



نشریه علمی پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران



جلد ۲۲ شماره ۴
سال ۱۴۰۵

شاپا: ۱۷۳۵-۴۱۶۱

شماره پیاپی ۱۰۰

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

۳۳۳ آکريل آميد در قهوه اسپرسو: تعيين غلظت و ارزيابي خطر دريافت آن در نوجوانان و بزرگسالان
شيماء تقوى - مرضيه معين فرد - رضا فرهوش

۳۵۱ تأثير ميزان چربي خامه و کنسانتره پروتئين شير بر تشكيل و پايداري بافت سرشير صنعتي
مصطفی مظاهري طهرانی - صدف عبدالله زاده - شکوفه تازيکی شمس آبادی

۳۶۵ بهينه سازي هيدروليز آنزيمي پروتئين هسته زيتون با روش سطح پاسخ و ارزيابي پايداري آن
منا رنجبر - عليرضا صادقي ماهونک - محمد قرباني

مقاله کوتاه پژوهشی

۳۹۱ بررسي اثر سيستئين و بسته بندي اتمسفر اصلاح شده در حفظ کيفيت و زمان نگهداري ريحان سبز
ناهيد نوروzy جاجرم - ناصر صداقت - مسعود تقی زاده

مقالات مروری

۴۰۷ مروري بر مواد اوليه خوراكي قابل استفاده در دستگاه هاي چاپگر سه بعدي غذايي
حنان لشكري - شيدا اسمعيل زاده

مروري جامع بر کاربرد مواد تغيير فاز در بسته بندي مواد غذايي:

۴۳۳ تأثير آن ها بر کارايي زنجيره سرد، و حفظ کيفيت محصول
حنانه يزدان بخش - سودابه اله مرادي - محمد هادي مراديان - مريم عزيزي لعل آبادي

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."

مهر - آبان ۱۴۰۵

شماره ۴

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:

AGRIS, Scopus, CABI, DOAJ, EBSCO, Google scholar, Internet Archive, پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC), سامانه نشریات علمی ایران,

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

- ۳۳۳ آکريل آميد در قهوه اسپرسو: تعيين غلظت و ارزشي خطر دريافت آن در نوجوانان و بزرگسالان
شيما تقوي - مرضيه معين فرد - رضا فروش
- ۳۵۱ تأثير ميزان چربي خامه و کنسانتره پروتئين شير بر تشكيل و پايداري بافت سرشير صنعتي
مصطفی مظاهري طهراني - صدف عبداللهزاده - شکوفه تازيکي شمس آبادي
- ۳۶۵ بهينه سازي هيدروليز آنزيمي پروتئين هسته زيتون با روش سطح پاسخ و ارزشي پايداري آن
منا رنجبر - عليرضا صادقي ماهونک - محمد قرباني

مقاله کوتاه پژوهشی

- ۳۹۱ بررسي اثر سيستئين و بسته بندي اتمسفر اصلاح شده در حفظ کيفيت و زمان نگهداري ريحان سبز
ناهيد نوروزي جاجرم - ناصر صداقت - مسعود تقی زاده

مقالات مروري

- ۴۰۷ مروري بر مواد اوليه خوراكي قابل استفاده در دستگاه هاي چاپگر سه بعدي غذايي
حنان لشکري - شيدا اسمعيل زاده
- ۴۳۳ مروري جامع بر کاربرد مواد تغيير فاز در بسته بندي مواد غذايي: تأثير آنها بر کارايي زنجيره سرد، و حفظ کيفيت محصول
حنانه يزدان بخش - سودابه اله مرادي - محمد هادي مراديان - مريم عزيزي لعل آبادي

Research Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 331-348

Acrylamide in Espresso Coffee: Occurrence and Risk Assessment Study in Adolescents and Adults

Sh. Taghavi¹, M. Moeenfar^{1*}, R. Farhoosh¹

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

(*- Corresponding Author Email: moeenfar@um.ac.ir)

Received: 31.01.2026

Revised: 17.06.2026

Accepted: 27.06.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Taghavi, Sh., Moeenfar, M., & Farhoosh, R. (2026). Acrylamide in espresso coffee: Occurrence and risk assessment study in adolescents and adults. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 331-348. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98206.1560>

Introduction

Coffee is one of the most widely consumed beverages worldwide, with an estimated annual intake of about 500 billion cups. Roasting is a key step in coffee processing that develops the desirable color, flavor, and aroma, but it also promotes the formation of acrylamide through the Maillard reaction. Acrylamide is classified as a probable human carcinogen and has attracted increasing attention due to its occurrence in a variety of heat-treated foods. Given the growing popularity of coffee among the Iranian population, determining acrylamide levels in espresso and assessing the associated health risks are of public health importance. Therefore, this study aimed to determine acrylamide levels in commercially available espresso coffees and assess the related cancer and non-cancer risks in adolescents and adults.

Materials and Methods

In this study, a total of 35 espresso coffee samples were collected from the market. Of these, 26 samples were obtained from coffee shops (ES-C), and 9 were prepared at home from commercial coffee powders using a household espresso machine (ES-H), following common local preparation practices. Acrylamide concentrations in all samples were determined using HPLC-DAD with a mobile phase composed of water/acetonitrile (97:3, v/v) at a flow rate of 0.7 mL/min and a detection wavelength of 202 nm. The average daily intake (ADI) of acrylamide ($\mu\text{g/kg}$ body weight/day) was estimated for adolescents and adults based on the measured acrylamide concentrations and the available consumption data. Health risk assessment was performed by calculating the margin of exposure (MOE) for carcinogenic effects, estimating the incremental lifetime cancer risk (ILCR), and evaluating the non-carcinogenic risk using the target hazard quotient (THQ). The obtained MOE values were compared with the reference value of 10,000. In addition, carcinogenic and non-carcinogenic risks were evaluated against internationally accepted benchmarks, including those established by the United States Environmental Protection Agency (USEPA).

Results and Discussion

Acrylamide was detected in all analyzed espresso samples. The concentration of acrylamide in ES-C ranged from 2.15 to 9.16 $\mu\text{g}/100$ mL and was consistently higher than that observed in ES-H, which ranged from 0.93 to 4.00 $\mu\text{g}/100$ mL. Despite the presence of acrylamide in all samples, the estimated dietary exposure via espresso consumption was relatively low. The EDI of acrylamide from espresso was calculated to be 0.004 $\mu\text{g/kg}$ bw/day for adolescents and 0.007 $\mu\text{g/kg}$ bw/day for adults. For all samples and both age groups, the MOE values were greater than 10,000, indicating a low level of concern and a low priority for risk management regarding



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.2026.98206.1560>

carcinogenic effects. The incremental lifetime cancer risk attributed to acrylamide exposure from espresso consumption was estimated at 0.244×10^{-5} for adolescents and 0.221×10^{-5} for adults. Since both values were below the 10^{-5} benchmark proposed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA), the associated carcinogenic risk was considered to be low. Non-carcinogenic risk indices were 0.0019 for adolescents and 0.0026 for adults, clearly below the threshold of 1, suggesting that non-cancer effects are unlikely at the observed exposure levels. For all evaluated parameters, acrylamide exposure and the associated health risks were higher in adults than in adolescents. This difference can be attributed to higher consumption rates and greater body weight-adjusted intake among adults.

Conclusion

This study shows that acