیت در آب

نتایج نشان داد که مدل Quadratic بهترین برازش را برای پیش‌بینی تغییرات حلالیت دارد. معادله نهایی برازش مدل درجه دوم به صورت زیر است:

$$\text{Solubility} = +96.61 + 1.10 \cdot A + 2.05 \cdot B - 0.11 \cdot A \cdot B - 0.072 \cdot A^2 - 1.24 \cdot B^2$$

این معادله نشان می‌دهد که در شرایط پایه، مقدار حلالیت ۹۶/۶۱ درصد است. افزایش توان (A) و زمان (B) هر دو به طور مستقیم باعث افزایش حلالیت می‌شوند، اما اثر زمان (ضریب ۲/۰۵) بیش از توان (ضریب ۱/۱۰) است. با این حال، جمله‌های درجه دوم به‌ویژه $-1.24B^2$ - نشان می‌دهند که تیمار بیش از حد طولانی می‌تواند موجب کاهش حلالیت شود. این رفتار به دلیل تغییر ساختاری در پروتئین‌ها و احتمال دناتوراسیون یا تجمع پروتئینی در زمان‌های طولانی‌تر قابل توضیح است. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که تیمار فراصوت در بازه بهینه توان و زمان باعث افزایش معنی‌دار حلالیت پروتئین آب‌پنیر می‌شود. اما افزایش بیش از حد زمان به دلیل اثر منفی درجه دوم، می‌تواند موجب افت حلالیت گردد. بنابراین، انتخاب شرایط بهینه (توان متوسط و زمان کنترل‌شده) اهمیت زیادی در دستیابی به بیشترین حلالیت دارد.

ظرفیت جذب چربی

نتایج نشان داد که مدل خطی (Linear) بهترین برازش را دارد. معادله نهایی مدل خطی برازش‌شده برای پیش‌بینی ظرفیت جذب چربی به صورت زیر است:

$$\text{FAC} = +125.16 + 1.43 \cdot A + 3.63 \cdot B$$

این معادله نشان می‌دهد که مقدار پایه ظرفیت جذب چربی (در شرایط بدون تیمار) حدود ۱۲۵/۱۶ درصد است. هر واحد افزایش در توان، به طور متوسط ۱/۴۳ درصد و هر واحد افزایش در زمان، به طور متوسط ۳/۶۳ درصد باعث افزایش ظرفیت جذب چربی می‌شود. بنابراین زمان تیمار نسبت به توان، اثر قوی‌تری بر افزایش این ویژگی

دارد. از دیدگاه فیزیکوشیمیایی، افزایش ظرفیت جذب چربی پس از تیمار فراصوت را می‌توان به تغییرات ساختاری پروتئین‌ها نسبت داد. امواج فراصوت از طریق پدیده کاویتاسیون موجب باز شدن ساختار سوم و چهارم پروتئین، آشکارسازی گروه‌های هیدروفوب و افزایش سطح تماس پروتئین با چربی‌ها می‌شوند. در زمان‌های طولانی‌تر، این تغییرات ساختاری بیشتر تقویت می‌گردد و ظرفیت پروتئین برای برهم‌کنش با لیپیدها افزایش می‌یابد.

به طور کلی، نتایج به‌روشنی بیانگر آن است که تیمار فراصوت با افزایش زمان و توان (به‌ویژه زمان) می‌تواند ظرفیت جذب چربی پروتئین آب‌پنیر را به شکل معنی‌داری ارتقا دهد. این ویژگی از دیدگاه کاربردی اهمیت زیادی دارد، زیرا افزایش ظرفیت جذب چربی موجب بهبود بافت، طعم و خواص عملکردی پروتئین‌ها در محصولات غذایی غنی‌شده با چربی می‌شود.

انتخاب شرایط بهینه

در جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی شرایط تیمار فراصوت برای دستیابی به بیشترین بازده خشک کردن، حلالیت و ظرفیت جذب چربی ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس تابع مطلوبیت (Desirability) ترکیبی اجرا شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه شماره ۱ با توان ۲۷۳/۴۷ وات و زمان ۲۴/۸۸ دقیقه به عنوان شرایط بهینه انتخاب گردید. این شرایط سبب دستیابی به بازده خشک کردن ۷۱/۴۲٪، حلالیت بسیار بالا (۹۸/۱۱٪) و ظرفیت جذب چربی ۱۲۹/۸٪ گردید و بالاترین مقدار مطلوبیت (۰/۹۵۶) را در بین گزینه‌ها نشان داد. سایر نمونه‌ها نیز مقادیر نسبتاً بالایی داشتند، اما مطلوبیت آن‌ها پایین‌تر از نمونه منتخب بود. این نتایج نشان می‌دهد که با انتخاب شرایط بهینه توان و زمان تیمار فراصوت می‌توان به طور هم‌زمان چندین ویژگی عملکردی مهم پروتئین آب‌پنیر (بازده، حلالیت و ظرفیت جذب چربی) را در سطح مطلوب ارتقا داد. بنابراین توان ۲۷۳/۵ وات و زمان ۲۵ دقیقه به عنوان شرایط بهینه برای پیش تیمار فراصوت در نظر گرفته شد و سایر آزمون‌ها بر روی این نمونه انجام شد.

شاخص فعالیت امولسیون

شاخص فعالیت امولسیونی پودر پروتئین آب‌پنیر به طور معنی‌داری تحت تأثیر پیش تیمار فراصوت و روش خشک کردن قرار گرفت. بالاترین مقدار این شاخص در نمونه بهینه (فراصوت + خشک کن پاششی) به میزان ۱۲۷/۵ m^2/g به دست آمد، در حالی که نمونه کنترل خشک کن پاششی (SPRY) مقدار ۸۴/۷ m^2/g و نمونه کنترل خشک کن انجمادی (FRZD) کمترین فعالیت امولسیونی

۷۱/۲m²/g را نشان داد، که هر سه مقدار با هم اختلاف معنی داری نشان دادند. بهبود قابل توجه شاخص فعالیت امولسیون در نمونه بهینه را می توان به تغییرات ساختاری ناشی از پیش تیمار فراصوت نسبت داد. مطالعات متعدد نشان داده اند که فراصوت با شدت بالا

(HIU) قادر است تجمعات پروتئینی را تخریب کرده، ساختارهای فشرده را باز کند و گروه های هیدروفوبیک و واکنش پذیر بیشتری را در سطح پروتئین آشکار سازد.

جدول ۳- شرایط بهینه فرآیند تولید پودر پروتئین آب پنیر با پیش تیمار فراصوت

Table 3- Optimal process conditions for whey protein powder production using ultrasound pretreatment

شماره Number	توان Power (wat)	زمان Time (min)	بازده خشک کردن Drying efficiency (%)	حلالیت در آب Solubility in water (%)	ظرفیت جذب چربی Fat absorption capacity (%)	مطلوبیت Desirability
1	273.47	24.88	71.4283	98.11	129.8	0.95
2	270.48	24.22	70.97295	97.25	129.5155	0.93
3	300	18.07	69.55589	98.02	127.703	0.85
4	290.91	18.83	69.46757	96.25	127.851	0.85
5	287.42	19.17	69.4526	94.12	127.9225	0.85

این تغییرات سبب افزایش تمایل پروتئین ها به جذب در بین فاز روغن و آب و در نتیجه بهبود پایداری امولسیون می شوند (Shen, Albano, & Nicoletti, 2018; Fang, Gao, & Guo, 2017). در همین راستا، مقادیر شاخص فعالیت امولسیونی گزارش شده برای پروتئین های آب پنیر تیمار شده با فراصوت در دامنه ۹۰ تا ۱۳۰ m²/g قرار دارد که با نتایج حاضر مطابقت کامل دارد (Bulut, 2022). کاهش نسبی شاخص فعالیت امولسیونی در نمونه کنترل خشک کن پاششی نسبت به بهینه نشان می دهد که خشک کردن پاششی بدون اعمال پیش تیمار فراصوت قادر به حفظ کامل عملکرد امولسیونی پروتئین ها نیست. یافته های مشابه در پژوهش های پیشین نیز نشان داده اند که نمونه های خشک شده به روش انجمادی نسبت به نمونه های خشک شده پاششی، ویژگی های امولسیونی و کف کنندگی ضعیف تری دارند (Cais-Sokolińska, Zhao et al., 2013; Teichert, & Gawalek, 2023). به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب پیش تیمار فراصوت و خشک کن پاششی بهترین شرایط را برای بهبود فعالیت امولسیونی پروتئین آب پنیر فراهم می کند.

ظرفیت کف کنندگی

بیشترین ظرفیت کف کنندگی در نمونه بهینه با مقدار ۱۳۳/۵۱ % به دست آمد. این مقدار به طور معنی داری بالاتر از نمونه (۹۷/۴۴ %) کنترل خشک کن پاششی و نمونه (۸۲/۱۹ %) کنترل خشک کن انجمادی بود. افزایش قابل توجه ظرفیت کف کنندگی در نمونه بهینه را می توان ناشی از اثرات پیش تیمار فراصوت دانست. اعمال امواج

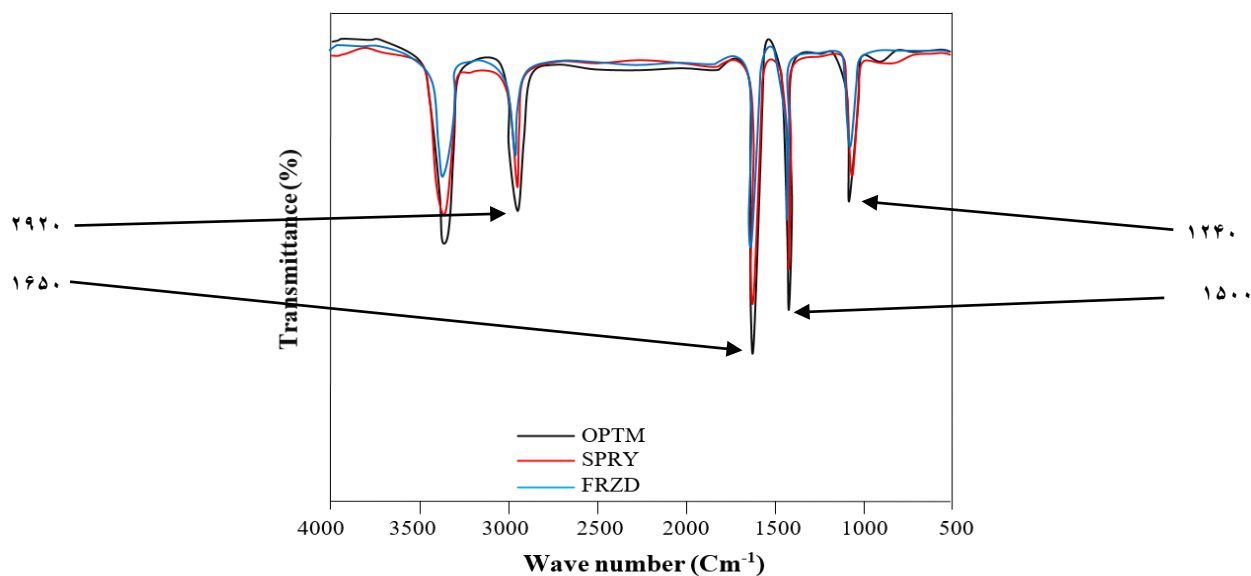
فراصوت با توان بالا منجر به ایجاد کایتاسیون، شکستن تجمعات پروتئینی و باز شدن ساختارهای فشرده می شود. این تغییرات باعث آشکار شدن گروه های هیدروفوبیک و باردار پروتئین و در نتیجه افزایش حلالیت و توانایی جذب سریع در سطح حباب های هوا می گردد. این موضوع منجر به تشکیل فیلم های پروتئینی پایدارتر در اطراف حباب ها و افزایش ظرفیت کف کنندگی می شود. نتایج مشابهی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است؛ به طوری که جامبارک و همکاران (Jambrak et al., 2014) نشان دادند که تیمار فراصوت ظرفیت کف کنندگی پروتئین های آب پنیر را ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش می دهد. مقادیر به دست آمده در این پژوهش با بازه گزارش شده (حدود ۸۰-۱۰۰ %) برای نمونه های مشابه همخوانی دارد (Zhao et al., 2013). مطالعات پیشین گزارش کردند که نمونه های خشک شده به روش انجمادی معمولاً ظرفیت کف کنندگی پایین تری نسبت به نمونه های خشک شده پاششی دارند (Rajam, & Anandharamakrishnan, 2015; Haas et al., 2024). در مجموع، نتایج نشان داد که ترکیب پیش تیمار فراصوت و خشک کن پاششی، بهترین شرایط را برای ارتقای ظرفیت کف کنندگی پودر پروتئین آب پنیر فراهم می کند.

ساختار مادون قرمز فوریه

طیف FTIR نمونه های پودر پروتئین آب پنیر (بهینه، کنترل خشک کن پاششی و کنترل خشک کن انجمادی) در محدوده ۴۰۰۰ تا ۴۰۰ cm⁻¹ در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود الگوی کلی جذب در همه نمونه ها مشابه است، که

در اثر باز شدن ساختار پروتئین‌ها است. علاوه بر این، پیک Amide III در محدوده 1240 cm^{-1} مشاهده شد که مرتبط با ارتعاشات ترکیبی C-N و N-H است. شدت این پیک نیز در نمونه بهینه بیشتر از دو نمونه دیگر بود. در مقابل، در نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی شدت جذب در این محدوده‌ها کاهش یافته بود که احتمالاً به دلیل تشکیل ساختارهای تجمع‌ی و کاهش تحرک گروه‌های عاملی رخ داده است. نتایج این مطالعه با یافته‌های الشمسی و همکاران (Al-Maqsood et al., 2018) و مقصود و همکاران (Shamsi et al., 2018) همخوانی دارد که گزارش کرده‌اند تیمار فراصوت با افزایش برهم‌کنش‌های غیراشتراکی و کاهش تجمعات پروتئینی منجر به افزایش شدت پیک‌های FTIR در محدوده‌های مرتبط با گروه‌های عاملی می‌شود. همچنین، خشک‌کن پاششی در مقایسه با خشک‌کن انجمادی به دلیل نرخ بالای خشک شدن، منجر به ساختارهای متخلخل‌تر و در نتیجه افزایش شدت پیک‌های مرتبط با گروه‌های عاملی شده است (Chen et al., 2021). به‌طور کلی، اگرچه موقعیت پیک‌ها در نمونه‌ها مشابه بود، اما تغییرات در شدت آن‌ها نشان داد که نوع فرآیند (فراصوت و نوع خشک‌کن) بر دسترسی و برهم‌کنش گروه‌های عاملی پروتئین‌ها اثرگذار است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌تیمار فراصوت به همراه خشک‌کن پاششی در مقایسه با سایر تیمارها بیشترین تغییرات مطلوب را در ساختار پروتئین آب‌پنیر ایجاد کرده است.

بیانگر عدم تغییر اساسی در ساختار اولیه پروتئین‌ها در اثر فرآیندهای اعمال‌شده است. با این حال، شدت جذب در برخی پیک‌های مشخص تفاوت معناداری داشت. پیک جذب پهن در حوالی $3300\text{--}3270\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H و N-H است (Tavares, & Noreña, 2019). در نمونه بهینه (فراصوت+خشک‌کن پاششی) شدت این پیک بالاتر بود که می‌تواند ناشی از باز شدن زنجیره‌های پروتئینی و افزایش در دسترس بودن گروه‌های هیدروژنی برای برقراری پیوندهای هیدروژنی باشد. نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی (خشک‌کن انجمادی) کمترین شدت را در این محدوده نشان داد که می‌تواند ناشی از باقی ماندن تجمعات پروتئینی و دسترسی کمتر گروه‌های عاملی باشد. در محدوده 2920 cm^{-1} پیک ضعیفی مشاهده شد که مربوط به ارتعاشات کششی C-H است و در تمام نمونه‌ها وجود داشت، اما شدت آن در بهینه کمی بالاتر از سایرین بود. مهم‌ترین پیک‌ها در محدوده Amide I ($1600\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$) و ($1500\text{--}1560\text{ cm}^{-1}$) مشاهده شدند. پیک Amide I در حوالی 1650 cm^{-1} به ارتعاشات کششی C=O مربوط است و شاخص مناسبی برای ارزیابی ساختار ثانویه پروتئین‌ها محسوب می‌شود (Andrade et al., 2019). شدت این پیک در بهینه بیشترین مقدار را داشت و نشان‌دهنده تغییر در نظم ساختاری و افزایش در دسترس بودن گروه‌های کربونیل پس از تیمار فراصوت بود. پیک Amide II در حوالی 1540 cm^{-1} نیز شدت بیشتری در بهینه داشت و بیانگر افزایش ارتعاش خمشی N-H و کششی C-N



شکل ۱- طیف تبدیل فوریه مادون قرمز نمونه‌های پودر پروتئین آب پنیر

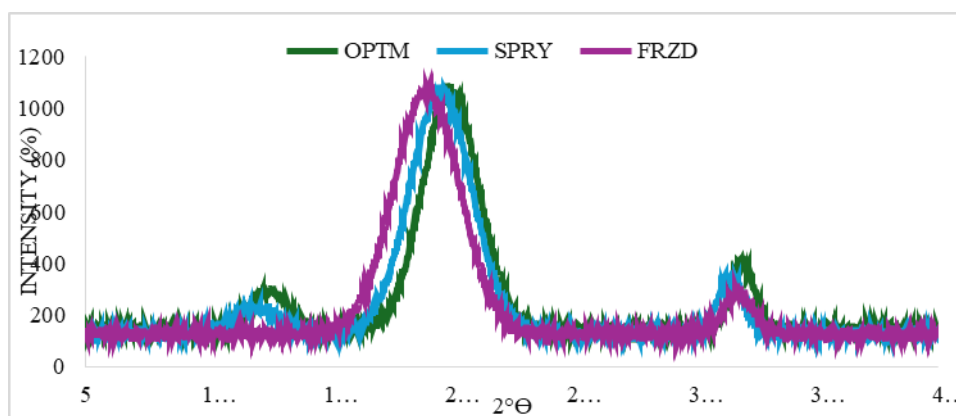
Fig. 1. FTIR Spectra of whey protein powder samples

ساختار کریستالی پراش پرتو ایکس

الگوهای پراش پرتو ایکس در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود که هر سه نمونه (بهینه، کنترل خشک کن پاششی و کنترل خشک کن انجمادی) دارای یک پهلوی پراش عریض در محدوده $2\theta \approx 19-20$ درجه هستند که معرف ساختار آمورف یا شبه آمورف پروتئین آب پنیر است. وجود این پهلوی به جای پیک های باریک و تیز بیانگر عدم شکل گیری ساختار بلوری منظم و غالب بودن فاز آمورف در تمامی نمونه ها می باشد. با این حال مقایسه شدت و پهنای پیک ها بین نمونه ها تفاوت هایی را نشان داد، نمونه بهینه (فراصوت + خشک کن پاششی): نسبت به سایر نمونه ها شدت پراش در پیک اصلی کمی بالاتر و پهنای آن اندکی کمتر بود. این موضوع نشان دهنده آن است که تیمار فراصوت موجب تغییر در آرایش مولکولی پروتئین ها و کاهش بخشی از بی نظمی ساختاری شده و در نتیجه ساختار آمورف متراکم تری شکل گرفته است.

به طور کلی، نتایج XRD بیانگر آن است که تیمار فراصوت پیش از خشک کردن پاششی سبب کاهش نسبی بی نظمی و افزایش تراکم ساختار آمورف می شود، در حالی که در روش های بدون فراصوت (چه پاششی و چه انجمادی) تغییرات قابل توجهی در ساختار مولکولی

مشاهده نشد. این یافته ها نشان می دهد فراصوت می تواند نقش مؤثری در بهبود ویژگی های ساختاری و احتمالاً عملکردی پودر آب پنیر ایفا کند. حاوی و رز (Haque, & Roos, 2005) مطالعه ای انجام دادند و نشان دادند که در مخلوط های لاکتوز/پروتئین آب پنیر، حضور پروتئین وظیفه کند کردن کریستالی شدن لاکتوز را دارد. همچنین، نرخ کریستالیزاسیون در نمونه های خشک شده پاششی بیشتر از خشک شده انجمادی است، و با افزایش نسبت پروتئین کریستالیزاسیون کاهش می یابد. مطابق با نتایج پژوهش حاضر در نمونه های کنترل خشک کن پاششی و بهینه، وجود پروتئین و اثر تیمار فراصوت ممکن است مانع از کریستالیزاسیون واضح لاکتوز شده و فاز آمورف را حفظ کرده باشد (Haque et al., 2005). مطالعات نشان داده اند که تیمار فراصوت و خشک کن پاششی موجب افزایش آمورفیت و کاهش نظم کریستالی در پروتئین های آب پنیر می شود. این یافته ها کاملاً با نتایج XRD پژوهش حاضر هم خوانی دارند و نشان می دهند که تغییرات مشاهده شده در الگوی پراش، ناشی از اصلاح ساختار فوق مولکولی پروتئین بدون تخریب ساختار اولیه است (Zhang et al., 2020; Haas et Al-Thaibani et al., 2024; al., 2024; Ledari et al., 2024; Jin et al., 2022).



شکل ۲- الگوی پراش کریستالی پراش پرتو ایکس نمونه های پودر پروتئین آب پنیر
Fig. 2. X-ray diffraction (XRD) pattern of whey protein powder samples

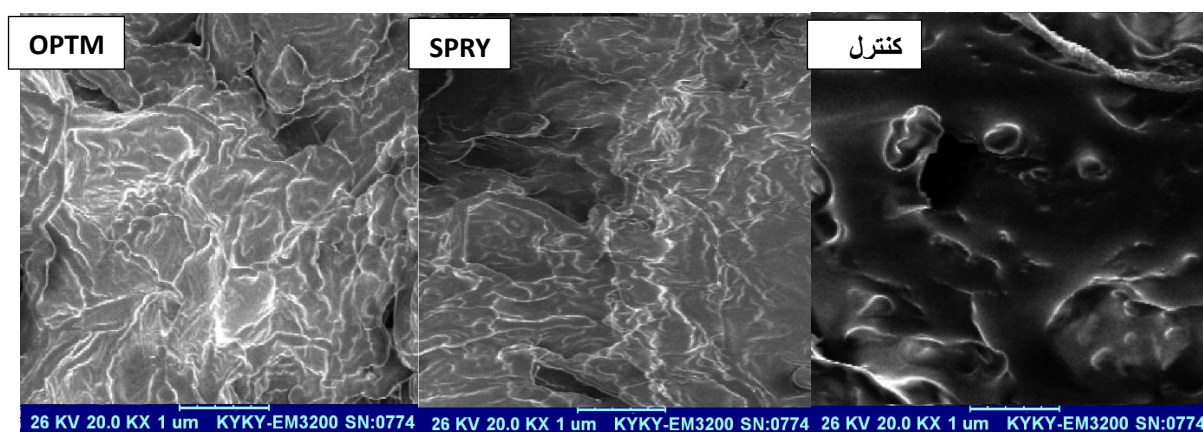
ریز ساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورفولوژی سطحی نمونه های پودر آب پنیر تهیه شده تحت شرایط مختلف فرآیند را نشان می دهند (شکل ۳). تفاوت های آشکاری در ساختار سطحی بین سه تیمار مشاهده شد. سطح ذرات در نمونه بهینه (فراصوت + خشک کن پاششی) نسبتاً صاف و یکنواخت بوده و حفره های ریز و فرورفتگی های منظم مشاهده می شود. اعمال پیش تیمار فراصوت پیش از خشک کردن پاششی احتمالاً موجب کاهش تجمع

پروتئینی، تجزیه ساختارهای بزرگ تر به ذرات ریز تر و در نهایت ایجاد سطحی همگن تر شده است. این نتایج همسو با گزارش های پیشین است که نشان داده اند فراصوت می تواند با القای برهم کنش تجمع پروتئین، یکنواختی ساختاری را بهبود بخشد و ذرات متراکم تر ایجاد کند. سطح ذرات در نمونه کنترل خشک کن پاششی (خشک کن پاششی بدون فراصوت) ناهموار و چروکیده بوده و خطوط یا لایه های موازی مشخصی قابل مشاهده است. چنین مورفولوژی ای ناشی از خشک شدن سریع در فرآیند پاششی بدون اعمال تغییرات ساختاری

ضعیف‌تر است. به‌طور کلی، تصاویر SEM نشان دادند که پیش‌تیمار فراصوت در نمونه بهینه منجر به اصلاح ریزساختار سطحی، ایجاد ذرات یکنواخت‌تر و کاهش بی‌نظمی‌های مورفولوژیک شده است. این تغییرات با نتایج حاصل از الگوهای XRD مطابقت دارد و نقش فراصوت را در بهبود ساختار و پایداری پودر آب‌پنیر تأیید می‌کند. این نتایج با آنچه در پژوهش‌های پیشین انجام شده است مطابقت دارد (Sarabandi et al.; Jin et al., 2022; Khaire, & Gogate, 2021; al., 2022).

پیشین بوده و بیانگر باقی‌ماندن بخشی از تجمعات پروتئینی و بی‌نظمی بالاتر در سطح ذرات است. وجود این ناهموازی‌ها می‌تواند بر خواص عملکردی نظیر انحلال‌پذیری اثر منفی بگذارد. ساختار ذرات در نمونه کنترل خشک‌کن انجمادی (خشک‌کن انجمادی بدون فراصوت) متخلخل و پوسته‌مانند بوده و لایه‌های نازک و توده‌ای به وضوح مشاهده می‌شوند. این ویژگی‌ها نتیجه رشد کریستال‌های یخ در طول فرآیند انجماد و حذف تدریجی آب طی خشک‌کردن می‌باشند. چنین ساختاری اگرچه موجب افزایش سطح ویژه ذرات می‌شود، اما از نظر تراکم و یکپارچگی در مقایسه با نمونه‌های پاششی



شکل ۳- ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های پودر پروتئین آب‌پنیر

Fig. 3. Microstructure of whey protein powder samples observed by scanning electron microscopy (SEM)

به‌طور کلی، روند تغییرات به‌خوبی بیانگر اثر مثبت تیمار فراصوت در افزایش بار سطحی و پایداری کلئیدی و اثر منفی نسبی خشک‌کردن انجمادی در مقایسه با خشک‌کردن پاششی است. این یافته‌ها با نتایج بخش‌های مربوط به ظرفیت کف‌کنندگی و شاخص فعالیت امولسیون نیز هم‌راستا هستند، زیرا هر دو ویژگی به‌طور مستقیم به میزان بار سطحی و دافعه بین‌ذره‌ای مرتبط‌اند (Zhang et O'Sullivan, Arellano, Pichot, & Norton, 2014; al., 2020).

اندازه ذرات

اندازه ذرات نمونه‌های مختلف پودر پروتئین آب‌پنیر به‌ترتیب ۱۷۶/۲ نانومتر بهینه، ۲۹۳/۷ نانومتر کنترل خشک‌کن پاششی و ۴۱۲/۶ نانومتر کنترل خشک‌کن انجمادی به‌دست آمد که با هم اختلاف معنی‌داری داشتند. به‌طور کلی، کاهش اندازه ذرات به‌عنوان یک شاخص کلیدی در بهبود ویژگی‌های عملکردی پروتئین‌ها به شمار می‌رود؛ زیرا ذرات کوچک‌تر سطح تماس بالاتری دارند که می‌تواند بر ویژگی‌های امولسیونی و کف‌کنندگی اثر مثبت بگذارد (Razavi et al., 2020). نتایج نشان داد که تیمار فراصوت در نمونه

پتانسیل زتا

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر پتانسیل زتا برای نمونه‌های مختلف پودر پروتئین آب‌پنیر شامل بهینه (۲۸/۷۲- میلی ولت)، کنترل خشک‌کن پاششی (۲۰/۳۹- میلی‌ولت)، و کنترل خشک‌کن انجمادی (۱۷/۴۳- میلی‌ولت) بود. به‌طور کلی، هر چه مقدار پتانسیل زتا از نظر عددی منفی‌تر باشد، نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات افزایش یافته و پایداری کلئیدی سیستم بیشتر می‌شود (McClements, McClements, Bai, & Chung, 2017; 2021). نتایج نشان داد که نمونه بهینه (پیش‌تیمار فراصوت + خشک‌کن پاششی) دارای بیشترین قدر مطلق پتانسیل زتا بود. این موضوع حاکی از آن است که اعمال فراصوت موجب بازآرایی ساختار پروتئین‌های آب‌پنیر، افزایش گروه‌های باردار در سطح و در نتیجه بهبود پایداری کلئیدی شده است. مطالعات پیشین نیز تأیید کرده‌اند که تیمار فراصوت سبب افزایش بار سطحی و کاهش تجمع پروتئین‌های آب‌پنیر می‌شود (Chandrapala et al., 2012; Rafiei, Soltanizadeh, & Kaykha, 2025).

توانست با کاهش چسبندگی ذرات، بهبود پاشش و افزایش پایداری کلوئیدی، محصولی با کیفیت بالاتر و ویژگی‌های عملکردی برتر تولید کند. از دیدگاه صنعتی، استفاده از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار، ضمن افزایش راندمان فرآیند و کاهش ضایعات، امکان تولید پودر پروتئین آب پنیر با قابلیت انحلال پذیری بالا و عملکرد مطلوب در سیستم‌های امولسیون و کفدار را فراهم می‌سازد. این ویژگی‌ها کاربرد این پودر را در تولید محصولات لبنی غنی شده، نوشیدنی‌های پروتئینی، فرمولاسیون‌های امولسیونی و فرآورده‌های غذایی عملکردی گسترش می‌دهد. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب امواج فراصوت و خشک‌کن پاششی می‌تواند به عنوان یک فناوری نوین، اقتصادی و سازگار با محیط زیست در صنایع غذایی مورد توجه قرار گیرد و زمینه ساز توسعه فرآیندهای بهینه در تولید محصولات پروتئینی با ارزش افزوده بالا باشد.

میزان مشارکت نویسندگان

مجید آرام نبی نیا: انجام آزمایشات، تحقیق و بررسی، مدیریت داده‌ها، نوشتن پیش نویس اصلی، **حجت کاراژیان:** مدیریت داده‌ها، مدیریت پروژه، نظارت، اعتبارسنجی، روش‌شناسی، نوشتن - بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

بهینه منجر به کوچک‌ترین اندازه ذرات شد. این موضوع را می‌توان به پدیده کاویتاسیون فراصوت نسبت داد که با ایجاد برش‌های مکانیکی شدید، تجمعات پروتئینی را می‌شکند و ذرات ریزتر و یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند (Yang et al., 2018). کاهش اندازه ذرات در این نمونه هم‌راستا با افزایش پتانسیل زتا و بهبود شاخص فعالیت امولسیونی و ظرفیت کف‌کنندگی مشاهده شده بود (Patel, Li, Woo, 2018; Metzger, & Selomulya, 2018).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که به کارگیری پیش تیمار غیرحرارتی امواج فراصوت پیش از خشک‌کردن پاششی، راهکاری مؤثر و کاربردی برای بهبود کیفیت و عملکرد پودر پروتئین آب پنیر است. نتایج حاصل از ارزیابی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، عملکردی و ساختاری بیانگر آن بود که امواج فراصوت با ایجاد تغییرات هدفمند در ساختار پروتئین‌ها، موجب کاهش تجمعات، افزایش سطح تماس و اصلاح ریزساختار ذرات می‌شود؛ امری که مستقیماً به بهبود حلالیت، فعالیت امولسیونی و ظرفیت کف‌کنندگی منجر گردید. در شرایط بهینه (توان حدود ۲۷۳/۵ وات و زمان ۲۵ دقیقه)، بیشترین بازده تولید پودر همراه با عملکردهای تکنولوژیکی مطلوب حاصل شد که برتری این تیمار را نسبت به نمونه‌های شاهد خشک‌کن پاششی و انجمادی به خوبی نشان می‌دهد. مقایسه روش‌های خشک‌کردن نشان داد که اگرچه خشک‌کن انجمادی تا حدی در حفظ ساختار طبیعی پروتئین‌ها مؤثر است، اما از نظر بازده تولید و بهبود ویژگی‌های عملکردی، کارایی کمتری نسبت به ترکیب امواج فراصوت و خشک‌کن پاششی دارد. در مقابل، خشک‌کن پاششی در حضور پیش تیمار امواج فراصوت

References

- Ahmad, M., Mudgil, P., Gani, A., Hamed, F., Masoodi, F.A., & Maqsood, S. (2019). Nano-encapsulation of catechin in starch nanoparticles: Characterization, release behavior and bioactivity retention during simulated in-vitro digestion. *Food Chemistry*, 270, 104-95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.024>
- Ahmadi, Z., Razavi, S.M.A., & Varidi, M. (2017). Sequential ultrasound and transglutaminase treatments improve functional, rheological, and textural properties of whey protein concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.013>
- Al-Shamsi, K.A., Mudgil, P., Hassan, H.M., & Maqsood, S. (2018). Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in in vitro and in food model systems. *Journal of Dairy Science*, 101(1), 47-60. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13194>
- Al-Thaibani, A., Mostafa, H., Alshamsi, O., Moin, A., Bansal, N., Mudgil, P., & Maqsood, S. (2024). Spray-drying and ultrasonication processing of camel whey protein concentrate: Characterization and impact on bioactive properties. *Journal of Dairy Science*, 107(11), 8824-8836. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24900>
- Albano, K.M., & Nicoletti, V.R. (2018). Ultrasound impact on whey protein concentrate-pectin complexes and in the O/W emulsions with low oil soybean content stabilization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 562-571. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2017.10.018>
- Andrade, J., Pereira, C.G., de Almeida Junior, J.C., Viana, C.C.R., de Oliveira Neves, L.N., da Silva, P.H.F., dos Anjos, V.d.C. (2019). FTIR-ATR determination of protein content to evaluate whey protein concentrate adulteration. *LWT*, 99, 166-172. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.079>

7. Both, E., Boom, R., & Schutyser, M. (2020). Particle morphology and powder properties during spray drying of maltodextrin and whey protein mixtures. *Powder Technology*, 363, 519-524. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.001>
8. Bulut, M. (2022). The effects of ultrasound times and amplitudes on the particle size and emulsifying properties of whey protein concentrate. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 323-329. <https://doi.org/10.53433/yyufbed1077700>
9. Cais-Sokolińska, D., Teichert, J., & Gawalek, J. (2023). Foaming and other functional properties of freeze-dried mare's milk. *Foods*, 12(11), 2274. <https://doi.org/10.3390/foods12112274>
10. Chandrapala, J., Zisu, B., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2012). The effects of high-intensity ultrasound on the structural and functional properties of α -Lactalbumin, β -Lactoglobulin and their mixtures. *Food Research International*, 48(2), 940-943. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.02.021>
11. Chen, W., Chao, C., Yu, J., Copeland, L., Wang, S., & Wang, S. (2021). Effect of protein-fatty acid interactions on the formation of starch-lipid-protein complexes. *Food Chemistry*, 364, 130390. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130390>
12. Haas, J., Kim, B.J., Atamer, Z., Wu, C., & Dallas, D.C. (2024). Effects of spray drying and freeze drying on the protein profile of whey protein concentrate. *Journal of Food Science*, 89(11), 7477-7493. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17349>
13. Haque, M.K., & Roos, Y.H. (2005). Crystallization and X-ray diffraction of crystals formed in water-plasticized amorphous spray-dried and freeze-dried lactose/protein mixtures. *Journal of Food Science*, 70(5), E359-E366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09977.x>
14. Jafar, S., Kamal, H., Mudgil, P., Hassan, H.M., & Maqsood, S. (2018). Camel whey protein hydrolysates displayed enhanced cholesteryl esterase and lipase inhibitory, anti-hypertensive and anti-haemolytic properties. *LWT*, 98, 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.024>
15. Jambrak, A.R., Mason, T.J., Lelas, V., Paniwnyk, L., & Herceg, Z. (2014). Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. *Journal of Food Engineering*, 121, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.012>
16. Jin, H., Sun, S., Sun, Z., Wang, Q., Jin, Y., & Sheng, L. (2022). Ultrasonic-assisted spray drying as a tool for improving the instant properties of egg white powder. *Food Structure*, 33, 100289. <https://doi.org/10.1016/j.foosr.2022.100289>
17. Kabeer, S., & Nagamanniammai, G. (2023). Effect of freeze and vacuum drying on the retention of nutrient content of brown rice (*Oryza sativa*) porridge. *International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases*, 13(4), 234-239. https://doi.org/10.4103/ijnpnd.ijnpnd_31_23
18. Kandasamy, S., Yoo, J., Yun, J., Kang, H.-B., Seol, K.-H., Kim, H.-W., & Ham, J.-S. (2021). Application of whey protein-based edible films and coatings in food industries: An updated overview. *Coatings*, 11(9), 1056. <https://doi.org/10.3390/coatings11091056>
19. Kenari, R. E., & Razavi, R. (2021). Effect of sonication conditions: Time, temperature and amplitude on physicochemical, textural and sensory properties of yoghurt. *International Journal of Dairy Technology*, 74(2), 332-343. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12761>
20. Khaire, R. A., & Gogate, P. R. (2021). Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds. *Drying Technology*, 39(12), 1832-1853. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1804926>
21. Kilara, A., & Vaghela, M. (2018). *Whey proteins*. pp. 93-126). In *Proteins in food processing* Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100722-8.00005-x>
22. Kumar, R., Chauhan, S. K., Shinde, G., Subramanian, V., & Nadasabapathi, S. (2018). Whey Proteins: A potential ingredient for food industry-A review. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 37(4), 283-290. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1389>
23. Ledari, S. A., Milani, J. M., Shahidi, S.-A., & Golkar, A. (2024). Comparative analysis of freeze drying and spray drying methods for encapsulation of chlorophyll with maltodextrin and whey protein isolate. *Food Chemistry: X*, 21, 101156. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101156>
24. Li, K., Woo, M. W., Patel, H., Metzger, L., & Selomulya, C. (2018). Improvement of rheological and functional properties of milk protein concentrate by hydrodynamic cavitation. *Journal of Food Engineering*, 221, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005>
25. Maqsood, S., Al-Dowaila, A., Mudgil, P., Kamal, H., Jobe, B., & Hassan, H. M. (2019). Comparative characterization of protein and lipid fractions from camel and cow milk, their functionality, antioxidant and antihypertensive properties upon simulated gastro-intestinal digestion. *Food Chemistry*, 279, 328-338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.011>

26. Marín, D., Alemán, A., Montero, P., & Gómez-Guillén, M. (2018). Encapsulation of food waste compounds in soy phosphatidylcholine liposomes: Effect of freeze-drying, storage stability and functional aptitude. *Journal of Food Engineering*, 223, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.009>
27. Mavropoulou, I., & Kosikowski, F. (1973). Composition, solubility, and stability of whey powders. *Journal of Dairy Science*, 56(9), 1128-1134. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(73\)85321-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(73)85321-4)
28. McClements, D. J. (2021). Food hydrocolloids: Application as functional ingredients to control lipid digestion and bioavailability. *Food Hydrocolloids*, 111, 106404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106404>
29. McClements, D. J., Bai, L., & Chung, C. (2017). Recent advances in the utilization of natural emulsifiers to form and stabilize emulsions. *Annual review of food science and technology*, 8(1), 205-236. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-030154>
30. Minj, S., & Anand, S. (2022). Development of a spray-dried conjugated whey protein hydrolysate powder with entrapped probiotics. *Journal of Dairy Science*, 105(3), 2038-2048. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20978>
31. O'Sullivan, J., Arellano, M., Pichot, R., & Norton, I. (2014). The effect of ultrasound treatment on the structural , physical and emulsifying properties of dairy proteins. *Food Hydrocolloids*, 42, 386-396. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.011>
32. O'Callaghan, D., & Hogan, S. (2013). The physical nature of stickiness in the spray drying of dairy products—a review. *Dairy Science & Technology*, 93(4), 331-346. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0114-9>
33. Pierce, A., Skonberg, D., Calder, B., Dumas, R., & Jin, Q. (2024). Development of a Whey Protein Recovery Process Using Sugar Kelp (*Saccharina latissima*) Extracts. *Foods*, 13(22), 3663. <https://doi.org/10.3390/foods13223663>
34. Prabhuzantye, T., Khaire, R. A., & Gogate, P. R. (2019). Enhancing the recovery of whey proteins based on application of ultrasound in ultrafiltration and spray drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.008>
35. Rafiei, M., Soltanizadeh, N., & Kaykha, M. E. H. (2025). Unlocking the potential of whey protein isolate: How ultrasonic treatment transforms functionality and structure. *Ultrasonics Sonochemistry*, 107486. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107486>
36. Rajam, R., & Anandharamakrishnan, C. (2015). Spray freeze drying method for microencapsulation of *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Food Engineering*, 166, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.029>
37. Razavi, R., Kenari, R. E., Farmani, J., & Jahanshahi, M. (2020). Fabrication of zein/alginate delivery system for nanofood model based on pumpkin. *International journal of biological macromolecules*, 165, 3123-3134. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.176>
38. Sarabandi, K., Tamjidi, F., Akbarbaglu, Z., Samborska, K., Gharehbeglou, P., Kharazmi, M. S., & Jafari, S. M. (2022). Modification of whey proteins by sonication and hydrolysis for the emulsification and spray drying encapsulation of grape seed oil. *Pharmaceutics*, 14(11), 2434. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112434>
39. Schmitz-Schug, I., Kulozik, U., & Foerst, P. (2016). Modeling spray drying of dairy products—Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss. *Chemical Engineering Science*, 141, 315-329. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.008>
40. Shen, X., Fang, T., Gao, F., & Guo, M. (2017). Effects of ultrasound treatment on physicochemical and emulsifying properties of whey proteins pre-and post-thermal aggregation. *Food Hydrocolloids*, 63, 668-676. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.003>
41. Singh, P., Pandey, V. K., Singh, R., & Dar, A. H. (2024). Spray-freeze-drying as emerging and substantial quality enhancement technique in food industry. *Food Science and Biotechnology*, 33(2), 231-243. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01409-8>
42. Song, B., Yao, P., Zhang, Y., Pang, X., Zhang, S., & Lv, J. (2022). Ultrasound pretreatment prior to spray drying improve the flowability and water sorption properties of micellar casein concentrate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 87, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106049>
43. Tavares, L., & Noreña, C. P. Z. (2019). Encapsulation of garlic extract using complex coacervation with whey protein isolate and chitosan as wall materials followed by spray drying. *Food Hydrocolloids*, 89, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.052>
44. Wang, H., Tong, X., Yuan, Y., Peng, X., Zhang, Q., Zhang, S., . . . Xu, J. (2020). Effect of spray-drying and freeze-drying on the properties of soybean hydrolysates. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 9201457. <https://doi.org/10.1155/2020/9201457>
45. Xiong, L., Li, C., Boeren, S., Vervoort, J., & Hettinga, K. (2020). Effect of heat treatment on bacteriostatic activity and protein profile of bovine whey proteins. *Food Research International*, 127, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108688>

46. Yang, F., Liu, X., Ren, X. e., Huang, Y., Huang, C., & Zhang, K. (2018). Swirling cavitation improves the emulsifying properties of commercial soy protein isolate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 471-481. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.014>
47. Zhang, R., Pang, X., Lu, J., Liu, L., Zhang, S., & Lv, J. (2018). Effect of high intensity ultrasound pretreatment on functional and structural properties of micellar casein concentrates. *Ultrasonics Sonochemistry*, 47, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.04.011>
48. Zhang, Z.-H., Peng, H., Woo, M. W., Zeng, X.-A., Brennan, M., & Brennan, C. S. (2020). Preparation and characterization of whey protein isolate-chlorophyll microcapsules by spray drying: Effect of WPI ratios on the physicochemical and antioxidant properties. *Journal of Food Engineering*, 267, 109729. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109729>
49. Zhao, Q., Xiong, H., Selomulya, C., Chen, X. D., Huang, S., Ruan, X., ... Sun, W. (2013). Effects of spray drying and freeze drying on the properties of protein isolate from rice dreg protein. *Food and Bioprocess Technology*, 6(7), 1759-1769. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0844-3>

Research Article
Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 193-206

Production of Oleogel Derived from Canola Oil and a Combination of Emulsifiers and Methylcellulose Hydrocolloid via a Direct Method as a Shortening Substitute

M. Ghandrezaee¹, M. Mazaheri Tehrani^{1*}, R. Farhoosh^{1*}, P. Parsa¹

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

(* - Corresponding Authors Email: mmtehrani@um.ac.ir, rfarhoosh@um.ac.ir)

Received: 18.03.2026	How to cite this article:
Revised: 13.05.2026	Ghandrezaee, M., Mazaheri Tehrani, M., Farhoosh, R., & Parsa, P. (2026). Production of oleogel derived from canola oil and a combination of emulsifiers and methylcellulose hydrocolloid via a direct method as a shortening substitute. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 22(2), 193-206. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98161.1558
Accepted: 19.05.2026	
Available Online: 31.05.2026	

Introduction

Considering the adverse effects of saturated fatty acids and particularly trans-fats found in shortenings on human health, the development and application of oleogels in food production have become essential. Oleogelation is a valuable method for producing semi-solid and gel-like structures from trans-free unsaturated liquid oils. Nowadays, multi-component oleogels, formulated by combining high-molecular-weight and low-molecular-weight gelators, offer new horizons in the design of fat substitutes. In this context, the method of emulsifier incorporation (whether as powder or molten mixture) may significantly influence both the physicochemical properties and functional performance of the resulting oleogels. Moreover, utilizing compounds such as methylcellulose (MC) in oleogel production typically requires complex and costly methods. To overcome this, MC can be added to the molten mixture of emulsifiers and dissolved directly. The primary focus of this research is to investigate the synergistic interplay between the specific ratios of Lactic Acid Esters of Mono- and Diglycerides (LACTEM) and Diacetyl Tartaric Acid Esters of Mono- and Diglycerides (DATEM) and the structural support provided by MC.

Materials and Methods

This study investigated the synergistic effect of combining LACTEM with DATEM at various ratios (30:10, 10:30, 40:0, 0:40) alongside a constant amount of Distilled Monoglycerides (DMG). Furthermore, the effect of direct dissolution of MC (0% and 2%) on the textural, physicochemical, fatty acid profile, and Solid Fat Content (SFC) of the resulting oleogels was evaluated in comparison with commercial shortening. The preparation method involved melting the emulsifier blend at 70°C, followed by the direct addition and dissolution of MC at 80°C. This molten matrix was cooled at 25°C for 24 h to initiate full co-crystallization of the surfactants and the polymer. In the next step, the mixture was pulverized using a laboratory mill (spray chilling would be utilized at an industrial scale). The resulting powder was then added to liquid canola oil at a concentration of 15% (w/w). The mixture was heated to 70°C until the oil becomes completely transparent. Finally, the samples were cooled at 25°C for 24 h to form the oleogel.

Results and Discussion

Regarding Oil Binding Capacity (OBC), some treatments exhibited a slight decline after 30 days; however, samples containing LACTEM/DATEM and MC maintained their OBC throughout the 30-day period. In terms of textural hardness, samples containing two different ratios of LACTEM/DATEM emulsifier, with and without MC,



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.2026.98161.1558>

exhibited greater similarity to the control sample. Notably, samples with the higher DATEM ratio showed no statistically significant difference compared to the shortening sample. Also, the peroxide value (PV) of the oleogel samples was significantly higher than that of the shortening sample ($p < 0.001$). However, the rate of PV increase during the second 15-day period was lower in all oleogel samples. Specifically, the LACTEM/DATEM10-30-MC2 sample exhibited the lowest rate of PV increase. In this sample, the peroxide value at day 30 increased by 1.93-fold compared to day 15, whereas the shortening sample showed a 5.06-fold increase in peroxide value over the same period. It should be noted that the peroxide value (PV) only reflects primary oxidation products; therefore, for a more comprehensive assessment of oxidative stability and the formation of secondary oxidation products, future studies are recommended to incorporate additional indices, such as the p-anisidine value (p-AV) or thiobarbituric acid reactive substances (TBARS). Furthermore, despite the higher solid fat content (SFC) inherent in conventional shortening, the optimized oleogels offered a superior nutritional profile, achieved through a 16.77–17.7% reduction in saturated fatty acids and almost-total elimination of trans isomers.

Conclusion

In conclusion, the synergistic effect of low-molecular-weight emulsifiers and methylcellulose via direct dissolution offers a viable strategy for promoting public health, as it effectively eliminates trans fats while preserving the essential functional characteristics of the lipid system.

Funding Sources

This research was supported by a research grant from the Ferdowsi University of Mashhad (Grant No. 3.5655), and also by Pars Behboud Asia Company.

Acknowledgement

We extend our sincere appreciation to Pars Behboud Asia Company for their financial support, supply of emulsifiers, provision of laboratory facilities, and technical collaboration of this research.

Keywords: Direct dissolution method, LACTEM/DATEM ratio, Methylcellulose hydrocolloid, Multi-component oleogels, Shortening replacement

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۱۹۳-۲۰۶

تولید اولئوژل حاصل از روغن کانولا و ترکیب امولسیفایرها و هیدروکلئوئید متیل سلولز با روش مستقیم به عنوان جایگزین شورتینینگ

مریم قنادرضایی^۱ - مصطفی مظاهری تهرانی^{۱*} - رضا فرهوش^{۱*} - پریسا پارسا^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

چکیده

باتوجه به پیامدهای منفی مصرف اسیدهای چرب اشباع و ترانس موجود در شورتینینگها بر سلامت انسان، لزوم توسعه و کاربرد اولئوژلها در محصولات غذایی احساس می گردد. امروزه اولئوژلهای چندجزئی حاصل از ترکیب ماده ژل ساز با وزن مولکولی بالا همچون متیل سلولز، چشم انداز نوینی را در طراحی چربی های جایگزین فراهم آورده اند. اما استفاده از ترکیبات مذکور در تولید اولئوژلها، نیازمند به کاربردن روش های پیچیده و هزینه بر است، برای حل این مشکل می توان متیل سلولز را در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مخلوط ذوب شده امولسیفایرها افزود و این ترکیب را به صورت مستقیم حل نمود. در این پژوهش اثر ترکیب مواد ژل ساز شامل: استر اسید لاکتیک با گلیسرول مونواسترات (LACTEM) و استرهای مونو(دی) گلیسرید دی استیل تارتاریک اسید (DATEM) در نسبت های مختلف (۱۰:۳۰، ۳۰:۱۰، ۴۰:۲۰، ۴۰:۴۰) در مقایسه ثابت امولسیفایر مونودی گلیسرید تقطیر شده (DMG) و همچنین اثر انحلال مستقیم هیدروکلئوئید متیل سلولز (۲،۰ درصد) بر خصوصیات بافتی، فیزیکی و شیمیایی، ترکیب اسیدهای چرب و محتوای چربی جامد اولئوژل حاصل از روغن کانولا در مقایسه با شورتینینگ تجاری بررسی شد. تیمارهای اولئوژل حاوی LACTEM/DATEM و متیل سلولز، پایداری ساختاری مطلوبی نشان دادند؛ به طوری که نمونه های LACTEM/DATEM10:30-MC2 و LACTEM/DATEM30:10-MC2 پس از ۳۰ روز، ظرفیت نگهداری روغن را در سطح ۱۰۰ درصد حفظ کردند. سختی بافت این نمونه ها (۵/۵۷ و ۴/۵۷) مشابهت بالایی با شورتینینگ (۵/۰۲) داشت. از منظر پایداری اکسیداتیو، نرخ افزایش عدد پراکسید در نمونه LACTEM/DATEM10-30-MC2 بین روزهای ۱۵ تا ۳۰ تنها ۱/۹۳ برابر بود، در حالی که این شاخص برای شورتینینگ به ۵/۰۶ برابر رسید. در نهایت، اولئوژل های بهینه با کاهش ۱۶/۷۷ تا ۱۷/۷۰ درصدی اسیدهای چرب اشباع و حذف ایزومرهای ترانس، جایگزین تغذیه ای بسیار مطلوب تری محسوب می شوند. در نتیجه، هم افزایی امولسیفایرها با وزن مولکولی پایین و متیل سلولز به روش انحلال مستقیم، ضمن حذف چربی های ترانس و حفظ ویژگی های عملکردی، در ارتقای سلامت عمومی جامعه مؤثر می باشد.

واژه های کلیدی: اولئوژل های چند جزئی، انحلال مستقیم، شورتینینگ، متیل سلولز، نسبت امولسیفایرهای لاکتم/ داتم

مقدمه

شورتینینگها از روغن هیدروژنه یا مخلوطی از روغن های هیدروژنه، غیرهیدروژنه و امولسیفایرها تهیه می گردند (Mahjoob, Hakimzadeh, Ataye, & Jamshid, 2022). در طی فرآیند هیدروژناسیون برای تهیه شورتینینگها، اسیدهای چرب اشباع ترانس تولید می گردند که موجب افزایش لیپوپروتئین های کلسترول با دانسیته

شورتینینگها روغن هایی هستند که به طور معمول در دمای اتاق جامد می باشند و در تهیه فرآورده های نانوائی، قنادی و سرخ کردن به منظور ایجاد محصولی با بافت، طعم و رنگ مطلوب کاربرد دارند. از جمله فرآیندهای رایج در تولید شورتینینگها، هیدروژناسیون می باشد.

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*)- نویسندگان مسئول: rfarhoosh@um.ac.ir, mmtehrani@um.ac.ir (Email:)

و کربوهیدرات‌ها در دسته مواد ژل‌ساز با وزن مولکولی بالا قرار دارند (Qiu, Zhang, Bang, & Monoacylglycerol, 2024).

مونوگلیسرید تقطیر شده^۱ (دارای بیش از ۹۰ درصد مونوگلیسرید) از واکنش استریفیکاسیون تری‌گلیسریدها با گلیسرول به‌دست می‌آید. این امولسیفایر از جمله مواد ژل‌سازی است که در غلظت (۲/۵ درصد به بالا) دارای خاصیت به‌دام‌اندازی روغن مایع در یک شبکه کریستالی می‌باشد و همچنین ظرفیت نگهداری روغن بالا، توانایی ساختارسازی مؤثر و ایجاد خواص الاستیک مطلوب در روغن، DMG را به‌عنوان یک ماده ژل‌ساز ایده‌آل مطرح می‌سازد (Palla, Dominguez, & Carrín, 2022). در نتیجه مونوگلیسرید تقطیر شده در ترکیب پودری مورد انتخاب به‌عنوان جزء ثابت (۶۰ درصد) انتخاب شده است. استر اسید لاکتیک با گلیسرول مونواسترات^۲ نیز به‌عنوان یک ترکیب کاهش‌دهنده کشش سطحی در سیستم‌های امولسیون روغن در آب و آب در روغن محسوب می‌شود. این امولسیفایر در تولید خامه‌های لبنی و غیرلبنی، کیک و کلوچه، شورتینگ‌ها و شکلات کاربرد دارد. استرها (مونو(دی) گلیسرید دی‌استیل تارتاریک اسید^۳ یک امولسیفایر آنیونی با ساختار کریستالی و درجه غذایی است که در ترکیب با مونوگلیسرید تقطیره شده به‌دلیل ایجاد ساختار کریستالی مستحکم سبب افزایش ظرفیت نگهداری روغن و بهبود سرعت بلوری شدن فاز چربی می‌گردد (Hasenhuettl, 2019). اخیراً امولسیفایر DATEM در مطالعاتی به‌عنوان ماده ژل‌ساز روغن مورد استفاده قرار گرفته است و موجب بهبود ساختار کریستالی محصول نهایی (کروسان) گردیده است (Mao, Ye, & Meng, 2024).

هیدروکلوئیدها جزو مواد ژل‌ساز پلیمری یا دارای وزن مولکولی بالا طبقه‌بندی می‌گردند. متیل سلولز جزو ساده‌ترین مشتقات سلولز است که از طریق جایگزینی گروه‌های هیدروکسیل با متوکسی در سلولز، تولید می‌گردد که باعث افزایش حلالیت، ویسکوزیته، خواص سطحی، زیست‌سازگاری آن می‌شود. متیل سلولز به‌عنوان یک ماکرومولکول زیستی مهم و پرکاربرد در ساخت اولئوزل‌ها به‌خصوص در صنایع غذایی، دارویی و محیط‌زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌علاوه متیل سلولز یک هیدروکلوئید ایمن و در دسترس است، دارای عملکرد محدود گسترده‌ای از دما و pH می‌باشد و به‌عنوان جانشین چربی جامد در فرآورده‌های کم‌کالری کاربرد دارد (Naderi, Mohammad, Rashidi, & Mahdi, 2024; Xu et al., 2023). اما نکته قابل توجه این است که متیل سلولز به‌طور مستقیم در روغن حل نمی‌شود و انحلال به‌طور غیرمستقیم به‌وسیله روش‌هایی همچون قالب‌زنی امولسیون و کف، نیازمند مراحل پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است که در مقیاس

کم و در مقابل کاهش لیپوپروتئین‌ها با دانسیته بالا و در نتیجه موجب افزایش کلوسترول خون، چاقی، بیماری‌های قلبی و عروقی و ... می‌شوند (Wang, Chandrapala, Truong, & Farahnaky, 2022). لذا لزوم جایگزینی این ترکیبات در کاربردهای صنایع غذایی به‌جهت کاهش خطرات ناشی از مصرف اسیدهای چرب اشباع برای سلامتی انسان‌ها و در عین حال دست‌یابی به محصولی خصوصیات عملکردی مناسب احساس می‌گردد. التئوزلاسیون یکی از روش‌های مفید جهت بدست آوردن ساختارهای نیمه‌جامد و ژل‌مانند از روغن‌های مایع با اسیدچرب غیراشباع و فاقد ترانس می‌باشد (Meng, Guo, Wang, & Liu, 2019). در این خصوص چگونگی استفاده ترکیبی از امولسیفایرها (به‌صورت ترکیب پودری یا مذاب) می‌تواند برخواص فیزیکوشیمیایی و عملکردی آن‌ها و اولئوزل اثرگذار باشد. نکته دیگری که حائز اهمیت است، چگونگی انحلال مواد ژل‌ساز (روغن مستقیم یا غیرمستقیم) به‌ویژه در مورد مواد ژل‌ساز بیوپلیمری است که می‌تواند در کاربرد آن‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی اثرگذار باشد.

روغن‌ها و چربی‌های گیاهی از جمله مواد مغذی حیاتی و بخش مهمی از رژیم غذایی انسان هستند. نوع فاز روغنی پارامتر مهمی است که بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی سیستم‌های اولئوزل تأثیر می‌گذارد. مشخصات اسیدهای چرب، وزن مولکولی و ساختار آن‌ها، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (به‌عنوان مثال، قطبیت، ویسکوزیته و برهمکنش‌های روغن- ماده ژل‌ساز) روغن‌های خوراکی را تعیین می‌کنند. روغن کانولا از طریق اصلاح ژنتیکی دانه کلزا حاصل می‌شود که میزان اسید اروسیک آن به کمتر از ۲ درصد رسیده و نیز به‌عنوان منبع غنی از اسیدهای چرب تک غیر اشباع (حدود ۶۲ درصد اسید اولئیک) می‌باشد. حضور اسیدهای چرب امگا ۳ و ۶ از مزایای تغذیه‌ای روغن کانولا می‌باشد که نقش عمده در سلامت مصرف‌کننده دارد و به‌عنوان یک روغن سالم معروف است. همچنین به‌دلیل بالا بودن نقطه دود، روغن مناسبی برای سرخ کردن به حساب می‌آید (Shahidi, 2005).

مواد ژل‌ساز مولکول‌هایی هستند که از طریق به‌دام‌اندازی روغن در یک ساختار شبکه‌ای، موجب تولید ساختارهایی نیمه‌جامد، موسوم به اولئوزل می‌گردند (Uslu & Yilmaz, 2021). مواد ژل‌ساز از نظر وزن مولکولی در دو دسته مواد ژل‌ساز با وزن مولکولی کم و بالا طبقه‌بندی می‌شوند. امولسیفایرهایی همچون مونوگلیسرید، لاکتم، داتم و ...، اسیدهای چرب، الکل‌های چرب، موم‌ها، فیتواسترل‌ها و ... جزء مواد ژل‌ساز با وزن مولکولی کم هستند و اتیل سلولز، متیل سلولز، پروتئین‌ها

3- Esters of diacetyl tartaric mono(di)glycerides Acid (DATEM)

1- Distilled Monoglyceride (DMG)

2- Ester of Lactic Acid with Glycerol Monostearate (LACTEM)

بالا، هیدروکلئوئید متیل سلولز از شرکت مرک، روغن شورتینینگ از شرکت صنعتی بهشهر تهیه گردید. حلال‌ها، معرف‌ها و سایر مواد مورد نیاز به شرح زیر از شرکت‌های مرک (آلمان) و سیگما (آمریکا) خریداری شد: اسید استیک، متانول، کلروفرم، اتانول، هیدروکسید سدیم، تولوئن، اسید کلریدریک، آهن III، پراکسید هیدروژن، کلرید باریم دو آبه، سولفات آهن ۷ آبه، آهن II، معرف فنل فتالئین، هیدروکسید پتاسیم.

آماده‌سازی نمونه‌های اولئوژل

برای تولید اولئوژل در فاز اول، امولسیفایرها را در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با نسبت ثابت DMG (۶۰) و نسبت‌های مختلف از LACTEM و DATEM (۰:۴۰، ۴۰:۰، ۳۰:۱۰ و ۱۰:۳۰) ذوب کرده، سپس هیدروکلئوئید متیل سلولز را (در غلظت‌های ۰ و ۲ درصد) به مخلوط مذاب اضافه نموده و دما را تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دادیم. اگرچه متیل سلولز عمدتاً به‌عنوان یک هیدروکلئوئید آب‌دوست شناخته می‌شود، اما وجود گروه‌های متوکسی در ساختار آن، ویژگی‌های آمفی‌فیلیک قابل توجهی به آن می‌بخشد و امکان برهم‌کنش با فازهای چربی را فراهم می‌سازد. در این سیستم، امولسیفایرهای مذاب به‌عنوان یک فاز حامل عمل می‌کنند. در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، که تحرک مولکولی امولسیفایرها بالاست، آن‌ها سطح ذرات متیل سلولز را به‌طور کامل مرطوب کرده و از طریق کاهش کشش بین‌سطحی، ذرات متیل سلولز را در فاز لیپیدی احاطه می‌کنند. این فرآیند پیش-پراکندگی باعث تثبیت ذرات و جلوگیری از کلوخه شدن آن‌ها در فاز روغنی می‌شود و زمینه‌ساز تشکیل یک شبکه پایدار در اولئوژل می‌گردد (Naeli, Milani, Farmani, & Zargaraan, 2020; Patel & Dewettinck, 2016).

در مرحله بعد مخلوط مذاب حاصل را به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد کرده تا کاملاً جامد و کریستاله شوند. در مرحله بعد، مخلوط فوق توسط آسیاب آزمایشگاهی پودر شده (در صنعت، این فرآیند از طریق اسپری چیلینگ انجام خواهد شد) و سپس ۱۵ درصد از پودر به‌دست‌آمده به روغن مایع کانولا اضافه شد. مخلوط حاصل تا دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا نمونه کاملاً شفاف شود. در نهایت، نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد شدند تا اولئوژل‌های نهایی حاصل گردند. فرمولاسیون نمونه‌های اولئوژل تولیدی حاوی امولسیفایرها (مونودی‌گلیسرید تقطیر شده، داتم، لاکتم) و متیل سلولز در جدول ۱ به شرح ذیل ارائه شده است.

نیمه‌صنعتی و صنعتی قابل انجام نیست (Naeli, Milani, Farmani, & Zargaraan, 2021). لذا ضرورت حل این مشکل و دستیابی به روشی ساده جهت استفاده همزمان از امولسیفایرها و هیدروکلئوئیدهای همچون متیل سلولز احساس می‌گردد.

در مطالعات پیشین محققان مشخص شده است که استفاده از ترکیب ماده مواد ژل‌ساز به‌واسطه توانایی تبلور همزمان از طریق برقراری برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی و دارا بودن اثر سینرژیکی بر رفتار تشکیل ژل، به‌طور مؤثرتری قادر به‌دام‌اندازی روغن هستند (Liu, Pei, Shen, Xu, & Zhao, 2024). برای مثال از ترکیب انواع مختلف مونوگلیسرید با امولسیفایرهای سورفاکتین و دی‌آسیل گلیسرول (Liu et al., 2024; Wang, Ma, Qiu, Wang, & Liu, 2022)، اتیل سلولز (Chen et al., 2023; Lopez-martínez, Charó-alonso, Marangoni, & Toro-vazquez, 2015; Rodríguez-hern, 2021)، موم‌های آفتابگردان، کاندلیلا، کارنوبا و سیوس برنج (Pakseresht, Tehrani, Farhoosh, & Koocheki, 2023; Rodríguez-hern, 2021; Zampouni, 2024) استفاده شده است. از طرف دیگر نوع، نسبت و چگونگی ترکیب کردن مواد ژل‌ساز مختلف حائز اهمیت است. لذا در این مطالعه ترکیبی از امولسیفایرها و هیدروکلئوئید متیل سلولز به‌عنوان ماده ژل‌ساز جهت تولید اولئوژل جایگزین شورتینینگ انتخاب گردیده‌اند.

در این پژوهش برخلاف تحقیقات پیشین، با هدف پراکندگی یکنواخت‌تر امولسیفایرهای DATEM و LACTEM و همچنین استفاده مستقیم از هیدروکلئوئید متیل سلولز، بدون نیاز به به‌کار بردن روش‌های پیچیده؛ ابتدا امولسیفایرها ذوب و با یکدیگر مخلوط می‌گردند. سپس هیدروکلئوئید متیل سلولز به مخلوط امولسیفایری اضافه و در آن حل می‌شود و در انتها ترکیب حاصل پس از کریستاله شدن مجدد به روغن اضافه و اولئوژل تهیه می‌گردد. همچنین خصوصیات بافتی، نقطه ذوب، عدد پراکسید و ظرفیت نگهداری روغن در نمونه‌های اولئوژل تهیه شده از مخلوط امولسیفایرها و متیل سلولز در فاز اول و میزان چربی جامد و پروفایل اسید چرب در فاز دوم در نمونه‌های اولئوژل بهینه با شورتینینگ مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است که این پژوهش در مقیاس نیمه‌صنعتی صورت خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد و معرف‌های شیمیایی

روغن کانولا شرکت اویلا (تهران، ایران)، امولسیفایرهای DMG، LACTEM و DATEM از شرکت پارس بهبود آسیا با درجه خلوص

جدول ۱- فرمولاسیون نمونه‌های اولئوژل تولیدی حاوی امولسیفایرها (مونودی گلیسرید تقطیر شده، داتم، لاکتم) و متیل سلولوز
Table 1- Formulation of the prepared oleogel samples containing emulsifiers (DMG, DATEM, LACTEM) and MC

نمونه	مونو دی گلیسرید تقطیر شده	لاکتم	داتم	متیل سلولوز
Sample	DMG (%)	LACTEM (%)	DATEM (%)	MC (%)
LACTEM40-MC0	60	40	0	0
LACTEM40-MC2	60	40	0	2
DATEM40-MC0	60	0	40	0
DATEM40-MC2	60	0	40	2
LACTEM/DATEM30:10-MC0	60	30	10	0
LACTEM/DATEM30:10-MC2	60	30	10	2
LACTEM/DATEM10:30-MC0	60	10	30	0
LACTEM/DATEM10:30-MC2	60	10	30	2

$$\% obc = 100 - \frac{(b - a) - (c - a)}{(b - a)} \times 100$$

a: وزن میکروتیوب خالی

b: وزن میکروتیوب بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای اتاق

c: وزن میکروتیوب پس از سانتریفیوژ است.

آزمون سنجش بافت

ویژگی‌های سفتی و چسبندگی نمونه‌های اولئوژل با استفاده از آزمون نفوذ به وسیله دستگاه آنالیز پروفایل بافت^۱ (TA Plus، ایالت متحده آمریکا) مجهز به پروب استوانه‌ای به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها به‌طور کامل در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد ذوب گردیدند و ۳۰ میلی‌لیتر از آن‌ها در لوله‌های سانتریفیوژ پلاستیکی ۵۰ میلی‌لیتری با کف تخت ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت و سپس ویژگی‌های بافتی آن‌ها بررسی شد. تنظیمات آزمون شامل سرعت پیش‌آزمون، سرعت تست و سرعت پس از آزمون به ترتیب ۲ میلی‌متر بر ثانیه، ۱ میلی‌متر بر ثانیه و ۲ میلی‌متر بر ثانیه و عمق نفوذ ۱۵ میلی‌متر بود و اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام شد (Aliasl Khiabani et al., 2020).

اندازه‌گیری نقطه ذوب لغزشی^۲

اندازه‌گیری SMP به روش لوله موئین باز انجام شد. در ابتدا نمونه‌ها تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از نقطه ذوبشان حرارت داده تا مایع شوند و سپس لوله موئین در داخل ظرف نمونه فرو برده شدند تا نمونه حدود یک سانتی‌متر از لوله موئین بالا برود. در مرحله بعد جداره بیرونی لوله موئین حاوی نمونه با پنبه پاک گردید و سریعاً در بن‌ماری آب یخ فرو برده شد تا روغن جامد شود. سپس نمونه به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از گذشت این زمان، لوله‌های موئین به دماسنج متصل و در یک بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری که حاوی آب با دمای حداقل ۱۰ درجه سانتی‌گراد کم تر از نقطه ذوب

آزمون‌های اولئوژل در فاز اول

اندازه‌گیری عدد پراکسید

برای اندازه‌گیری عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل از روش تیوسیانات و اندازه‌گیری جذب در ۵۰۰ نانومتر استفاده شده است (Odilichukwu et al., 2016). بدین منظور ۰/۱ تا ۰/۲ گرم نمونه بسته به میزان پراکسیدان در لوله‌های آزمایش ۱۵ میلی‌لیتری وزن می‌شود و با ۹/۸ میلی‌لیتر حلال کلروفرم متانل (به نسبت ۳:۷) مخلوط و به مدت ۲ تا ۴ ثانیه به هم زده می‌شود. بقیه مراحل مشابه ترسیم منحنی کالیبراسیون انجام می‌گردد. تمامی مراحل این روش زیر نور ملایم و به مدت ۱۰ دقیقه صورت می‌گیرد. در نهایت عدد پراکسید از معادله زیر محاسبه شد:

$$PV = \frac{(As - Ab) \times m}{55/84 \times W \times 2}$$

که در این معادله As جذب نمونه، Ab جذب شاهد، m شیب منحنی کالیبراسیون و W وزن نمونه اولئوژل است.

اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری روغن

ابتدا لوله‌های خالی میکروتیوب توزین شدند. پس از آن دو میلی‌لیتر از نمونه‌های اولئوژل ذوب شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد داخل هر میکروتیوب ریخته شدند. بعد از نگهداری میکروتیوب‌ها در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت، لوله‌ها مجدداً توزین شدند. سپس نمونه‌ها با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق سانتریفیوژ گردیدند. بعد از سانتریفیوژ، لوله‌های میکروتیوب به مدت ۳ دقیقه روی کاغذ فیلتر برگردانده شدند تا روغن‌های رویی اضافی خارج شوند، سپس بار دیگر میکروتیوب‌ها توزین می‌شوند و ظرفیت نگهداری روغن به کمک رابطه زیر محاسبه شد (Aliasl Khiabani, Tabibiazar, Roufegarinejad, & Hamishehkar, 2020).

آماري با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۵ صورت پذیرفت. در فاز دوم نمونه‌های بهینه با استفاده از طرح آنالیز واریانس یک طرفه با شورتینینگ تجاری مقایسه شدند. مقایسه میانگین برای هر دو فاز نیز با استفاده از آزمون توکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

ظرفیت نگهداری روغن

در روز نخست پس از تهیه اولئوژل‌ها، تقریباً تمامی نمونه‌ها از ظرفیت نگهداری روغن بالایی (نزدیک به ۱۰۰ درصد) برخوردار بودند که نشان‌دهنده تشکیل ساختار شبکه‌ای مطلوب در آن‌هاست. همان‌طور که در **جدول ۲** نشان داده شده است، با گذشت ۱۵ روز از زمان تولید نمونه‌های اولئوژل، برخی تیمارها مانند DATEM40-MC0 کاهش قابل توجهی نشان می‌دهند (حدود ۸۵/۷ درصد). تیمارهایی با نسبت ترکیبی LACTEM/DATEM و حاوی متیل سلولز (LACTEM/DATEM30:10-MC2-LACTEM/DATEM10-30-MC2) ظرفیت خود را پس از ۳۰ روز در بالاترین حد حفظ کرده‌اند. متیل سلولز احتمالاً از طریق افزایش ویسکوزیته یا ایجاد شبکه سه‌بعدی پلیمری، روغن را به صورت مکانیکی در ماتریس ژلی محصور کرده و بدین ترتیب ظرفیت نگهداری روغن را افزایش می‌دهد. بیشتر تیمارها ظرفیت نگهداری روغن را تا روز ۳۰ حفظ کرده‌اند (بیش از ۹۷ درصد)، که نشان‌دهنده پایداری ساختار ژلی در طول زمان است. تیمارهایی مانند LACTEM40-MC2 و DATEM40-MC0 کمی افت نشان می‌دهند (تا حدود ۹۷/۵ درصد)، اما تیمارهای ترکیبی LACTEM/DATEM با متیل سلولز همچنان عملکرد پایدار دارند.

نتایج مطالعات محققان نشان می‌دهد که استفاده از متیل سلولز در غلظت‌های بالای ۱/۴ درصد، موجب ایجاد اولئوژلی با ساختار متراکم و منافذ ریز می‌گردد که حرکت روغن را محدود کرده و از خروج آن طی فرآیند سانتریفیوژ کردن جلوگیری می‌کند. همچنین افزایش غلظت متیل سلولز موجب افزایش سفتی اولئوژل شده که به بهبود مقاومت ساختاری و کاهش تغییر شکل کمک کرده و در نتیجه از نشت روغن در شرایط تنش مکانیکی جلوگیری کرده است (Wu et al., 2024). همچنین در پژوهشی دیگر که به بررسی قابلیت اولئوژل حاصل از ماده ژل‌ساز متیل سلولز و کانولا به عنوان جایگزین ۱۰۰ درصد شورتینینگ در فرمولاسیون کرم ویفر پرداخته است، به قابلیت بالای ماده ژل‌ساز متیل سلولز در نگهداری روغن و جلوگیری از مهاجرت آن در مقایسه با شورتینینگ اشاره شده است. توانایی متیل سلولز در حفظ یکپارچگی

احتمالی نمونه است، قرار گرفت. زمانی که اولین لغزش چربی به سمت بالا در لوله موئین مشاهده گردید، به عنوان SMP در نظر گرفته شد (AOCS, 1998).

آزمون‌های اولئوژل در فاز دوم

ترکیب اسیدهای چرب اولئوژل

برای تعیین ترکیب اسیدهای چرب موجود در روغن‌های کانولا، شورتینینگ و نمونه‌های اولئوژل از دستگاه کروماتوگراف گازی^۱ (مدل N۶۸۹۰، Agilent Technologies، ایالات متحده آمریکا) مجهز به یک ستون لوله موئین و یک آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای^۲ استفاده شد. ستون دستگاه دارای طول ۱۰۰ متر و قطر ۰/۲۵ میلی‌متر با ضخامت فاز ثابت ۰/۲ میکرومتر بود. مقدار تزریق نمونه یک میکرولیتر و درجه حرارت ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بود. گاز هلیوم به عنوان گاز حامل با فشار ۲۰ پاسکال استفاده خواهد شد. برنامه دمایی ستون به این صورت خواهد بود که ابتدا به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد و سپس با سرعت ۴ درجه در دقیقه به دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید (Naderi, Farmani, & Rashidi, 2018).

اندازه‌گیری محتوای چربی جامد^۳

محتوای چربی جامد با استفاده از دستگاه اسپکتروسکوپ رزونانس مغناطیسی هسته^۴ (Bruker، آلمان) در دماهای ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با روش AOCS 16b-93 اندازه‌گیری شد. قبل از تجزیه و تحلیل در دماهای اندازه‌گیری، نمونه‌های چربی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شدند و (ارتفاع ۴ سانتی‌متر) در لوله‌های اندازه‌گیری SFC ریخته شد. سپس لوله‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه، ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، صفر درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه و در نهایت در دمای اندازه‌گیری به مدت ۴۵ دقیقه نگهداری گردید (Mahjoob et al., 2022).

آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری برای نمونه‌های اولئوژل در فاز اول با استفاده از طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل انجام شد. ۸ تیمار شامل ۴ سطح از نسبت‌های مختلف از امولسیفایرهای LACTEM و DATEM (۴۰:۰، ۳۰:۱۰، ۱۰:۳۰ و ۲:۲ سطح از هیدروکلوئید متیل سلولز (۰، ۲ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. کلیه محاسبات

3- Solid Fat Content (SFC)

4- Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)

1- Gas Chromatograph (GC)

2- Flame-Ionization Detector (FID)

مهاجرت آن به سطح جلوگیری می‌نماید (Tanti, Barbut, & Marangoni, 2016). ساختاری اولئوژل در شرایط تنش، ناشی از شکل‌گیری شبکه پلیمری مستحکمی است که فاز مایع را در حفرات ریز خود محبوس کرده و از

جدول ۲- ظرفیت نگهداری روغن در نمونه‌های اولئوژل در طی ۳۰ روز
Table 2- Oil Binding Capacity of oleogel samples over 30 days

نمونه Sample	ظرفیت نگهداری روغن روز اول Oil binding capacity on day one (%)	ظرفیت نگهداری روغن روز ۱۵ Oil binding capacity on day 15 (%)	ظرفیت نگهداری روغن ۳۰ ام Oil binding capacity on day 30 (%)
LACTEM40-MC0	100 ± 0.000 ^{gC}	99.750 ± 0.0141 ^{dB}	99.684 ± 0.0007 ^{aA}
LACTEM40-MC2	99.764 ± 0.0014 ^{CB}	99.685 ± 0.0212 ^{cA}	100 ± 0.000 ^{dC}
DATEM40-MC0	99.989 ± 0.0007 ^{fB}	85.713 ± 0.0049 ^{aA}	100 ± 0.000 ^{dC}
DATEM40-MC2	100 ± 0.000 ^{gC}	99.918 ± 0.0028 ^{eA}	99.932 ± 0.0042 ^{cB}
LACTEM/DATEM30:10-MC0	98.918 ± 0.0014 ^{aA}	99.106 ± 0.0021 ^{bB}	99.782 ± 0.0028 ^{bC}
LACTEM/DATEM30:10-MC2	99.939 ± 0.0014 ^{eA}	100 ± 0.000 ^{fB}	100 ± 0.000 ^{dB}
LACTEM/DATEM10:30-MC0	99.536 ± 0.0028 ^{bA}	100 ± 0.00 ^{fB}	100 ± 0.000 ^{dB}
LACTEM/DATEM10:30-MC2	99.837 ± 0.0021 ^{dA}	100 ± 0.000 ^{fB}	100 ± 0.000 ^{dB}

حروف کوچک متفاوت (a-f) در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) بین نمونه‌ها در یک روز مشخص است. حروف بزرگ متفاوت (A-C) در هر ردیف نیز نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) برای یک نمونه مشخص در طول زمان است.

Different lowercase letters (a-h) in each column indicate significant statistical differences among samples within a given day ($p < 0.05$). Different uppercase letters (A-C) in each row indicate significant statistical differences for a given sample over time ($p < 0.05$).

می‌دهد که حضور امولسیفایرهای DATEM در ساختار اولئوژل، نقش مؤثری در کنترل نرخ اکسیداسیون در مراحل پایانی انبارمانی داشته و پایداری اکسیداتیو مطلوب‌تری را نسبت به شورتینینگ تجاری فراهم آورده است. لازم به ذکر است که عدد پراکسید تنها نشان‌دهنده هیدروپراکسیدها به عنوان محصولات اولیه اکسیداسیون است. با توجه به اینکه این ترکیبات در مراحل پیشرفته‌تر اکسیداسیون به محصولات ثانویه (مانند آلدئیدها و کتون‌ها) تبدیل می‌شوند، عدد پراکسید به تنهایی تصویر کاملی از پایداری اکسیداتیو ارائه نمی‌دهد. بنابراین، یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر، عدم بررسی شاخص‌های مربوط به محصولات ثانویه اکسیداسیون است که با استفاده از آزمون‌هایی نظیر عدد آنیسیدین یا شاخص مواد واکنش‌دهنده با اسید تیوباربیتوریک^۱ سنجیده می‌شود (Shuai et al., 2024).

مطابق با نتایج این پژوهش، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل پس از ۳۰ روز بالاتر از نمونه‌ی شورتینینگ بوده است. این تفاوت عمدتاً به ماهیت و ترکیب چربی پایه هر دو محصول باز می‌گردد. شورتینینگ‌های تجاری معمولاً از روغن‌های هیدروژنه با درصد بالای اسیدهای چرب اشباع که مقاومت ذاتی بسیار بالایی در برابر اکسیداسیون دارند. در مقابل، اولئوژل‌های این مطالعه بر پایه روغن کانولا تولید شده‌اند که حاوی درصد بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع است و به‌طور ذاتی مستعد اکسیداسیون بیشتری نسبت به چربی‌های اشباع است. بنابراین، حتی با وجود اثر تثبیت‌کننده سیستم

عدد پراکسید

تحلیل نتایج حاصل از بررسی عدد پراکسید نشان داد که روند اکسیداسیون در اولئوژل‌ها به‌طور معناداری تحت تأثیر نسبت LACTEM/DATEM، سطح متیل‌سلولز و تعامل‌های دو عاملی آن‌ها قرار دارد ($p < 0.001$). در روز اول از تولید اولئوژل‌ها، بیشتر نمونه‌ها دارای عدد پراکسید زیر یک هستند، که نشان‌دهنده وضعیت اکسیداتیو مناسب اولیه است. پس از گذشت ۱۵ و ۳۰ روز از تولید نمونه‌ها افزایش عدد پراکسید در همه نمونه‌ها معنی‌دار می‌باشد. نتایج جدول ۳ حاکی از آن است که در روز ۳۰ام، تیمارهای تولید شده با استفاده از نسبت بالای LACTEM عدد پراکسید بالاتری را دارا می‌باشند (تا حدود ۲۰)، اما در نمونه‌های حاوی امولسیفایر DATEM به‌تنهایی یا مشتمل بر LACTEM/DATEM10-30، به‌ویژه در حضور متیل‌سلولز عدد پراکسید به‌طور معناداری پایین‌تر است ($p < 0.001$). بررسی روند تغییرات عدد پراکسید در طول ۳۰ روز نشان داد که اگرچه میزان اکسیداسیون اولیه در برخی نمونه‌های اولئوژل بالاتر از شورتینینگ بود، اما نرخ افزایش این شاخص در بازه زمانی ۱۵ تا ۳۰ روز برای نمونه‌های اولئوژل به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شورتینینگ بود. برای نمونه، در نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC2، عدد پراکسید در روز ۳۰ام نسبت به روز ۱۵ام، تنها ۱/۹۳ برابر افزایش داشت (از ۵/۹۳ به ۱۱/۴۹)، در حالی که این افزایش برای نمونه شورتینینگ معادل ۵/۰۶ برابر بود (از ۱/۱۸ به ۵/۹۸). این الگوی اکسیداسیون نشان

شد، اولئوژل‌های حاوی امولسیفایر DATEM بهترین اثر آنتی‌اکسیدانی را نشان دادند که احتمالاً به دلیل آرایش منظم و ساختار کریستالی متراکم آن‌هاست که جریان مولکول‌های روغن را محدود می‌کند (Chen, Zhu, Tian, & Li, 2024)

ویژگی‌های بافتی

تحلیل واریانس نشان داد که هر دو ویژگی بافتی (سختی و چسبندگی) به‌طور معناداری تحت تأثیر عوامل اصلی فرمولاسیون شامل نسبت دو امولسیفایر، سطح متیل سلولز و تعامل‌های دو عاملی قرار دارند ($p < 0.001$). آزمون توکی نیز تفاوت‌های آماری معناداری بین تیمارها در هر دو ویژگی نشان داد.

ژل‌ساز و امولسیفایرهای مورد استفاده، پایداری اکسیداتیو کلی اولئوژل‌ها نمی‌تواند به سطح بسیار بالای شورتینینگ‌های سنتی برسد. تأکید این پژوهش بر بهبود پایداری روغن مایع درون ساختار اولئوژل و ارائه یک جایگزین سالم‌تر برای چربی‌های ترانس، با حفظ ویژگی‌های عملکردی و بهبود پروفایل اسیدهای چرب، بوده است (Qiu et al., 2024). البته نکته قابل توجه دیگر این است که روند افزایش عدد پراکسید در نمونه‌های اولئوژل نسبت به شورتینینگ کندتر است که علت آن به واسطه تشکیل شبکه ژل سه‌بعدی در اولئوژل‌ها و به دام‌انداختن فیزیکی روغن است (Ghanbarzadeh & Najibi Hosseini, 2025). به علاوه یافته‌ها نشان می‌دهد که اولئوژل‌های مبتنی بر امولسیفایرهای استری همچون DATEM به‌طور مؤثر اکسیداسیون لیپید را کاهش داده‌اند. بر اساس مطالعه‌ای که درخصوص اثر ترکیب ۷ نوع امولسیفایر استری مختلف با ایزوله سویا بر خصوصیات اکسیداتیو اولئوژل انجام

جدول ۳- مقادیر عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل، روغن کانولا و شورتینینگ در طی ۳۰ روز
Table 3- Peroxide value of oleogel samples, canola oil and shortenings over 30 days

نمونه Sample	عدد پراکسید روز اول Peroxide value on day 1 Meq o2 kg ⁻¹	عدد پراکسید روز ۱۵ام Peroxide value on day 15 Meq o2 kg ⁻¹	عدد پراکسید روز ۳۰ام Peroxide value on day 30 Meq o2 kg ⁻¹
LACTEM40-MC0	0.395 ± 0.0001 ^{bA}	5.979 ± 0.0070 ^{eB}	17.931 ± 0.0042 ^{hC}
LACTEM40-MC2	0.986 ± 0.000 ^{eA}	5.938 ± 0.0021 ^{eB}	12.282 ± 0.0028 ^{dC}
DATEM40-MC0	0.987 ± 0.0002 ^{eA}	4.393 ± 0.0028 ^{cB}	13.162 ± 0.0035 ^{eC}
DATEM40-MC2	0.598 ± 0.0002 ^{cA}	3.319 ± 0.0014 ^{bB}	9.816 ± 0.0007 ^{bC}
LACTEM/DATEM30:10-MC0	0.395 ± 0.0004 ^{bA}	4.763 ± 0.0042 ^{dB}	19.909 ± 0.004 ^{iC}
LACTEM/DATEM30:10-MC2	0.748 ± 0.0640 ^{dA}	5.947 ± 0.0035 ^{eB}	16.063 ± 0.0028 ^{gC}
LACTEM/DATEM10:30-MC0	0.395 ± 0.0004 ^{bA}	4.795 ± 0.0014 ^{dB}	13.536 ± 0.0056 ^{fC}
LACTEM/DATEM10:30-MC2	0.198 ± 0.0003 ^{aA}	5.939 ± 0.0014 ^{eB}	11.499 ± 0.0015 ^{cC}
روغن کانولا Canola oil	1.993 ± 0.0003 ^{fA}	5.984 ± 0.0017 ^{eB}	21.342 ± 0.0008 ^{iC}
شورتینینگ (شاهد) Shortening	0.3929 ± 0.0003 ^{bA}	1.181 ± 0.0007 ^{aB}	5.983 ± 0.0011 ^{aC}

حروف کوچک متفاوت (a-h) در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) بین نمونه‌ها در یک روز مشخص است. حروف بزرگ متفاوت (A-C) در هر ردیف نیز نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) برای یک نمونه مشخص در طول زمان است.

Different lowercase letters (a-h) in each column indicate significant statistical differences among samples within a given day ($p < 0.05$). Different uppercase letters (A-C) in each row indicate significant statistical differences for a given sample over time ($p < 0.05$).

بافت اولئوژل و محصول حاصل می‌گردد (Wu et al., 2024). همچنین در پژوهشی که درخصوص توانایی چند نوع از مولکول‌های کوچک آمفی‌فیلک همچون امولسیفایر LACTEM بر خصوصیات مکانیکی اولئوژل‌های ساختاردهی شده با اتیل سلولز انجام شده است، نتایج حاکی از این بود که امولسیفایر LACTEM موجب افزایش استحکام ساختار اولئوژل می‌گردد.

نیروی چسبندگی

سختی بافت

از نظر ویژگی سختی بافت، باتوجه به نتایج جدول ۴ به‌نظر می‌رسد که نمونه‌های حاوی دو نسبت مختلف از LACTEM/DATEM امولسیفایر همراه یا بدون MC همچون LACTEM/DATEM10:30-MC2 و MC0 مشابهت بیشتری با نمونه شاهد دارند، به‌ویژه دو نمونه اول که از نظر آماری نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای با نمونه شورتینینگ دارا نمی‌باشند ($p < 0.001$). مشابه با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، نتایج تحقیقی دیگر حاکی از آن بود که افزایش غلظت متیل سلولز موجب افزایش سختی

ذوب لغزشی را دارا می‌باشد و پس از آن نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC2 بیشترین میزان این پارامتر را به خود اختصاص می‌دهد.

مشابه با نتایج این پژوهش، نتایج مطالعات پژوهشگران نشان می‌دهد که باوجود اینکه میزان محتوای چربی جامد اولئوژل‌ها پایین‌تر از نمونه شورتنینگ است، مقدار نقطه ذوب لغزشی نمونه‌های اولئوژل به‌خصوص در نمونه‌های حاوی نسبت‌های مختلف از LACTEM/DATEM، در مقایسه با شورتنینگ از نظر عددی نزدیک یا بالاتر است که این امر ناشی از توانایی مواد ژل‌ساز در به‌دام‌اندازی فاز روغنی دارد (Naeli et al., 2020 ; Naeli et al., 2021).

همانطور که در جدول ۴ نمایش داده شده است، از نظر نیروی چسبندگی نمونه LACTEM/DATEM10:30-15-MC0، تفاوت آماری معناداری با نمونه شورتنینگ نشان نمی‌دهد ($p < 0.001$).

نقطه ذوب لغزشی

تحلیل واریانس نشان داد که عوامل اصلی فرمولاسیون شامل نسبت LACTEM/DATEM، سطح متیل‌سلولز و تعامل‌های دو عاملی اثر معنی‌داری بر این پارامتر دارند ($p < 0.001$). نتایج آزمون تعقیبی توکی نیز حاکی از این بود که تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای مختلف وجود دارد. همانطور که نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد، نمونه LACTEM/DATEM10:30-MC0 بالاترین میزان نقطه

جدول ۴- ویژگی‌های بافتی و نقطه ذوب لغزشی نمونه‌های اولئوژل و شورتنینگ

Table 4- Textural properties and slip melting point of oleogel samples and shortenings

نمونه Sample	سفتی Hardness (g)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)	نقطه ذوب لغزشی Slip melting point (°C)
LACTEM40-MC0	1.412 ± 0.104 ^a	0.799 ± 0.063 ^a	41.501 ± 0.707 ^a
LACTEM40-MC2	3.645 ± 0.169 ^c	2.111 ± 0.075 ^c	43.502 ± 0.705 ^b
DATEM40-MC0	5.864 ± 0.139 ^f	3.489 ± 0.146 ^e	48.504 ± 0.708 ^d
DATEM40-MC2	2.993 ± 0.183 ^b	5.333 ± 0.139 ^f	50.503 ± 0.706 ^{de}
LACTEM/DATEM30:10-MC0	4.267 ± 0.080 ^d	1.711 ± 0.075 ^b	48.501 ± 0.705 ^d
LACTEM/DATEM30:10-MC2	4.570 ± 0.103 ^d	4.971 ± 0.150 ^f	52.507 ± 0.708 ^e
LACTEM/DATEM10:30-MC0	5.280 ± 0.090 ^e	2.959 ± 0.013 ^d	55.503 ± 0.705 ^f
LACTEM/DATEM10:30-MC2	5.579 ± 0.102 ^{ef}	3.622 ± 0.077 ^e	53.507 ± 0.709 ^{ef}
شورتنینگ Shortening	5.024 ± 0.186 ^e	2.956 ± 0.026 ^d	46.506 ± 0.543 ^c

حروف متفاوت نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است ($p < 0.05$).

Different letters indicate significant differences between the data ($p < 0.05$).

چربی جامد

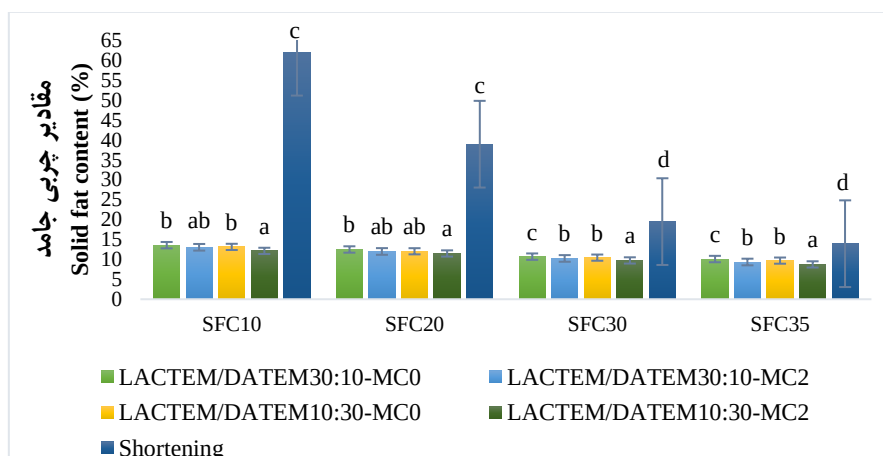
میزان SFC نشان‌دهنده نسبت چربی در فاز کریستالی به میزان کل چربی در دمای مشخص است و مستقیماً بر ویژگی‌های رئولوژیکی، پخش‌پذیری و حسی محصولات اثر می‌گذارد. میزان SFC به سطح اشباعیت، توزیع اسیدهای چرب در تری‌گلیسریدها، میزان ذرات کریستالی بستگی دارد. همان‌طور که نتایج حاصل از شکل ۱ نشان می‌دهد، میزان SFC در نمونه شورتنینگ در تمامی دماها به‌میزان قابل ملاحظه‌ای بالاتر از نمونه‌های اولئوژل بهینه است که البته تفاوت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد کمتر است. در میان نمونه‌های اولئوژل بهینه نیز، LACTEM/DATEM30:10-15-MC2 دارای بالاترین میزان SFC بود. این تفاوت در دماهای ۲۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد با سایر نمونه‌های اولئوژل معنی‌دار بود ($p < 0.001$). به‌طور مشابه با نتایج این پژوهش، در بررسی انجام شده روی اولئوژل کم‌اشباع تولید شده با استفاده از اتیل سلولز یا ترکیب اتیل سلولز/هیدروکسی‌پروپیل متیل سلولز و پالم استارین در مقایسه با نمونه‌های شورتنینگ تجاری، میزان SFC

نتایج فاز دوم

پس از غربالگری اولیه در فاز اول، چهار فرمولاسیون بهینه جهت انجام آنالیزهای تکمیلی در فاز دوم تحقیق انتخاب شدند. فرآیند انتخاب بر اساس یک رویکرد چندشاخصه با هدف شناسایی فرمولاسیون‌هایی با بیشترین پتانسیل جایگزینی شورتنینگ صورت گرفت. معیارهای اصلی انتخاب عبارت بودند از: الف) خواص بافتی نزدیک به نمونه شورتنینگ تجاری (به‌ویژه سختی) ب) ظرفیت نگهداری روغن بالابیشتر از ۹۸ درصد ج) پایداری اکسیداتیو برتر که با نرخ افزایش پایین‌تر عدد پراکسید در طول دوره نگهداری مشخص شد. علاوه بر این، جهت مطالعه اثر هم‌افزایی امولسیفایرها و نقش هیدروکلوئید، فرمولاسیون‌های حاوی نسبت‌های ترکیبی از LACTEM و DATEM (۱۰:۳۰ و ۱۰:۳۰) در هر دو سطح متیل سلولز (۰ و ۲ درصد) برای فاز دوم برگزیده شدند و نمونه‌های حاوی تنها یک نوع امولسیفایر از ادامه مطالعات حذف گردیدند.

برهم‌کنش‌های پلیمر-امولسیفایر و پلیمر-حلال (روغن) و امولسیفایر-حلال، فاکتورهای اصلی ایجادکننده ساختار و قوام می‌باشند. هرچه این برهم‌کنش‌ها بیشتر و قوی‌تر باشند، میزان روغن آزاد کمتر بوده و ساختار ژل مستحکم‌تر خواهد بود (Naeli et al., 2021).

در نمونه‌های شورتینینگ به‌طور معنی‌داری بیشتر از اولئوژل بهینه‌شده بود. دلیل این امر، تفاوت در مکانیزم ایجاد ساختار در سیستم‌های چربی متداول و اولئوژل‌ها است. در یک سیستم چربی (مانند شورتینینگ)، میزان چربی جامد و سطح اشباعیت، عوامل اصلی ایجاد ساختار و قوام هستند؛ در حالی‌که در سیستم‌های اولئوژل مبتنی بر بیوپلیمر،



شکل ۱- مقادیر چربی جامد نمونه‌های اولئوژل بهینه و شورتینینگ در دماهای مختلف (۱۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد)

حروف کوچک متفاوت (a-e) در هر دسته دمایی، نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار بین نمونه‌ها هستند ($p < 0.05$).

Fig. 1. Solid fat content (SFC) of optimized oleogel samples and shortening at different temperatures (10-35 °C)
Different lowercase letters (a-e) within each temperature cluster indicate significant statistical differences among samples ($p < 0.05$).

درصد گزارش شد. این نتایج نشان‌دهنده برتری تغذیه‌ای اولئوژل‌های بهینه‌شده نسبت به نمونه‌های تجاری است (Naeli et al., 2021).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم ماده ژل ساز چندجزئی با بهره‌گیری از روش نوین انحلال مستقیم متیل‌سلولز در ماتریس مذاب امولسیفایرهای LACTEM، DATEM و DMG طراحی شد تا چالش‌های ناشی از پیچیدگی و هزینه بالای تولید اولئوژل‌های حاوی هیدروکلوئید مرتفع گردد. نتایج آزمایش نشان داد که تیمارهای ترکیبی LACTEM/DATEM به همراه متیل سلولز پایداری روغن مطلوبی در دوره ۳۰ روزه داشته‌اند و به‌عنوان مؤثرترین تیمار در حفظ کیفیت روغن عمل کرده‌اند. همچنین از نظر ویژگی‌های فیزیکی بافت، نمونه‌های حاوی امولسیفایر DATEM با نسبت‌های بالاتر، شباهت معناداری به نمونه شاهد داشته و از نظر آماری تفاوتی با نمونه شورتینینگ نداشته‌اند. با این که عدد پراکسید نمونه‌های اولئوژل در روز ۳۰ام از نمونه شورتینینگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر بود، اما نرخ افزایش عدد پراکسید در نمونه‌های اولئوژل نسبت به شورتینینگ، خصوصاً در نمونه LACTEM/DATEM10-30-MC2 (افزایش

ترکیب اسیدهای چرب

همانطور که در جدول ۵ نمایش داده شده است، میزان اسید چرب اشباع (۵۲/۳۹ درصد)، اسید چرب ترانس (۳/۵۲ درصد) در نمونه شورتینینگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از نمونه‌های اولئوژل (به‌ترتیب ۱۷/۷ - ۱۶/۷۷ و ۰/۸۲ - ۰/۷۸ درصد) بهینه است ($p < 0.001$). همچنین اسید پالمیتیک (۳۹/۴۸ درصد) و اسید اولئیک (۳۵/۰۹ درصد) اسیدهای غالب تشکیل‌دهنده نمونه شورتینینگ هستند. در مقایسه با نمونه شورتینینگ در نمونه‌های اولئوژل بهینه اسیدهای چرب غالب اسید اولئیک (۴۰/۶۸ - ۴۰/۲۲ درصد) و اسید لینولئیک (۳۳/۸۰ - ۳۳/۵۶ درصد) می‌باشند. زیرا معمولاً از فراکسیون‌های روغن پالم برای تهیه شورتینینگ‌ها استفاده می‌شود. اما روغن کانولا غنی از اسید اولئیک (۱۸:۱) و لینولئیک (۱۸:۲) می‌باشد که ترکیب اصلی اسید چرب روغن‌های دانه‌ای هستند. نتایج دیگر پژوهش‌ها نیز حاکی از آن بود که اسیدهای چرب غالب در شورتینینگ تجاری، اسید پالمیتیک و اسید اولئیک بودند (به‌ترتیب ۳۴/۸۳ و ۳۴/۴۳ درصد) که نشان‌دهنده استفاده از روغن پالم یا مشتقات آن در فرمولاسیون شورتینینگ است. همچنین، میزان اسیدهای چرب ترانس در نمونه‌های اولئوژل‌ها حدود ۰/۱ درصد بود، در حالی‌که در نمونه‌های تجاری به‌طور متوسط ۲/۹۵

۱۶/۷۷ تا ۱۷/۷ درصدی اسیدهای چرب اشباع و کاهش ۰/۷۸ تا ۰/۸۲ درصدی اسیدهای چرب ترانس گردید. نتایج حاصل از این پژوهش تأیید نمود که به کارگیری سیستم ماده ژل ساز کلونیدی چندجزئی مشتمل بر هیدروکلونید متیل سلولز و مخلوطی از امولسیفایرها با وزن مولکولی پایین، تولید اولئوژل‌های پایدار بر پایه روغن کانولا را با حفظ ویژگی‌های عملکردی و فیزیکی‌شیمیایی شورتینگ تجاری و بهبود شاخص‌های سلامت میسر می‌سازد.

۱/۹۳ برابری نسبت به ۵/۰۶ برابری) پایین‌تر بود. در اینجا لازم است تأکید شود که عدد پراکسید تنها نشان‌دهنده محصولات اولیه اکسیداسیون است و برای ارزیابی جامع‌تر پایداری اکسیداتیو و تشکیل محصولات ثانویه، بررسی سایر شاخص‌های اکسیداسیون نظیر عدد آنیسیدین یا شاخص مواد واکنش‌دهنده با اسید تیوباریتوریک در مطالعات آتی توصیه می‌شود. همچنین، جایگزینی اولئوژل‌های بهینه منجر به بهبود چشمگیر پروفایل اسیدهای چرب از طریق کاهش

جدول ۵- پروفایل اسید چرب نمونه‌های اولئوژل، روغن کانولا و شورتینگ
Table 5- Fatty acids profile of oleogel samples, canola oil and shortening

نمونه Sample	پالمیک اسید C16:0%	استتاریک اسید C18:0%	اولئیک اسید C18:1%	لینولئیک اسید C18:2%	لینولئیک اسید C18:3%	مجموع اسیدهای چرب اشباع Total saturated fatty acids	مجموع اسیدهای چرب ترانس Total trans fatty acids
LACTEM/DATEM30:10-MC0	10.465±0.049 ^b	6.705±0.021 ^c	40.69±0.014 ^d	33.645±0.070 ^c	3.925±0.070 ^b	17.265±0.021 ^d	0.820±0.00 ^b
LACTEM/DATEM30:10-MC2	10.275±0.035 ^b	6.510±0.028 ^b	40.645±0.007 ^{cd}	33.810±0.014 ^d	4.061±0.001 ^c	16.870±0.028 ^c	0.780±0.00 ^a
LACTEM/DATEM10:30-MC0	10.700±0.070 ^b	6.815±0.035 ^d	40.230±0.014 ^b	33.065±0.071 ^b	3.930±0.014 ^b	17.730±0.042 ^e	0.781±0.00 ^a
LACTEM/DATEM10:30-MC2	10.170±0.042 ^b	6.470±0.014 ^b	40.560±0.007 ^c	33.750±0.014 ^d	3.985±0.07 ^b	16.750±0.028 ^b	0.790±0.00 ^a
شورتینگ (شاهد) Shortening	39.425±0.077 ^c	11.885±0.021 ^e	35.105±0.021 ^a	6.785±0.021 ^a	0.390±0.014 ^a	52.410±0.028 ^f	3.525±0.007 ^d
روغن کانولا Canola oil	5.570±0.424 ^a	3.077±0.010 ^a	44.635±0.063 ^e	37.310±0.028 ^e	4.925±0.035 ^d	8.540±0.014 ^a	0.900±0.00 ^c

حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است (p<0.05).
Different letters indicate significant differences between the data (p<0.05).

منابع تأمین مالی

تأمین مالی این پژوهش توسط دانشگاه فردوسی مشهد (گرت پژوهشی به شماره ۳/۵۶۵۵) و همچنین شرکت پارس بهبود آسیا انجام پذیرفته است.

سپاسگزاری

از مساعدت‌های مالی، تأمین امولسیفایرها، فراهم‌سازی امکانات آزمایشگاهی و همکاری‌های تخصصی شرکت پارس بهبود آسیا در روند پیشبرد این مطالعه، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

میزان مشارکت نویسندگان

مریم قناد رضایی: مدیریت داده، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش، مصطفی مظاهری طهرانی: مفهوم‌سازی، مدیریت پروژه، نظارت، نوشتن - بررسی و

References

- Aliasl Khiabani, A., Tabibiazar, M., Roufegarinejad, L., & Hamishehkar, H. (2020). Preparation and characterization of carnauba wax/adipic acid oleogel: A new reinforced oleogel for application in cake and beef burger. *Food Chemistry*, 333(1), 127446. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127446>
- AOCS, F.D. (1998). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society. *AOCS*, 5, 2-93.
- Chen, X., Ding, S., Chen, Y., Lan, D., Wang, W., & Wang, Y. (2023). Assessing the effectiveness of peanut

- diacylglycerol oil-ethylcellulose /monoglyceride-based oleogel in sponge cake as a margarine replacer. *Food Bioscience*, 55(5), 102959. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102959>
4. Chen, X., Zhu, J., Tian, D., & Li, Z. (2024). Preparation of soybean protein isolate – ester emulsifier oleogels and comparative study of their structure and properties. *Food Chemistry*, 461(8), 140927. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140927>
5. Ghanbarzadeh, S.M.N.H.B. (2025). Effect of surfactant type on the properties of peanut oil-based oleogels and their functionality in butter cake introduction. *Iranian Food Science and Technology Association*, 21(5), 477–496. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.93859.1442>
6. Hasenhuettl, G.L. (2019). Overview of food emulsifiers. *Food Emulsifiers and Their Applications*, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29187-7_1
7. Liu, P., Pei, H., Shen, J., Xu, C., & Zhao, H. (2024). Effect of surfactin on the properties of glycerol monostearate – Based oleogels. *Food Structure*, 40(1), 100370. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2024.100370>
8. Lopez-martínez, A., Charó-alonso, M.A., Marangoni, A.G., & Toro-vazquez, J.F. (2015). Monoglyceride organogels developed in vegetable oil with and without ethylcellulose. *Food Research International*, 72(3), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.019>
9. Mahjoob, R., Hakimzadeh, V., Ataye, E., & Jamshid, S. (2022). The interaction of polyglycerol esters with sorbitan tristearate , and sorbitan monostearate in structuring a low - saturated fat. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 4174–4184. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01460-9>
10. Mao, J., Ye, W., & Meng, Z. (2024). The relationship between nonlinear viscoelasticity and baking performance in low-saturated puff pastry margarine. *Food Chemistry*, 452(1), 139436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139436>
11. Meng, Z., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2019). Organogels based on the polyglyceryl fatty acid ester and sunflower oil: Macroscopic property, microstructure, interaction force, and application. *LWT - Food Science and Technology*, 116(3), 108590. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108590>
12. Naderi, M., Farmani, J., & Rashidi, L. (2018). The impact of saturated monoacylglycerols on the oxidative stability of Canola oil under various time/temperature conditions. *Grasas y Aceites*, 69(3), 267–276. <https://doi.org/10.3989/gya.0346181>
13. Naderi, M., Mohammad, A., Rashidi, L., & Mahdi, S. (2024). Rapeseed oleogels based on monoacylglycerols and methylcellulose hybrid oleogelators : Physicochemical and rheological properties. *Food Chemistry: X*, 23(1), 101520. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101520>
14. Naeli, M.H., Milani, J.M., Farmani, J., & Zargaraan, A. (2020). Development of innovative ethyl cellulose-hydroxypropyl methylcellulose biopolymer oleogels as low saturation fat replacers : Physical , rheological and microstructural characteristics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156(4), 792–804. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.087>
15. Naeli, M.H., Milani, J.M., Farmani, J., & Zargaraan, A. (2021). Developing and optimizing low-saturated oleogel shortening based on ethyl cellulose and hydroxypropyl methyl cellulose biopolymers. *Food Chemistry*, 369(8), 130963. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130963>
16. Odilichukwu, C., Okpala, R., Bono, G., Luca, M., Sardo, G., Vitale, S., & Schaschke, C.J. (2016). Food Bioscience Lipid oxidation kinetics of ozone-processed shrimp during iced storage using peroxide value measurements. *Food Bioscience*, 16(12), 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.07.005>
17. Pakseresht, S., Tehrani, M.M., Farhoosh, R., & Koocheki, A. (2023). Rheological and thermal properties of reinforced monoglyceride-carnauba wax oleogels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(8), 1244. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12443>
18. Palla, C.A., Dominguez, M., & Carrín, M.E. (2022). An overview of structure engineering to tailor the functionality of monoglyceride oleogels. *January*, 2587–2614. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12930>
19. Patel, A.R., & Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. *Food & Function*, 7(1), 20–29. <https://doi.org/10.1039/C5FO01006C>
20. Qiu, H., Zhang, H., Bang, J., & Monoacylglycerol, M.A.G. (2024). Oleogel classification , physicochemical characterization methods , and typical cases of application in food : a review. *Food Science and Biotechnology*, 33(6), 1273–1293. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01501-z>
21. Rodríguez-hern, A.K. (2021). Rheological properties of ethyl cellulose-monoglyceride-candelilla wax oleogel vis-a-vis edible shortenings. *Carbohydrate Polymers*, 252(9), 117171. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117171>
22. Shahidi, F. (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Industrial and Nonedible Products from Oils and Fats* (Vol. 6). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/047167849x>
23. Shuai, X., Li, Y., Zhang, M., Wei, C., Du, L., Liu, C., Chen, J., & Dai, T. (2024). Effect of different oleogelation mechanisms on physical properties and oxidative stability of macadamia oil-based oleogels and its application. *LWT*

- *Food Science and Technology*, 198(3), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115978>
24. Tanti, R., Barbut, S., & Marangoni, A.G. (2016). Hydroxypropyl methylcellulose and methylcellulose structured oil as a replacement for shortening in sandwich cookie creams. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.032>
25. Uslu, E.K., & Yilmaz, E. (2021). Preparation and characterization of glycerol monostearate and polyglycerol stearate oleogels with selected amphiphiles. *Food Structure*, 28(4), 100192. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100192>
26. Wang, X., Ma, D., Qiu, C., Wang, Y., & Liu, Y. (2022). Physical properties of oleogels fabricated by the combination of diacylglycerols and monoacylglycerols. *Journal of the American Oil Chemist's Science*, 99(11), 1007–1018. <https://doi.org/10.1002/aocs.12622>
27. Wang, Z., Chandrapala, J., Truong, T., & Farahnaky, A. (2022). Oleogels prepared with low molecular weight gelators : Texture , rheology and sensory properties , a review and sensory properties , a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 23(1), 1–45. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2027339>
28. Wu, Y., Sun, S., Li, X., Li, X., Huang, Y., An, F., Huang, Q., & Song, H. (2024). Fabrication, characterization, and fat substitution application in chocolate spreads of methyl cellulose and xanthan gum foam- templated oleogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283(11), 137677. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137677>
29. Xu, Y., Sun, H., Lv, J., Wang, Y., Zhang, Y., & Wang, F. (2023). Effects of polysaccharide thickening agent on the preparation of walnut oil oleogels based on methylcellulose : Characterization and delivery of curcumin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 232(1), 123291. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123291>
30. Zampouni, K. (2024). Microstructure, physical properties, and oxidative stability of olive oil oleogels composed of sunflower wax and monoglycerides. *Gels*, 195(10), 3–17. <https://doi.org/10.3390/gels10030195>

Research Article
Vol. 22, No. 2, May-June, 2026, p. 207-223

Production of Active Biodegradable Antioxidant and Antibacterial Films Based on Salep Powder, Turmeric Powder, and Selenium Powder: A Novel Approach to Sustainable Packaging

S. Mansouryar^{1*}, S. Pirsā¹, M.KH. Pirouzifard¹

1- Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia, Iran

(* - Corresponding Author Email: st_s.mansuryar@urmia.ac.ir)

Received: 06.05.2026	How to cite this article: Mansouryar, S., Pirsā, S., & Pirouzifard, M.KH. (2026). Production of active biodegradable antioxidant and antibacterial films based on salep powder, turmeric powder, and selenium powder: A novel approach to sustainable packaging. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 22(2), 207-223. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98584.1571
Revised: 23.05.2026	
Accepted: 24.05.2026	
Available Online: 31.05.2026	

Introduction

The widespread use of synthetic plastics in packaging is a major global environmental problem, contributing to greenhouse gas emissions and pollution. Most plastics are non-biodegradable, accumulated in the environment, fragmented into ecosystems, and eventually give rise to harmful microplastics. Incineration of plastics also releases toxic gases, further polluting the air. Developing biodegradable alternatives from natural sources like proteins and polysaccharides is crucial for sustainable packaging. These biopolymer films, like those made from salep and enhanced with natural additives such as turmeric and selenium, offer improved functionality including antioxidant and antibacterial properties.

Materials and Methods

Salep and turmeric powders were obtained from medicinal plant stores in Urmia, West Azerbaijan, Iran, while glycerol (99% purity) and selenium powder were purchased from Merck, Germany, and used without further purification. For film preparation, predetermined amounts of turmeric powder were dispersed in 100 mL of distilled water and stirred at 40–50°C and 500 rpm for 15 min, then filtered through a cloth filter to remove coarse particles. The required amount of selenium powder was added to the filtrate and stirred for another 15 min under the same conditions. Next, 2 g of salep powder were gradually added through a fine sieve to obtain a homogeneous mixture, followed by glycerol addition at 30% w/w relative to salep. Finally, 25 mL of the prepared solution was cast into 10-cm Petri dishes and dried at room temperature for 24 h. In total, 13 film formulations were prepared according to the statistical design.

Results and Discussion

The results demonstrated that increasing the turmeric concentration enhanced the yellowness (b^*) and decreased the lightness (L^*) of the films, while the addition of selenium shifted the color toward the green/blue spectrum (a^*). Regarding functional properties, turmeric exhibited antibacterial activity, particularly against Gram-positive bacteria, whereas selenium alone showed no effect; however, their combination revealed a strong synergistic antibacterial effect. A similar synergy was observed in antioxidant activity, where selenium stabilized and enhanced the effect driven by turmeric. Optical analysis indicated that turmeric increased light absorption and reduced transparency. Interestingly, the combination of turmeric and selenium reduced transparency less than individual components, suggesting its potential for protective packaging. FESEM imaging revealed that turmeric created a smooth, homogeneous surface, whereas selenium alone formed rough clusters; notably, their combination



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.2026.98584.1571>

resulted in a more uniform surface by counteracting selenium aggregation. Finally, the UV–Vis spectrum of the turmeric extract confirmed the presence of three main absorption peaks at 342 nm (isomers), 380 nm (curcumin tautomers), and 457 nm (curcumin), with the latter shift attributed to the polarity and hydrogen bonding effects of the water solvent.

Conclusion

This study, focusing on the development of biodegradable films based on salep powder reinforced with turmeric and selenium powders, demonstrated the potential of exploiting the synergy between them. Active biodegradable films using salep, turmeric, and selenium were developed in this study. Turmeric enhanced properties, while selenium boosted performance synergistically, improving antibacterial activity and structural stability. Tailoring film features offers protective packaging, reducing plastic waste and enabling intelligent packaging.

Keywords: Active film, Biodegradable film, Salep powder, Selenium powder, Turmeric powder

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، خرداد- تیر ۱۴۰۵، ص. ۲۲۳-۲۰۷

تولید فیلم‌های فعال زیست‌تخریب‌پذیر آنتی‌اکسیدان و آنتی‌باکتریال بر پایه پودر ثعلب، پودر زردچوبه و پودر سلینیوم: رویکردی نوین در بسته‌بندی پایدار

سمیه منصوریار^{۱*} - سجاد پیرسا^۱ - میرخلیل پیروزی فرد^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

چکیده

افزایش بی‌رویه تولید و مصرف پلاستیک‌های سنتزی در صنعت بسته‌بندی به یکی از معضلات کلیدی زیست‌محیطی قرن حاضر تبدیل شده است. پیامدهای این روند شامل انباشت پلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های خاکی و آبی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، آزادسازی میکرو و نانوپلاستیک‌ها، و بروز اثرات مخرب بر سلامت موجودات زنده است. در پاسخ به این چالش جهانی، پژوهش حاضر به توسعه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب به عنوان یک زیست‌پلیمر تجدیدپذیر پرداخته و با تقویت آن توسط پودر زردچوبه (*Curcuma longa*) و پودر سلینیوم، سامانه‌ای نوین برای بسته‌بندی فعال ارائه می‌دهد. فیلم‌های زیستی تهیه شده، حاوی فرمولاسیون‌های مختلف پودر زردچوبه و سلینیوم، تحت آزمون‌های جامع رنگ‌سنجی (CIELAB)، طیف‌سنجی UV-Vis، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)، آزمون ضدباکتری (*S. aureus* و *E. coli*) و تحلیل میکروسکوپی FESEM مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن زردچوبه منجر به افزایش شاخص b^* (زردی)، کاهش L^* (روشنایی) و بهبود یکنواختی ریزساختاری شد؛ در حالی که سلینیوم تغییرات قابل‌توجهی در شاخص a^* و ایجاد خوشه‌های نامنظم سطحی را سبب گردید. اثر همزمان دو افزودنی موجب بهبود تعادل رنگی و کاهش آگلومراسیون شد. از منظر عملکردی، فیلم‌های حاوی زردچوبه فعالیت ضد میکروبی قابل‌توجهی، به‌ویژه در برابر *S. aureus*، از خود نشان دادند؛ در حالی که سلینیوم به تنهایی فاقد اثر مهاری بود. با این حال، ترکیب زردچوبه و سلینیوم یک تعامل هم‌افزای واقعی ایجاد کرده و موجب افزایش چشمگیر بازدارندگی رشد باکتری شد. آزمون DPPH نیز حاکی از فعالیت آنتی‌اکسیدانی بسیار بالا (۹۳٪-۱۰۰٪) بود که بیشترین اثر در فرمولاسیون ترکیبی مشاهده گردید. نتایج طیف‌سنجی UV-Vis نشان داد حضور زردچوبه جذب نوری را به‌ویژه در ناحیه مرئی (حدود ۶۰۰ نانومتر) تقویت کرده و شفافیت فیلم را کاهش می‌دهد، در حالی که سلینیوم اثر مکمل و تنظیم‌کننده داشت. تصاویر FESEM نیز تأیید کردند که زردچوبه موجب بهبود همگنی سطحی و سلینیوم به تنهایی موجب آگلومراسیون می‌شود، اما ترکیب آن‌ها ساختاری پایدارتر ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: پودر ثعلب، پودر زردچوبه، پودر سلینیوم، فیلم زیست‌تخریب‌پذیر، فیلم فعال

مقدمه

افزایش بی‌سابقه مصرف پلاستیک‌های سنتزی در صنعت بسته‌بندی، به‌ویژه در حوزه مواد غذایی به یکی از جدی‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است (Ncube, Ude, 2021).

Ogunmuyiwa, Zulkifli, & Beas, 2021; Kumar et al., 2021). تنها در سال ۲۰۱۹ حدود ۱/۸ میلیارد تن گازهای گلخانه‌ای ناشی از پلاستیک‌ها منتشر شد که ۳/۴٪ کل انتشار جهانی را شامل می‌شود (International Institute for Sustainable Development, 2021).

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: st_s.mansuryar@urmia.ac.ir)

بر تهیه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر آنتی‌اکسیدان و ضد میکروبی با استفاده از پودر ثعلب، پودر زردچوبه و سلیوم تمرکز دارد. اهداف اصلی این مطالعه، ارتقاء خواص محافظتی فیلم‌ها با بهره‌گیری از اثرات هم‌افزای این مواد طبیعی و معدنی است. پژوهش حاضر در آزمایشگاه دانشگاه ارومیه طی سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۴ انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی

در این پژوهش، پودر ثعلب و زردچوبه به عنوان منبع طبیعی و دارای ترکیبات کورکومینوئیدی، از فروشگاه‌های گیاهان دارویی شهر ارومیه (آذربایجان غربی-ایران) تهیه شد. گلیسرول با خلوص ۹۹٪ و پودر سلیوم از شرکت مرک (آلمان) خریداری گردید. کلیه مواد شیمیایی، بدون هیچ گونه خالص سازی یا فرآوری اضافی مورد استفاده قرار گرفتند.

تهیه فیلم

برای آماده سازی فیلم‌ها، در ابتدا محلولی حاوی پودر زردچوبه و پودر سلیوم تهیه شد. میزان سلیوم طبق طرح آماری و با هدف ارتقای عملکرد فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر تعیین شد. از آنجا که این ترکیب در ساختار فیلم به کار رفته و مصرف مستقیم ندارد، مقدار آن به گونه‌ای تنظیم شد که ضمن حفظ کارایی، خللی در ساختار فیلم ایجاد نکند. بدین منظور، مقادیر تعیین شده‌ای از پودر زردچوبه طبق طرح آماری (جدول ۱) در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه گردید و مخلوط حاصل روی هیتر مغناطیسی در دمای ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد با سرعت ۵۰۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه هم زده شد تا پراکنش یکنواختی ایجاد شود. محلول حاصل با استفاده از صافی پارچه‌ای صاف شد تا ذرات درشت و نامنظم حذف شوند. سپس مقدار مشخصی از پودر سلیوم (مطابق طرح آماری جدول ۱) به محلول صاف شده افزوده شد و ترکیب به مدت ۱۵ دقیقه دیگر تحت همان شرایط دما و هم زدن قرار گرفت تا توزیع یکنواختی از ذرات سلیوم به دست آید. در ادامه، برای جلوگیری از تشکیل حباب و گلوله شدن، مقدار ۲ گرم پودر ثعلب به صورت تدریجی و طی چند مرحله از طریق الک ریز به محلول اضافه گردید تا مخلوطی یکنواخت حاصل شود. پس از آن، گلیسرول با نسبت ۳۰ درصد وزنی نسبت به ماده خشک به ترکیب افزوده شد و مخلوط نهایی کاملاً همگن گردید. در مرحله پایانی، ۲۵ میلی لیتر از محلول آماده در پلیت‌های دایره‌ای با قطر ۱۰ سانتی متر ریخته شد و در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. پس از خشک شدن کامل، فیلم‌ها به آرامی از قالب جدا شدند و تا زمان استفاده در کیسه‌های زیپ‌دار در یخچال نگهداری گردیدند (Ekrami & Emam-Djomeh, 2014; Lu et al., 2020; Akter et al., 2019). در مجموع ۱۳ نوع فیلم با فرمولاسیون‌های

(Development, 2023; OECD, 2023). تولید جهانی پلاستیک در همین سال به ۳۷۰ میلیون تن رسید، اما تنها ۹٪ از آن بازیافت شد و بخش عمده در محیط باقی ماند (Agarwal, Shaida, Rastogi, & Singh, 2023; Babaremu, Oladijo, & Akinlabi, 2023). انباشت این مواد، آلودگی خاک، منابع آبی و اقیانوس‌ها را تشدید کرده و به نابودی اکوسیستم‌ها منجر شده است (Kibria, Masuk, Safayet, Nguyen, & Mourshed, 2023; Dey, Veerendra, Babu, Manoj, & Nagarjuna, 2024; Krantzberg, 2019). از طریق سوزاندن نیز با تولید گازهای سمی، آلودگی هوا و افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن همراه است (Sharma, Sharma, & Chatterjee, 2023; Kumar, Vyas, Sharma, & Dehalwar, 2024). پلاستیک‌ها پس از تجزیه به میکرو و نانوذرات در بافت‌های انسانی و زنجیره غذایی شناسایی شده‌اند (Enyoh, Devi, Kadono, Wang, & Rabin, 2023; Ghosh et al., 2023). این ذرات اثرات مخربی، همچون سمیت سلولی، اختلالات سیستمیک و تهدید سلامت موجودات زنده را ایجاد می‌کنند (Tan, Yue, Xu, Zhao, & Xing, 2020; Walker & Fequet, 2023; Elliott & Truman, 2020). از این رو، توسعه جایگزین‌هایی مانند فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و سایر زیست‌پلیمرها اهمیت یافته است؛ موادی که در پایان عمر خود تجزیه شده، قابل کمپوست هستند و رد پای کربنی کم‌تری بر جای می‌گذارند. افزون بر این، می‌توان ترکیبات فعال نظیر عوامل ضد میکروبی و آنتی‌اکسیدان‌ها را در این بسته‌بندی‌ها گنجانده تا عملکردهایی مانند مهار رشد میکروبی، کاهش اکسیداسیون چربی‌ها و ارتقای ارزش تغذیه‌ای حاصل شود (Fakhouri, Martelli, Caon, Velasco, & Mei, 2015; Karimi Sani et al., 2023; Barbosa, Andrade, Vilarinho, Fernando, & Silva, 2021; Ribeiro, Estevinho, & Rocha, 2021; Khalid, 2022). به عنوان یک زیست‌پلیمر ارزشمند با محتوای بالای گلوکومانان (۱۶-۵۵٪) و خواص رئولوژیکی ویژه، قابلیت بالایی در تولید فیلم‌های خوراکی زیستی دارد و به عنوان عامل ژل‌کننده، غلیظ‌کننده و پایدارکننده کاربرد دارد (Ekrami & Emam-Djomeh, 2014). افزودن ترکیبات طبیعی می‌تواند عملکرد این فیلم‌ها را تقویت کند. زردچوبه (*Curcuma longa*) به دلیل وجود کورکومین، خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی شناخته شده است (Akter, Hossain, Takara, Islam, & Hou, 2019; Hussain et al., 2017). آن، سلیوم، به عنوان یک عنصر معدنی با نقش‌های کلیدی، در توسعه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است. به کارگیری آن در ساختار فیلم‌ها موجب تقویت ویژگی‌های عملکردی و افزایش کارایی بسته‌بندی می‌شود (Lu et al., 2020). با توجه به اهمیت روزافزون فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیاز به بهبود خواص محافظتی آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، این پژوهش

متفاوت تهیه شد. فیلم پایه فاقد پودر زردچوبه و سلنیوم بود، در حالی که سایر نمونه‌ها حاوی مقادیر مختلفی از این ترکیبات بودند (شکل ۱).



شکل ۱- فیلم‌های تهیه شده از کامپوزیت پودر ثعلب/پودر زردچوبه و سلنیوم

Fig. 1- Films prepared from the composite of safflower powder/turmeric and selenium powder

پلیت‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس انکوبه شدند. پس از پایان انکوباسیون، قطر نواحی بازدارندگی رشد باکتری در اطراف دیسک‌ها (Halo of Inhibition) با دقت و به واحد میلی‌متر اندازه‌گیری شد. ارزیابی اثر ضد میکروبی فیلم‌ها با استفاده از کنترل منفی (فیلم پایه - ۴) و کنترل مثبت (تتراسایکلین) انجام شد. اندازه این نواحی به عنوان شاخص فعالیت ضد باکتریایی فیلم‌ها ثبت و تحلیل گردید (Osés et al., 2016).

ارزیابی خواص آنتی اکسیدانی (DPPH)

برای ارزیابی فعالیت آنتی اکسیدانی فیلم‌های زیست تخریب پذیر، از آزمون مهار رادیکال آزاد DPPH استفاده شد. بدین منظور، مقدار ۲۵ میلی گرم از هر نمونه فیلم در ۴ میلی لیتر آب مقطر با هم زدن مداوم حل شد تا عصاره یکنواختی حاصل شود. سپس ۱ میلی لیتر از عصاره تهیه شده با ۱ میلی لیتر محلول متانولی DPPH با غلظت ۱ میلی مولار مخلوط گردید. مخلوط حاصل به مدت ۵ دقیقه در دمای محیط هم زده شد و سپس به مدت ۱ ساعت در محیطی تاریک و سرد نگهداری گردید. اندازه‌گیری جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی-فرابنفش مدل ۲۶-۲۰۹۲-۸۰ ساخت شرکت LKB Biochrom (انگلستان) انجام گرفت (Pirsa & Mohammadi, 2021).

درصد مهار رادیکال آزاد DPPH با استفاده از رابطه زیر محاسبه

شد:

آزمون‌های فیلم

ارزیابی ویژگی‌های رنگی (Lab)

برای اندازه‌گیری پارامترهای رنگی فیلم‌های زیست تخریب پذیر، از دستگاه رنگ سنج مدل CR-400 ساخت شرکت Konica Minolta Sensing Inc (ژاپن) استفاده شد. هر نمونه بر روی زمینه سفید استاندارد قرار گرفت و مقادیر L^* (روشنایی)، a^* (قرمز-سبز) و b^* (زرد-آبی) در سه نقطه مجزا از سطح فیلم اندازه‌گیری شد. میانگین این سه مقدار به عنوان نمایه نهایی رنگی نمونه ثبت و در تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گرفت (Sharma, Jaiswal, Duffy, & Jaiswal, 2020).

آزمون فعالیت ضد باکتریایی

برای بررسی خاصیت ضد باکتریایی فیلم‌های زیست تخریب پذیر، از روش انتشار دیسک در محیط کشت مولر-هینتون آگار (Mueller-Hinton agar) استفاده شد. ابتدا نمونه‌های فیلم به صورت دیسک‌هایی با قطر ۶ میلی متر برش داده شدند. این دیسک‌ها به صورت استریل بر روی پلیت‌های حاوی محیط مولر-هینتون آگار که پیش‌تر با سوسپانسیون باکتری‌های *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* با غلظت تقریبی 10^7 CFU/mL تلقیح شده بودند، قرار گرفتند.

$$\text{Antioxidant activity (\%)} = \frac{A_b - A_s}{A_b} \quad (1)$$

که در آن، A_b جذب محلول شاهد و A_s جذب نمونه آزمون است.

آزمون طیف‌سنجی UV-VIS (جذب و عبور نور)

برای ارزیابی ویژگی‌های نوری فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر، از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis مدل ۲۶-۲۰۹۲-۸۰ ساخت شرکت LKB Biochrom (انگلستان) استفاده شد. نمونه‌ها به صورت نوارهایی با ابعاد یکنواخت (۱۰×۴۰ میلی‌متر) و ضخامت ثابت، آماده‌سازی شده و درون سل کوارتز قرار داده شدند، در حالی که سل خالی به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری‌ها در طول موج ثابت ۶۰۰ نانومتر و در دامای محیط (۲۵±۱ درجه سانتی‌گراد) انجام گرفت. انتخاب این طول موج به دلیل قرارگیری در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیسی و مناسب بودن آن برای بررسی هم‌زمان تغییرات در عبور نور و ارزیابی میزان کدورت فیلم‌ها صورت گرفت. این طول موج امکان یکنواخت‌سازی مقایسه‌ها و سنجش دقیق اثر افزودنی‌های طبیعی بر خواص اپتیکی فیلم را فراهم می‌آورد. برای هر نمونه سه بار تکرار صورت پذیرفت و میانگین نتایج به عنوان مقدار نهایی جذب و عبور نوری ثبت گردید. این روش با الهام از دستورالعمل یو و همکاران (Yu et al., 2017) و با اصلاحات جزئی مورد استفاده قرار گرفت.

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

برای بررسی دقیق مورفولوژی سطحی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر و تحلیل نحوه توزیع ترکیبات فعال در بستر پلیمری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA III ساخت شرکت TESCAN (جمهوری چک) استفاده گردید. نمونه‌های فیلم پس از برش در ابعاد منظم و مناسب، پیش از تصویربرداری به منظور افزایش رسانایی سطحی و جلوگیری از تجمع بار، با یک لایه نازک طلا به روش sputter coating پوشش داده شدند. عملیات پوشش‌دهی در شرایط خلأ و با جریان کنترل‌شده انجام شد تا لایه‌ای یکنواخت بر سطح فیلم ایجاد شود. سپس نمونه‌ها بر روی پایه‌های رسانا (stubs) توسط نوار کربنی نصب و داخل محفظه دستگاه قرار گرفتند. تصویربرداری در بزرگ‌نمایی‌های مختلف، تحت خلأ بالا و با ولتاژ شتاب‌دهنده ثابت ۲۰ کیلوولت انجام شد. تصاویر حاصل برای ارزیابی ویژگی‌های سطحی شامل یکنواختی ساختار، نحوه توزیع ترکیبات، وجود تخلخل یا نواقص و همچنین تعامل میان اجزای ماتریس پلیمری مورد استفاده قرار گرفت (Pirsa & Mohammadi, 2021).

ویژگی‌یابی طیف جذبی UV-Vis عصاره آبی زردچوبه

و شناسایی پیک‌های کورکومینوئیدها

برای تهیه عصاره آبی زردچوبه، مقدار ۰.۴ گرم پودر زردچوبه (*Curcuma longa* L.) در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر توزین و سوسپانسیون حاصل در دامای ثابت ۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه بر روی هیتر حرارت داده شد. پس از تکمیل فرآیند استخراج، محلول از صافی کاغذی عبور داده شد تا ذرات نامحلول و ناخالصی‌ها حذف گردد. آب مقطر به عنوان بلانک در تمامی مراحل اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفت.

طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) توسط اسپکتروفتومتر با استفاده از کووت کوارتز در محدوده طول موج ۲۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر انجام گرفت. جذب نوری نمونه در برابر طول موج رسم گردید و پیک‌های اصلی طیف به صورت کمی و کیفی مورد تحلیل قرار گرفتند (Ghosh & Sarkar, 2024).

آنالیز آماری

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف پودر زردچوبه و پودر سلنیوم بر ویژگی‌های فیلم زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب و مدل‌سازی ارتباط میان متغیرهای مستقل و وابسته، از طرح آماری مرکب مرکزی (جدول ۱-الف) استفاده شد. بر اساس این طرح، در مجموع ۱۳ فرمولاسیون مختلف فیلم تهیه گردید. از میان آن‌ها، چهار فیلم منتخب (جدول ۱-ب) جهت ارزیابی خصوصیات عملکردی و زیست‌فعال مورد بررسی قرار گرفتند. برای تحلیل داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها از سطح احتمال ۹۵ درصد استفاده شد. مدل‌سازی و برآورد ضرایب رگرسیونی با کمک نرم‌افزار Design-Expert (ورژن ۱۰) انجام گرفت. همچنین برای ترسیم نمودارهای کالیبراسیون و تحلیل نتایج آزمون‌ها از نرم‌افزار Microsoft Excel (نسخه ۲۰۱۸) استفاده گردید.

نتایج و بحث

ارزیابی ویژگی‌های رنگی (Lab)

ویژگی‌های رنگی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه صمغ ثعلب اصلاح‌شده با پودر زردچوبه (TP) و پودر سلنیوم (SP)، با استفاده از سیستم رنگ‌سنجی CIELAB مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش غلظت زردچوبه موجب افزایش معنی‌دار در شاخص b^* (زردی) و کاهش در مقدار L^* (روشنایی) شد؛ پدیده‌ای که مستقیماً به حضور ترکیبات رنگ‌زای کورکومینوئیدی، به ویژه کورکومین، نسبت داده می‌شود. این رنگدانه‌ها با افزایش غلظت، شدت رنگ را تشدید و شفافیت فیلم را کاهش می‌دهند؛ یافته‌ای که با گزارش

پیشین بر روی افزودنی‌های معدنی نظیر نانوذرات سلنیوم در ماتریس‌های پلیمری، از جمله نتایج لو و همکاران (Lu et al., 2020) در سیستم‌های PLA/SeMP مطابقت دارد.

واکنه و همکاران (Wakte et al., 2011) در فیلم‌های تقویت شده با زردچوبه هم‌راستا است. افزایش غلظت پودر سلنیوم نیز تغییراتی مشخص در شاخص a^* به همراه داشت، به گونه‌ای که جابه‌جایی رنگی به سمت تهرنگ‌های سبزتر یا آبی‌تر مشاهده شد. این رفتار، با مطالعات

جدول ۱-الف- لیست فیلم‌های تهیه شده بر اساس طرح مرکب مرکزی
Table 1-a- List of films prepared based on the central composite design

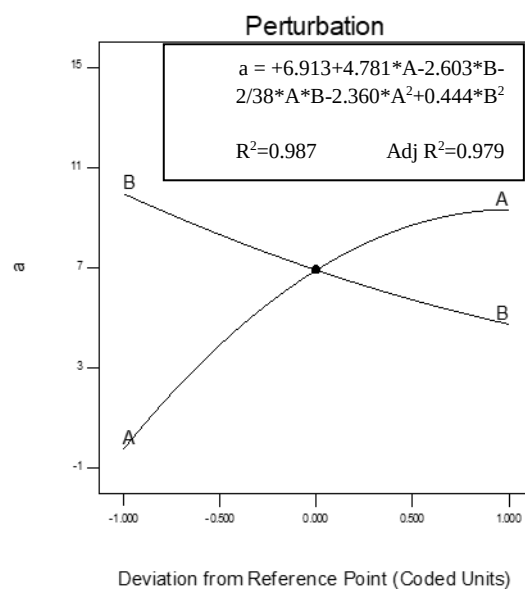
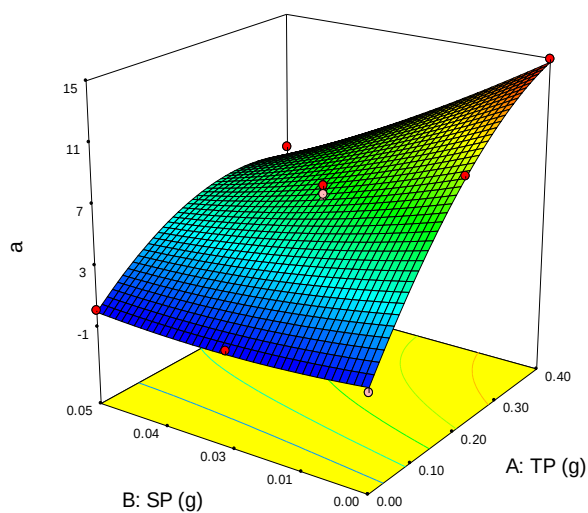
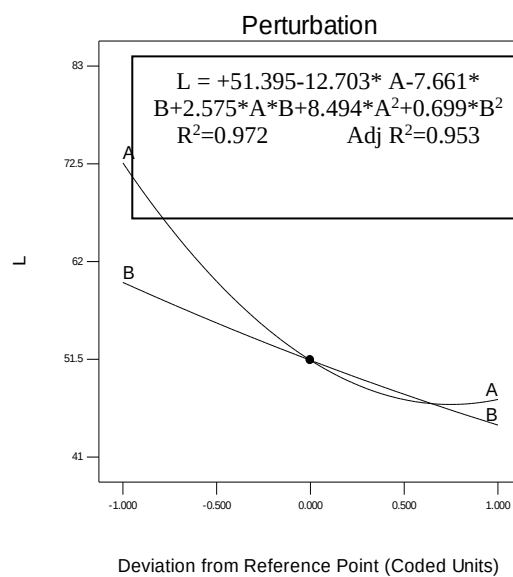
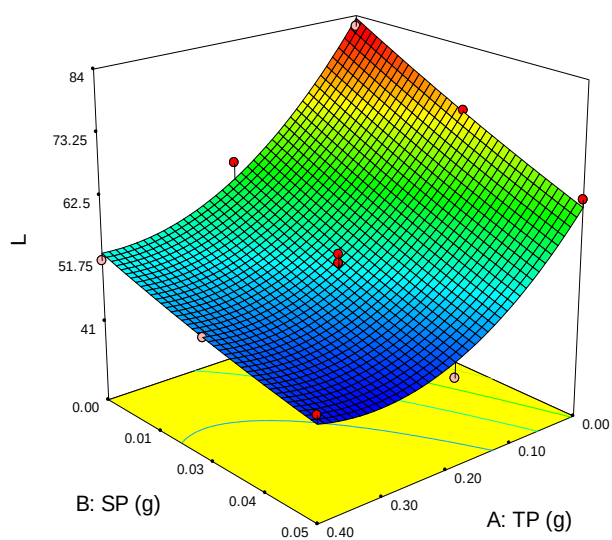
مرحله Run	زردچوبه TP (g)	سلنیوم SP (g)	کد کیت Kit Code
1	0.2	0	K _{0,2-0}
2	0.2	0.05	K _{0,2-0.05}
3	0.4	0	K _{0,4-0}
4	0	0	K ₀₋₀
5	0	0.025	K _{0-0.025}
6	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
7	0.4	0.025	K _{0,4-0.025}
8	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
9	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
10	0	0.05	K _{0-0.05}
11	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
12	0.2	0.025	K _{0,2-.0025}
13	0.4	0.05	K _{0,4-0.05}

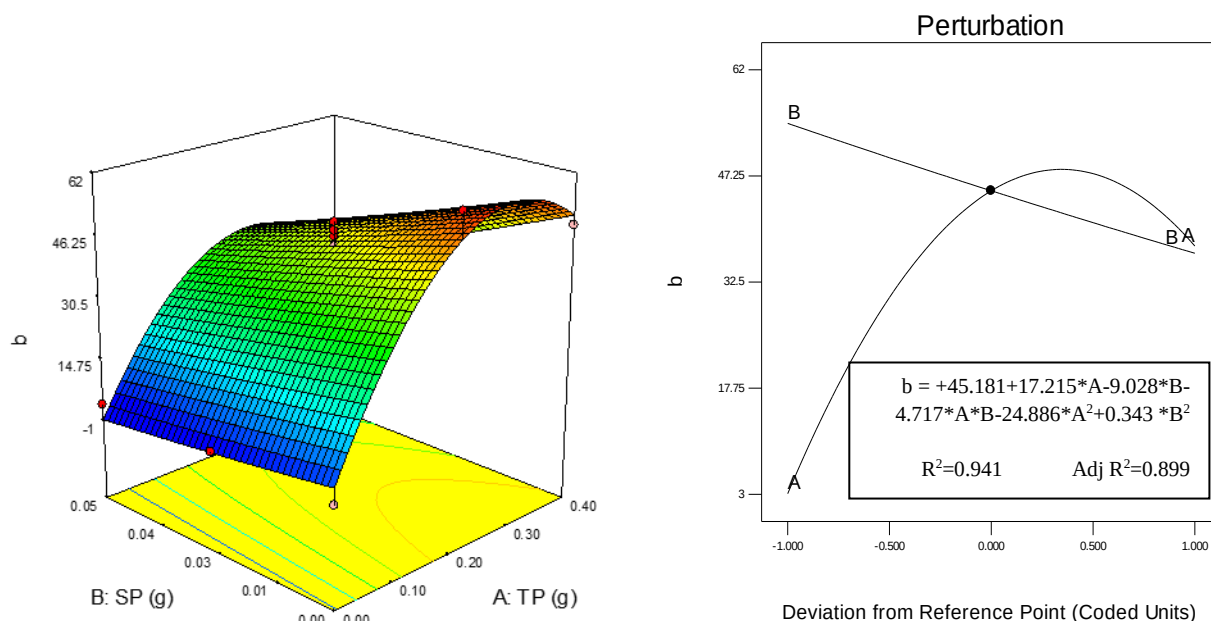
جدول ۱-ب- لیست فیلم‌های منتخب برای بررسی ویژگی‌های عملکردی و زیست فعال
Table 1-b- List of selected films for evaluation of functional and bioactive properties

مرحله Run	زردچوبه TP (g)	سلنیوم SP (g)	کد کیت Kit Code
3	0.4	0	K _{0,4-0}
4	0	0	K ₀₋₀
6	0.2	0.025	K _{0,2-0.025}
13	0.4	0.05	K _{0,4-0.05}

فراهم می‌سازد (شکل ۲). این قابلیت برای کاربردهای بسته‌بندی فعال و هدفمند محصولات غذایی حساس به نور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا فاکتورهای رنگی نقش اساسی در پذیرش حسی محصول نهایی ایفا می‌کنند (Ramos et al., 2013; Rachtanapun et al., 2021).

بر اساس مدل‌های ریاضی حاصل از طراحی آماری و نمودارهای تغییرات (perturbation)، تعامل میان TP و SP منجر به الگوی پاسخ غیرخطی در شاخص‌های a^* و b^* گردید. به‌طور مشخص، افزایش TP باعث تشدید مؤلفه قرمزی (a^*) و افزایش SP موجب کاهش آن شد. مجموع این داده‌ها نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از TP و SP امکان مهندسی دقیق ویژگی‌های نوری و بصری فیلم‌های زیستی را





شکل ۲- منحنی‌های سه‌بعدی، perturbation و مدل ریاضی ارتباط بین میزان پودر زردچوبه و سلینیوم با فاکتورهای رنگی (Lab) فیلم‌های کامپوزیتی

Fig. 2- Three-dimensional curves, perturbation plots, and the mathematical model illustrating the relationship between the amounts of turmeric and selenium powder with the color factors (Lab) of the composite films

(Ndwandwe, Malinga, Kayitesi, & Dlamini, 2022). در این

مطالعه، استفاده از پودر سلینیوم، فاقد ساختار نانویی یا پوشش‌دهی مؤثر (encapsulation) موجب کاهش دسترسی زیستی آن در محیط کشت شده و غلظت مهاری لازم حاصل نشده است.

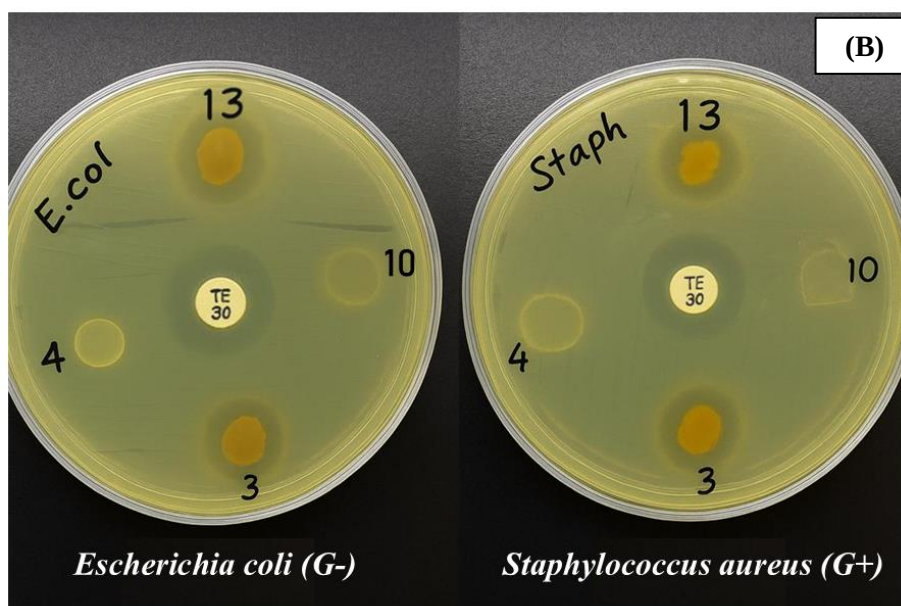
بیشترین اثر مهاری در فیلم ترکیبی مشاهده شد، که در آن، ترکیب زردچوبه و سلینیوم منجر به تقویت قابل توجه عملکرد ضدباکتریایی نسبت به فیلم‌های تک‌جزئی شد. این اثر افزایشی صرفاً جمع‌جبری اثرات دو جزء نبوده، بلکه نشانگر یک تعامل هم‌افزای واقعی است (شکل ۳). این پدیده با مطالعه‌ای بر فیلم‌های کامپوزیتی حاوی ZnO و عصاره EEP قابل مقایسه است؛ که در آن، ترکیب یک عامل طبیعی و یک ترکیب معدنی، باعث افزایش نفوذپذیری غشای سلولی، القای استرس اکسیداتیو و مهار فعالیت‌های آنزیمی گردید. در سازوکار پیشنهادشده، کورکومین با تضعیف ساختار غشا، ورود سلینیوم را تسهیل می‌کند و، سلینیوم با تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و مهار آنزیم‌های کلیدی، اثربخشی کورکومین را تشدید می‌نماید. در جمع‌بندی، زردچوبه به‌تنهایی اثر مهاری قابل توجهی دارد؛ اما، ترکیب آن با سلینیوم، منجر به افزایش معنی‌دار بازدارندگی فیلم شد. این یافته، نقش تعیین‌کننده طراحی هدفمند و مکمل اجزای زیست‌فعال را در توسعه فیلم‌های کارکردی، برای کاربردهای غذایی و پزشکی، برجسته می‌سازد (Mocanu et al., 2019).

آزمون فعالیت ضدباکتریایی

فعالیت ضدباکتریایی فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر تهیه‌شده بر پایه ثعلب در برابر دو گونه شاخص باکتریایی، *Escherichia coli* (گرم منفی) و *Staphylococcus aureus* (گرم مثبت)، از طریق آزمون دیسک دیفیوژن مورد ارزیابی قرار گرفت. فیلم پایه فاقد هر گونه ترکیب زیست‌فعال بود و مطابق انتظار، هیچ ناحیه مهاری در اطراف دیسک ایجاد نکرد. در مقابل، فیلم حاوی زردچوبه نواحی واضحی از عدم رشد را، به‌ویژه علیه *S. aureus*، ایجاد نمود. این تفاوت به ساختار دیواره سلولی ساده‌تر باکتری‌های گرم مثبت نسبت داده می‌شود؛ ساختاری که در آن، فقدان غشای خارجی منجر به نفوذپذیری بالاتر نسبت به ترکیبات فعال، مانند کورکومین، می‌شود. یافته حاضر با مطالعه‌ای بر فیلم‌های خوراکی کاراگینان-پکتین حاوی کورکومین هم‌راستا است؛ جایی که افزایش غلظت کورکومین منجر به گسترش معنی‌دار ناحیه مهاری و اثربخشی بیشتر در برابر باکتری‌های گرم مثبت شد (Sultan, Rahman, Dirpan, & Syarifuddin, 2023).

فیلمی که تنها حاوی پودر سلینیوم بود، فاقد هرگونه اثر مهاری بود. این یافته با نتایج حاصل از نانوفیلم‌های نشاسته سیب‌زمینی حاوی نانوذرات سلینیوم مطابقت دارد که نشان دادند اثربخشی ضدباکتریایی سلینیوم وابسته به فرم نانو و نرخ رهایش آن در محیط است

فیلم Film	فعالیت ضد باکتریایی: قطر هاله عدم رشد (میلی متر) Antibacterial activity: Inhibition zone diameter (mm)		فعالیت نسبی در مقایسه با تتراسایکلین Relative activity compared to TE (%)
	اشریشیا کلی (گرم منفی) <i>Escherichia coli</i> (G-)	استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) <i>Staphylococcus aureus</i> (G+)	
تتراسایکلین TE	15±0.000	14±0.000	100
فیلم ۱۳ K0.4-0.05	12.9±0.36	12.6±1.02	G-: 86.0 G+: 90.0
فیلم ۱۰ 05.K0-0	0±0.00	0±0.00	.
فیلم ۳ K0.4-0	10.5±0.50	10.8±0.72	G-: 70.0 G+: 77.2
فیلم پایه - ۴ K0-0	0±0.00	0±0.00	0



شکل ۳- (A) فعالیت آنتی باکتریال فیلم‌های کامپوزیتی بر پایه پودر ثعلب/زردچوبه و پودر سلنیوم: (B) نواحی بازدارندگی روی پلیت‌های آگار برای نمونه‌های انتخاب شده فیلم

Fig. 3-(A) Antibacterial activity of composite films based on salep powder/turmeric and selenium powder; (B) inhibition zones on agar plates for selected film samples.

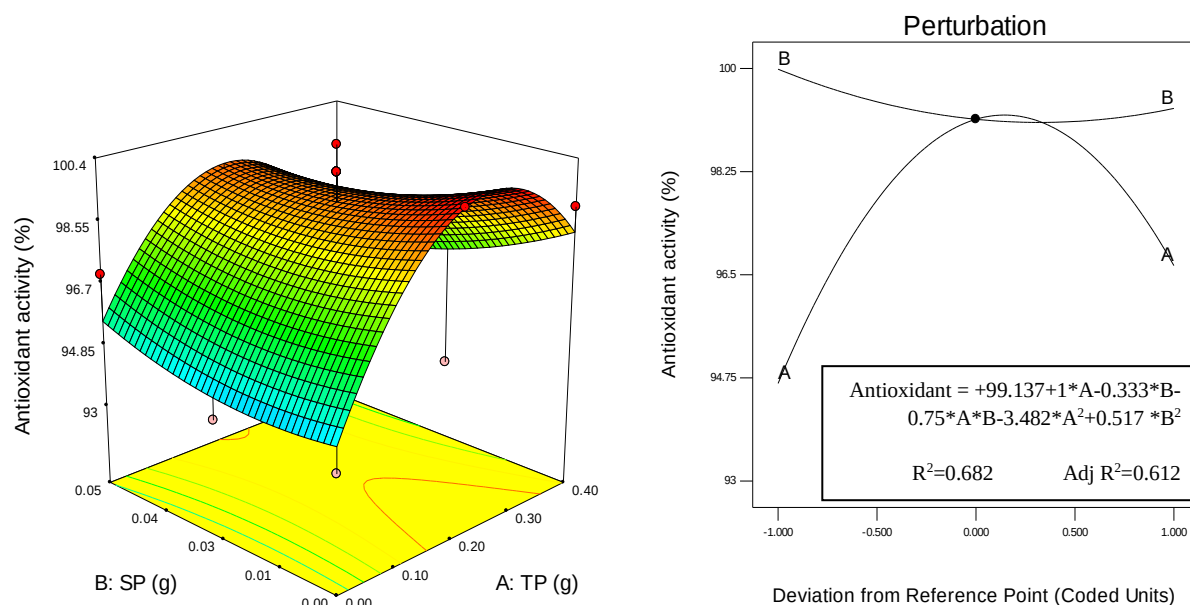
بالا، این روند افزایشی متوقف می‌شود و حتی تا حدی کاهش می‌یابد. چنین رفتاری می‌تواند ناشی از اشیاع ظرفیت آنتی‌اکسیدانی یا بروز آثار منفی در دوزهای زیاد باشد. در خصوص سلنیوم (SP)، هرچند نقش آن در سطوح پایین چندان محسوس نبود، اما با افزایش مقدار، اثر تقویتی و پایدارکننده آن در ترکیب با TP آشکار شد (شکل ۴). این نتیجه با مطالعه لو و همکاران (Lu et al., 2020) نیز هم‌راستا بود که بیشترین مهار رادیکال را در غلظت ۲٪ گزارش کرده است. بر اساس مدل‌سازی و نمودارهای سه‌بعدی، ترکیب بهینه در مقادیر $TP = 0/2$ گرم و

ارزیابی خواص آنتی‌اکسیدانی (DPPH)

آزمون DPPH نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی هستند (۹۳ تا ۱۰۰٪). در این میان، پودر زردچوبه (TP) مؤثرترین عامل در افزایش مهار رادیکال‌های آزاد بود و با افزایش مقدار آن، کارایی آنتی‌اکسیدانی نیز به‌وضوح افزایش یافت. این روند مثبت، که با حضور ترکیبات فنولی فعال مانند کورکومین مرتبط است، با گزارش مطالعه جامیان و سوزی‌هاکیو (Suzihaque & Jamian, 2019) نیز مطابقت دارد. با این حال، نتایج مدل نشان داد که در مقادیر

متعادل کننده و تنظیم کننده‌ای در ساختار پاسخ دارد (Suzihaque & Jamian, 2019).

$TP = 0/03$ گرم به دست آمد؛ که بیانگر هم افزایی مؤثر میان ترکیب گیاهی و معدنی است. همچنین نمودار perturbation نیز نشان داد که سیستم به تغییرات TP بسیار حساس تر است، در حالی که SP نقش



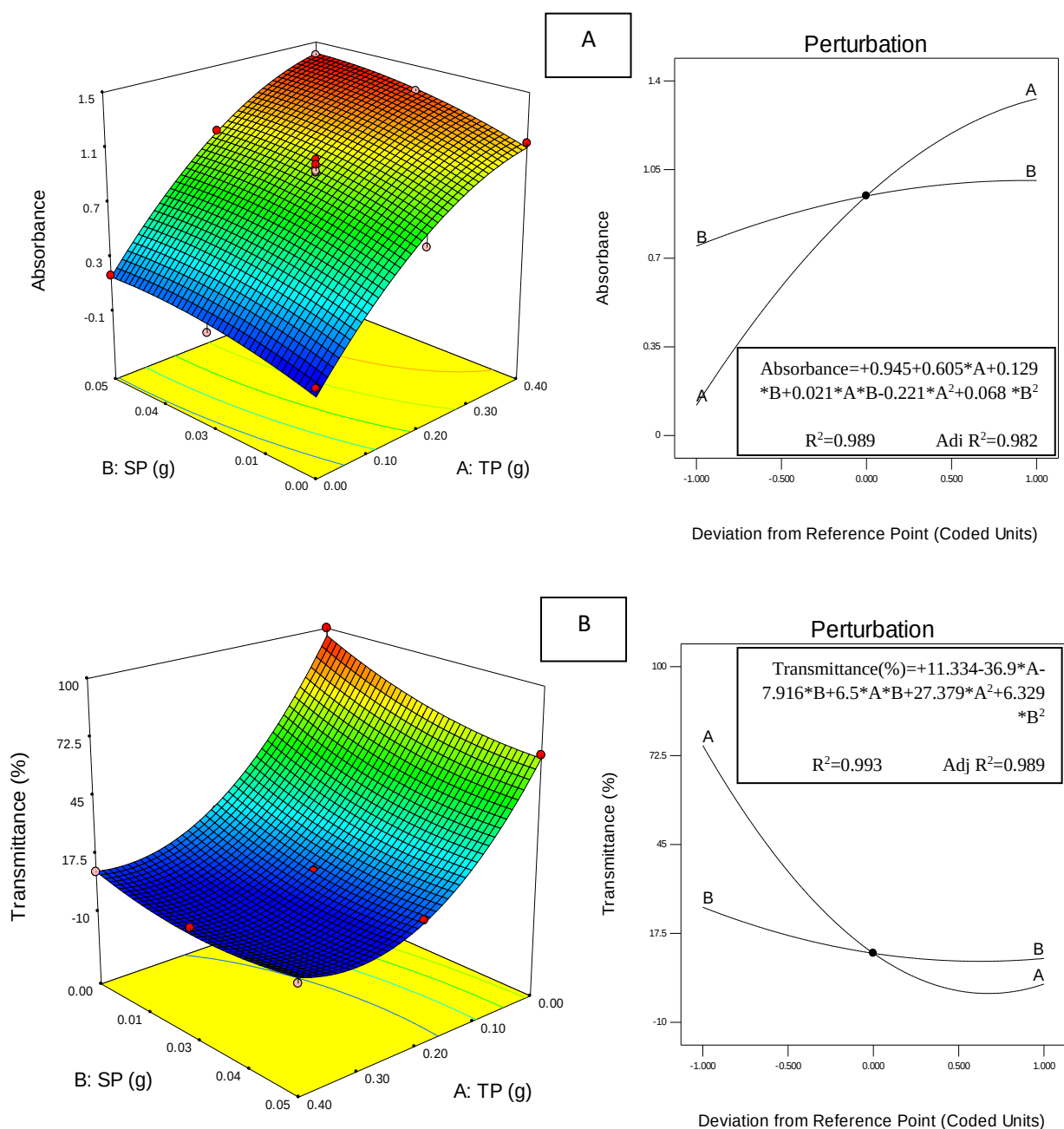
شکل ۴ - نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی، منحنی‌های perturbation و مدل ریاضی که رابطه بین غلظت‌های پودر زردچوبه (TP) و پودر سلنیوم (SP) با فعالیت آنتی اکسیدانی DPPH در فیلم‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد

Fig. 4- Three-dimensional response surface plots, perturbation curves and the mathematical model illustrating the relationship between turmeric powder (TP) and selenium powder (SP) concentrations with the DPPH antioxidant activity of the composite films

بررسی عبور نور، نتایج نشان داد که حضور TP موجب کاهش معنادار شفافیت و افزایش تیرگی فیلم‌ها شد. این افت شفافیت ناشی از وجود کورکومین و ساختار آروماتیک مزدوج آن است که جذب بالایی در محدوده مرئی دارد. در حالی که افزودن SP نیز سبب کاهش عبور نور گردید، شدت اثر آن نسبت به TP کمتر بود. ترکیب هم‌زمان TP و SP باعث کاهش عبور نور شد، اما شدت این افت کمتر از حالتی بود که هر یک از اجزا به تنهایی حضور داشتند. این رفتار احتمالاً ناشی از پراکنش متفاوت ذرات و برهم‌کنش‌های فیزیکی میان ترکیبات فعال در ماتریس فیلم است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که TP نقش اصلی را در تقویت جذب نوری و کاهش شفافیت ایفا می‌کند، در حالی که SP به عنوان عامل مکمل، اثر محدود اما قابل توجهی در تغییر ویژگی‌های اپتیکی دارد (شکل ۵). این هم‌افزایی می‌تواند در طراحی فیلم‌های بسته‌بندی فعال با عملکرد محافظتی در برابر نور و پیشگیری از تخریب نوری محصولات غذایی ارزشمند باشد (Van Nong et al., 2016).

آزمون طیف‌سنجی UV-VIS (جذب و عبور نور)

آنالیز طیف‌سنجی UV-Vis و بررسی ویژگی‌های عبور نور فیلم‌های زیست تخریب پذیر نشان داد که افزودن پودر زردچوبه (TP) و سلنیوم (SP) به ماتریس پایه، تغییرات چشمگیری در رفتار نوری نمونه‌ها ایجاد می‌کند. افزایش غلظت TP منجر به افزایش محسوس جذب نوری، به ویژه در ناحیه مرئی و طول موج حدود ۶۰۰ نانومتر شد؛ پدیده‌ای که به حضور کورکومین، به عنوان ترکیب غالب رنگ‌زا با ساختار مزدوج و قابلیت جذب $\pi-\pi^*$ نسبت داده می‌شود. این نتایج با باندهای جذبی گزارش شده برای کورکومین خالص در محدوده ۲۵۰ و ۴۲۷ نانومتر کاملاً هم‌خوانی دارد (Van Nong et al., 2016). بیشترین مقدار جذب در فرمولاسیون حاوی $TP = 0/4$ گرم و $SP = 0/05$ گرم به دست آمد؛ اما با افزایش بیشتر TP، روند افزایش جذب کاهش یافت. این موضوع می‌تواند ناشی از اشباع نوری و تجمع رنگ‌دانه در شبکه پلیمری و در نتیجه کاهش شفافیت فیلم باشد. در



شکل ۵- منحنی‌های سه‌بعدی، perturbation و مدل ریاضی نشان‌دهنده اثر غلظت پودر زردچوبه و پودر سلیوم بر میزان جذب (A) و عبور نوری (B) است

Fig. 5- The three-dimensional curves, perturbation curves, and the mathematical model showing the effect of turmeric powder and selenium powder concentrations on the absorbance (A) and optical transmittance (B)

تصاویر FESEM آشکار ساخت که افزودن زردچوبه و سلیوم تغییرات بارزی در ریزساختار سطحی فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

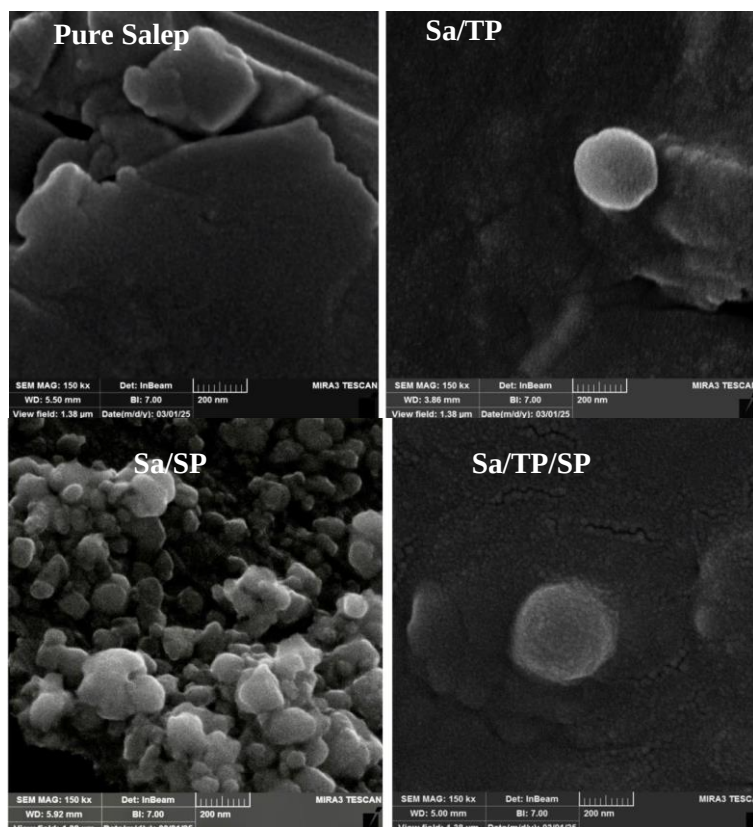
ویژگی‌یابی طیف جذبی UV-Vis عصاره آبی زردچوبه

و شناسایی پیک‌های کورکومینوئیدها

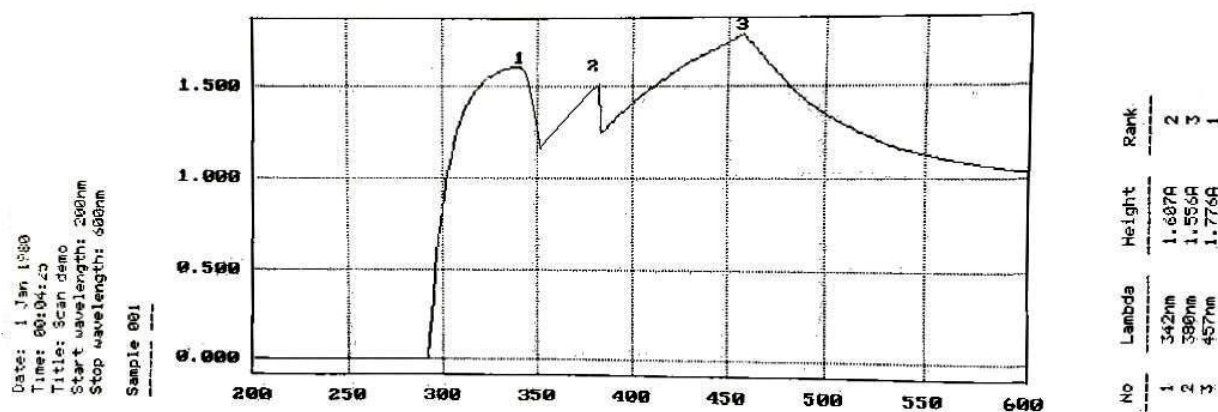
طیف جذبی عصاره آبی زردچوبه سه قله مشخص در طول موج‌های ۳۴۲، ۳۸۰ و ۴۵۷ نانومتر نشان داد. قله نخست در ۳۴۲ نانومتر به حضور ایزومرهای فرعی زردچوبه شامل دمتوکسی کورکومین (DMC) و بیس دمتوکسی کورکومین (BDMC) نسبت داده می‌شود. این جذب در محدوده فرابنفش نزدیک قرار داشته و به انتقال‌های $n-\pi^*$ گروه‌های کربونیل مربوط است. در گزارش‌های پیشین نیز پیک‌های مشابه برای این ایزومرها در بازه ۳۳۰-۳۴۵ نانومتر ذکر شده است (Ghosh & Sarkar, 2024). قله دوم در ۳۸۰ نانومتر به تغییرات تاتومری کورکومین در محیط آبی مربوط است. در این حالت، تعادل بین فرم کتو-انول و دی‌کتو باعث ایجاد جذب میانی در محدوده ۳۷۰-۳۹۰ نانومتر می‌شود که پیش‌تر نیز برای کورکومین در محیط‌های قطبی گزارش شده است. چنین برهم‌کنش‌هایی ناشی از تشکیل پیوند هیدروژنی میان گروه‌های عاملی کورکومین و مولکول‌های آب است که موجب پایداری بیشتر فرم دی‌کتو در محلول‌های آبی می‌گردد (Ghosh & Sarkar, 2024).

قله سوم و اصلی در ۴۵۷ نانومتر مشاهده شد که به کورکومین (Curcumin) نسبت داده می‌شود. این پیک ناشی از انتقال‌های $\pi-\pi^*$ در سیستم کونژوگه گسترده کورکومین است و عامل اصلی رنگ زرد-نارنجی مشخص زردچوبه محسوب می‌شود. بیشینه جذب کورکومین در مطالعات قبلی معمولاً در بازه ۴۲۰-۴۳۵ نانومتر در حلال‌های آلی گزارش شده است. بنابراین، جابه‌جایی این قله به ۴۵۷ نانومتر در محیط آبی را می‌توان به اثر قطبیت بالای آب و تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی با گروه‌های کربونیل و هیدروکسیل کورکومین نسبت داد (شکل ۷). مقایسه نتایج حاضر با داده‌های پیشین نشان می‌دهد که هر سه قله شناسایی شده (۳۴۲، ۳۸۰ و ۴۵۷ نانومتر) بیانگر حضور همزمان کورکومین و ایزومرهای اصلی آن در عصاره آبی زردچوبه هستند (Safie et al., 2015; Kazantzis et al., 2020).

ثعلب ایجاد می‌کند. در نمونه شاهد، سطح فیلم بافتی صاف، متراکم و یکنواخت داشت. این رفتار با گزارش‌های مربوط به فیلم‌های خالص تراگانانت مشابه است که به دلیل نظم مولکولی زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی و توانایی بالای آن‌ها در تشکیل فیلم‌های پایدار رخ می‌دهد (Dobrucka et al., 2025). در فیلم حاوی زردچوبه، ریزساختار سطحی حالت لایه‌ای و پیوسته پیدا کرد که بیانگر پراکندگی یکنواخت کورکومین در ماتریس ثعلب است. این الگو با یافته‌های و همکاران (Liu et al., 2022) و ژو و همکاران (Xu et al., 2021) مطابقت دارد؛ آن‌ها گزارش کردند توزیع یکنواخت کورکومین در پلیمرهای زیستی منجر به افزایش همگنی سطحی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی می‌شود. همچنین این محققان نشان دادند که در شرایط غلظتی کنترل شده، کورکومین قادر است ساختاری پایدار با زبری حداقلی ایجاد نماید (Liu et al., 2022; Xu et al., 2021). نمونه غنی شده با سلیوم، برخلاف دو مورد قبل، دارای خوشه‌های متراکم با اشکال نامنظم و ابعاد بزرگ بود. این پدیده نشان‌دهنده وقوع آگلومراسیون و ناسازگاری بین ذرات سلیوم و ماتریس پلیمری است؛ الگویی مشابه گزارش لو و همکاران (Lu et al., 2020) در فیلم‌های PLA/SeMP که در آن با افزایش غلظت SeMP، زبری سطح افزایش یافته و خوشه‌های نامنظم شکل گرفتند. این امر می‌تواند سبب تجمعات درشت و توزیع ناهمگن شود. در فیلم ترکیبی حاوی هر دو افزودنی، سطحی متشکل از نواحی دانه‌ای و لایه‌ای مشاهده شد که خوشه‌های کوچک‌تری نسبت به نمونه سلیوم خالص داشت. این تغییر نشان‌دهنده تعاملات بین‌فازی مطلوب میان کورکومین و سلیوم است که مانع تجمع بیش‌ازحد ذرات می‌شود و ساختاری یکنواخت‌تر و پایدارتر را فراهم می‌آورد. به‌طور کلی، زردچوبه موجب بهبود یکنواختی و کاهش زبری سطح گردید، در حالی که سلیوم به‌تنهایی ساختاری خشن و توده‌ای ایجاد کرد. با این حال، ترکیب همزمان آن‌ها اثرات منفی ناشی از آگلومراسیون سلیوم را خنثی کرده و سطحی همگن‌تر به وجود آورد (شکل ۶). چنین نتایجی نشان می‌دهد که اصلاح مورفولوژی سطحی از طریق کنترل دقیق نوع و ترکیب افزودنی‌ها می‌تواند نقش کلیدی در ارتقای خواص عملکردی فیلم‌ها داشته باشد؛ ویژگی‌ای که اهمیت ویژه‌ای برای توسعه سامانه‌های نوین بسته‌بندی زیست تخریب‌پذیر به همراه دارد (Lu et al., 2020).



شکل ۶- تصاویر FESEM سطح فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب و کامپوزیت‌های مختلف آن
Fig. 6- FESEM images of the surface of biodegradable films based on salep powder and their various composites



شکل ۷- طیف UV-Vis عصاره آبی زردچوبه که دارای سه قله متمایز در طول موج‌های ۳۴۲، ۳۸۰ و ۴۵۷ نانومتر است
این قله‌ها به ترتیب با ایزومرهای جزئی DMC و BDMC، تعادل تاتومری کورکومین در محیط آبی، و قله اصلی کورکومین مرتبط‌اند.

Fig. 7-UV-Vis spectrum of the aqueous turmeric extract with three distinct peaks at 342, 380, and 457 nm
Corresponding to minor isomers (DMC and BDMC), tautomeric equilibrium of curcumin in aqueous medium, and the main curcumin peak, respectively.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تمرکز بر توسعه فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر پایه پودر ثعلب و تقویت آن با پودر زردچوبه و سلنیوم نشان داد که

می‌توان از هم‌افزایی میان ترکیبات گیاهی و معدنی برای ایجاد بسته‌بندی‌های فعال و سازگار با محیط‌زیست بهره برد. نتایج حاکی از آن بود که زردچوبه به‌واسطه حضور کورکومین نقش اصلی را در بهبود

ردپای کربنی و مدیریت بهتر پسماندهای پلاستیکی خواهد شد، بلکه نقشی کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی ایفا می‌نماید. پژوهش‌های آتی می‌توانند با تمرکز بر بهینه‌سازی فرایندها، بررسی پایداری در شرایط واقعی و توسعه فناوری‌های مقیاس‌پذیر، مسیر تجاری‌سازی این بسته‌بندی‌های نوین را تسهیل کنند.

مشارکت نویسندگان

سمیه منصوریار: تحقیق و بررسی، نوشتن-پیش‌نویس اصلی، مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی. **سجاد پیرسا:** مدیریت داده‌ها، روش‌شناسی، مدیریت پروژه، نرم‌افزار، نوشتن-بررسی و ویرایش. **میرخلیل پیروزی فرد:** نظارت.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

سپاسگزاری

از تمام افرادی که به نحوی در انجام این پژوهش نقشی داشته‌اند سپاسگزارم.

ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، ضدباکتریایی و بصری ایفا می‌کند؛ در حالی که سلیوم اگرچه به‌تنهایی اثربخشی محدودی داشت، اما در ترکیب با زردچوبه موجب افزایش قابل‌توجه کارایی فیلم شد. این هم‌افزایی به‌ویژه در ارتقای فعالیت ضدباکتریایی و پایداری ساختاری آشکار بود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که اصلاح ویژگی‌های نوری و ریزساختاری فیلم‌های زیستی از طریق انتخاب دقیق افزودنی‌ها امکان‌پذیر است و می‌تواند منجر به طراحی بسته‌بندی‌هایی شود که همزمان خواص محافظتی، عملکردی و زیباشناختی را فراهم کنند. به‌طور خاص، کاهش شفافیت و افزایش جذب نوری در حضور زردچوبه و سلیوم، قابلیت این فیلم‌ها را برای محافظت از مواد غذایی حساس به نور افزایش داد. از دیدگاه زیست‌محیطی، این رویکرد می‌تواند جایگزین مؤثری برای پلاستیک‌های سنتزی در صنایع غذایی باشد و با کاهش تولید زباله‌های غیرقابل‌تجزیه و اثرات مخرب میکروپلاستیک‌ها، به حفظ سلامت اکوسیستم‌ها کمک کند. افزون بر این، امکان افزودن ترکیبات زیست‌فعال به فیلم‌ها نه تنها ارزش افزوده عملکردی ایجاد می‌کند، بلکه مسیر توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند و عملکردی در صنایع غذایی و دارویی را نیز هموار می‌سازد. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهره‌گیری از پلیمرهای طبیعی نظیر ثعلب همراه با افزودنی‌های گیاهی و معدنی می‌تواند پایه‌گذار نسل جدیدی از سامانه‌های بسته‌بندی پایدار و سازگار با محیط‌زیست باشد. گسترش این رویکرد در مقیاس صنعتی نه تنها موجب کاهش

References

- Agarwal, A., Shaida, B., Rastogi, M., & Singh, N.B. (2023). Food packaging materials with special reference to biopolymers-Properties and applications. *Chemistry Africa*, 6, 117–144. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00446-w>
- Akter, J., Hossain, M.A., Takara, K., Islam, M.Z., & Hou, D.X. (2019). Antioxidant activity of different species and varieties of turmeric (*Curcuma* spp.): Isolation of active compounds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 215, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2018.09.002>
- Babaremu, K., Oladijo, O.P., & Akinlabi, E. (2023). Biopolymers: A suitable replacement for plastics in product packaging. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.01.001>
- Barbosa, C.H., Andrade, M.A., Vilarinho, F., Fernando, A.L., & Silva, A.S. (2021). Active edible packaging. *Encyclopedia*, 1, 360–370. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020030>
- Dey, S., Veerendra, G.T.N., Babu, P.S.S.A., Manoj, A.V.P., & Nagarjuna, K. (2024). Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review. *Biomedical Materials and Devices*, 2, 70–112. <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00085-w>
- Dobrucka, R., Vapenka, L., Szymański, M., Pawlik, M., Lasik-Kurdyś, M., & Gumienna, M. (2025). Bio-packaging based on pectin/tragacanth gum with added extracts of cherry waste from the wine industry as a new generation of active films for the food industry. *Foods*, 14, 2203. <https://doi.org/10.3390/foods14132203>
- Ekrami, M., & Emam-Djomeh, Z. (2014). Water vapor permeability, optical and mechanical properties of salep-based edible film. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38, 1812–1820. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12152>
- Elliott, C., & Truman, E. (2020). The power of packaging: A scoping review and assessment of child-targeted food packaging. *Nutrients*, 12(4), 958. <https://doi.org/10.3390/nu12040958>
- Enyoh, C.E., Devi, A., Kadono, H., Wang, Q., & Rabin, M.H. (2023). The plastic within: Microplastics invading human organs and bodily fluids systems. *Environments*, 10, 194. <https://doi.org/10.3390/environments10110194>

10. Fakhouri, F.M., Martelli, S.M., Caon, T., Velasco, J.I., & Mei, L.H. (2015). Edible films and coatings based on starch/gelatin: Films properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crissom grapes. *Postharvest Biology Technology*, 109, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.015>
11. Ghosh, M., & Sarkar, N. (2024). Exploring the world of curcumin: Photophysics, photochemistry, and applications in nanoscience and biology. *ChemBioChem*, 25(13), e202400335. <https://doi.org/10.1002/cbic.202400335>
12. Ghosh, S., Sinha, J.K., Ghosh, S., Vashisth, K., Han, S., & Bhaskar, R. (2023). Microplastics as an emerging threat to the global environment and human health. *Sustainability*, 15, 10821. <https://doi.org/10.3390/su151410821>
13. Hussain, Z., Thu, H.E., Amjad, M.W., Hussain, F., Ahmed, T.A., & Khan, S. (2017). Exploring recent developments to improve antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial efficacy of curcumin: A review of new trends and future perspectives. *Materials Science and Engineering: C*, 77, 1316–1326. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.226>
14. International Institute for Sustainable Development. (2023, January 12). Global plastic outlook calls for more circularity, national roadmaps. IISD SDG Knowledge Hub. <https://sdg.iisd.org/news/global-plastic-outlook-calls-for-more-circularity-national-roadmaps>
15. Karimi Sani, I., Masoudpour-Behabadi, M., Alizadeh Sani, M., Motalebinejad, H., Juma, A.S.M., Asdaghi, A., Eghbaljoo, H., Khodaei, S.M., Rhim, J.-W., & Mohammadi, F. (2023). Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films. *Food Chemistry*, 405, 134964. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134964>
16. Kazantzis, K.T., Koutsonikoli, K., Mavroidi, B., Zachariadis, M., Alexiou, P., Pelecanou, M., Politopoulos, K., Alexandratou, E., & Sagnou, M. (2020). Curcumin derivatives as photosensitizers in photodynamic therapy: Photophysical properties and in vitro studies with prostate cancer cells. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 19(2), 193–206. <https://doi.org/10.1039/c9pp00375d>
17. Khalid, M.Y., & Arif, Z.U. (2022). Novel biopolymer-based sustainable composites for food packaging applications: A narrative review. *Food Packag. Shelf Life*, 33, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100892>
18. Kibria, M.G., Masuk, N.I., Safayet, R., Nguyen, H.Q., & Mourshed, M. (2023). Plastic waste: Challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management. *International Journal of Environmental Research*, 17, 20. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00507-z>
19. Krantzberg, G. (2019). Plastic pollution in the Great Lakes and marine waters: Sources, effects and policy responses. *Journal of Waste Resources and Recycling*, 1(1), 107.
20. Kumar, R., Verma, A., Shome, A., Sinha, R., Sinha, S., Jha, P.K., Kumar, R., Kumar, P., Shubham, Das, S., & et al. (2021). Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. *Sustainability*, 13(18), 9963. <https://doi.org/10.3390/su13179963>
21. Kumar, G., Vyas, S., Sharma, S.N., & Dehalwar, K. (2024). Challenges of environmental health in waste management for peri-urban areas. In M. Nasr & A. Negm (Eds.), *Solid waste management* (pp. 149–168). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. ISBN 978-3-031-60683-0. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60684-7_9
22. Liu, Y., Ma, Y., Liu, Y., Zhang, J., Hossen, M.A., Sameen, D.E., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2022). Fabrication and characterization of pH-responsive intelligent films based on carboxymethyl cellulose and gelatin/curcumin/chitosan hybrid microcapsules for pork quality monitoring. *Food Hydrocolloids*, 124, 107224. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107224>
23. Lu, R., Sameen, D.E., Qin, W., Wu, D., Dai, J., Li, S., & Liu, Y. (2020). Development of polylactic acid films with selenium microparticles and its application for food packaging. Published March 18, 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10030280>
24. Mocanu, A., Isopencu, G., Busuioc, C., Popa, O.-M., Dietrich, P., & Socaciu-Siebert, L. (2019). Bacterial cellulose films with ZnO nanoparticles and propolis extracts: Synergistic antimicrobial effect. *Scientific Reports*, 9(1), 17687. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54118-w>
25. Ncube, L. K., Ude, A.U., Ogunmuyiwa, E.N., Zulkifli, R., & Beas, I.N. (2021). An overview of plastic waste generation and management in food packaging industries. *Recycling*, 6(1), 12. <https://doi.org/10.3390/recycling6010012>
26. Ndwandwe, B.K., Malinga, S.P., Kayitesi, E., & Dlamini, B.C. (2022). Selenium nanoparticles-enhanced potato starch film for active food packaging application. *International Journal of Food Science & Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15990>
27. OECD. (2023). Plastic leakage and greenhouse gas emissions are increasing. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/environment/plastics/increased-plastic-leakage-and-greenhouse-gas-emissions>. <https://doi.org/10.1787/d125c929-en>

28. Osés, S.M., Pascual-Maté, A., de la Fuente, D., de Pablo, A., Fernández-Muiño, M.A., & Sancho, M.T. (2016). Comparison of methods to determine antibacterial activity of honeys against *Staphylococcus aureus*. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 78, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2015.12.005>
29. Pirsá, S., & Mohammadi, B. (2021). Conducting/biodegradable chitosan–polyaniline film; antioxidant, color, solubility and water vapor permeability properties. *Main Group Chemistry*, 20(2), 133–147. <https://doi.org/10.3233/mgc-210007>
30. Rachtanapun, P., Klunklin, W., Jantrawut, P., Jantanasakulwong, K., Phimolsiripol, Y., Seesuriyachan, P., Leksawasdi, N., Chaiyaso, T., Ruksiriwanich, W., Phongthai, S., et al. (2021). Characterization of chitosan film incorporated with curcumin extract. *Polymers*, 13, 963. <https://doi.org/10.3390/polym13060963>
31. Ramos, Ó.L., Reinas, I., Silva, S.I., Fernandes, J.C., Cerqueira, M.A., Pereira, R.N., & Malcata, F.X. (2013). Effect of whey protein purity and glycerol content upon physical properties of edible films manufactured therefrom. *Food Hydrocolloids*, 30, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.001>
32. Ribeiro, A.M., Estevinho, B.N., & Rocha, F. (2021). Preparation and incorporation of functional ingredients in edible films and coatings. *Food Bioprocess Technology*, 14, 209–231. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02528-4>
33. Safie, N.E., Ludin, N.A., Su'ait, M.S., Hamid, N.H., Sepeai, S., Ibrahim, M.A., & Teridi, M.A.M. (2015). Preliminary study of natural pigments photochemical properties of *Curcuma longa* L. and *Lawsonia inermis* L. as TiO₂ photoelectrode sensitizer. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 19(6), 1243–1249.
34. Sharma, S., Jaiswal, A.K., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2020). Ferulic acid incorporated active films based on poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100491>
35. Sharma, S., Sharma, V., & Chatterjee, S. (2023). Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment—A review. *Science Total Environment*, 875, 162627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162627>
36. Sultan, R.A., Rahman, A.N.F., Dirpan, A., & Syarifuddin, A. (2023). Physical, mechanical barrier, antibacterial properties, and functional group of carrageenan-based edible film as influenced by pectin from *Dillenia serrata* fruit peel and curcumin. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 11(3), 1308–1321. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.11.3.32>
37. Suzihaque, M., & Jamian, A.S. (2019). Development of intelligent food packaging from turmeric (*Curcuma longa*). *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. <https://doi.org/10.35940/ijeat.a3037.109119>
38. Tan, H., Yue, T., Xu, Y., Zhao, J., & Xing, B. (2020). Microplastics reduce lipid digestion in simulated human gastrointestinal system. *Environment Science Technology*, 54, 12285–12294. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02608>
39. Van Nong, H., Hung, L.X., Thang, P. N., Chinh, V.D., Vu, L.V., Dung, P.T., Van Trung, T., & Nga, P.T. (2016). Fabrication and vibration characterization of curcumin extracted from turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes of the northern Vietnam. *SpringerPlus*, 5, 1147. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2812-2>
40. Walker, T.R., & Fequet, L. (2023). Current trends of unsustainable plastic production and micro(nano)plastic pollution. *TrAC Trends Anal. Chemistry*, 160, 116984. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984>
41. Wakte, P.S., Sachin, B., Patil, A., Mohato, D., Band, T., & Shinde, D. (2011). Optimization of microwave, ultrasonic and supercritical carbon dioxide assisted extraction techniques for curcumin from *Curcuma longa*. *Separation and Purification Technology*, 79, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.010>
42. Xu, Y., Liu, X., Jiang, Q., Yu, D., Xu, Y., Wang, B., & Xia, W. (2021). Development and properties of bacterial cellulose, curcumin, and chitosan composite biodegradable films for active packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 260, 117778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117778>
43. Yu, Z., Alsammarraie, F.K., Nayigiziki, F.X., Wang, W., Vardhanabhuti, B., Mustapha, A., & Lin, M. (2017). Effect and mechanism of cellulose nanofibrils on the active functions of biopolymer-based nanocomposite films. *Food Research International*, 99, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.009>

Contents

Research Articles

- 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** 111
Z. Korkinejad Gharaee, A. Koocheki, E. Milani
- Optimization of the Properties of pH-Sensitive Biodegradable Intelligent Films Based on Gelatin/Chitin Nanofibers Containing Malva and Amaranth Extracts** 129
N. Taraghikhah, A. Ayaseh, S. Milani, Sh. Vatgar
- Evaluation of Nutritional and Physicochemical Properties of Biscuits Enriched with Roasted Lentil Flour and Rice Bran Powder** 157
A. Ayoubi, M. Balvardi
- Application of Ultrasound as Pretreatment to Improve the Functionality of Whey Protein Powder during Spray Drying** 175
M. Aram Nabi Nia, H. Karazhiyan
- Production of Oleogel Derived from Canola Oil and a Combination of Emulsifiers and Methylcellulose Hydrocolloid via a Direct Method as a Shortening Substitute** 193
M. Ghandrezaee, M. Mazaheri Tehrani, R. Farhoosh, P. Parsa
- Production of Active Biodegradable Antioxidant and Antibacterial Films Based on Salep Powder, Turmeric Powder, and Selenium Powder: A Novel Approach to Sustainable Packaging** 207
S. Mansouryar, S. Pirs, M.K.H. Pirouzifard

Iranian Food Science and Technology Research Journal

Vol. 22

No. 2

2026

Published by:	Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran
Executive Manager:	N. Shahnoushi, Department of Agricultural Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Editor-in-Chief:	M. Yavarmanesh, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Editorial Board:	
Mortazavi, Seyed A.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Shahidi, F.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Habibi najafi, M.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Razavi, Seyed M. A.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Kashaninejad, M.	Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran
Khomeiri, M.	Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran
Farhoosh, R.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Fazli Bazzaz, S.	Department of Pharmaceutical Chemistry, School of Pharmacy, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
Koocheki, A.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Mohebbi, M.	Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Ghanbarzadeh, B.	Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
Alemzadeh, I.	Department of Food Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Rajabzadeh, GH.	Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
Heydarpour, M.	Brigham and Women's Hospital, Boston, Massachusetts. United States America
Ghoddusi, H. B.	School of Human Sciences, London Metropolitan University, England
Khosravidarani, K.	Department of Food Industry, School of Nutrition Sciences & Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
Abbaszadegan, M.	Director Water & Environmental Technology Center, Arizona State University, United States of America
Mohammadifar, M. A.	Research Group for Food Production Engineering, Technical University of Denmark, Denmark
Vosoughi, M.	Department of Food Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Almasi, H.	Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia, Iran
Fathi, M.	Department of Food Science and Technology, Isfahan University of Technology Isfahan, Iran
Abbasi, S.	Department of Food Science and Technology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Borges, N.	Faculty of Nutrition and Food Sciences, University of Porto; Portugal
Moazzami, Ali A.	Doctor of Philosophy, Department of Molecular Sciences, Swedish University, Sweden
Dr. Nkemnaso Obi C.	Department of Microbiology, Michael Okpara University of Agriculture, Umudike, Abia State, Nigeria
Dr, Olalekan Adeyeye S.A.	Department of Food Technology, Hindustan Institute of Technology and Science, Chennai, Tamil Nadu, India

Publisher	Ferdowsi University of Mashhad
Address:	College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
P.O.BOX:	91775- 1163
Fax:	(98)051-38787430
E-Mail:	ifstrj@um.ac.ir
Web Site:	https://ifstrj.um.ac.ir

Contents

Research Articles

- 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 111**
Z. Korkinejad Gharaee, A. Koocheki, E. Milani
- Optimization of the Properties of pH-Sensitive Biodegradable Intelligent Films Based on Gelatin/Chitin Nanofibers Containing Malva and Amaranth Extracts..... 129**
N. Taraghikhah, A. Ayaseh, S. Milani, Sh. Vatgar
- Evaluation of Nutritional and Physicochemical Properties of Biscuits Enriched with Roasted Lentil Flour and Rice Bran Powder..... 157**
A. Ayoubi, M. Balvardi
- Application of Ultrasound as Pretreatment to Improve the Functionality of Whey Protein Powder during Spray Drying..... 175**
M. Aram Nabi Nia, H. Karazhiyan
- Production of Oleogel Derived from Canola Oil and a Combination of Emulsifiers and Methylcellulose Hydrocolloid via a Direct Method as a Shortening Substitute 193**
M. Ghandrezaee, M. Mazaheri Tehrani, R. Farhoosh, P. Parsa
- Production of Active Biodegradable Antioxidant and Antibacterial Films Based on Salep Powder, Turmeric Powder, and Selenium Powder: A Novel Approach to Sustainable Packaging 207**
S. Mansouryar, S. Pirs, M.KH. Pirouzifard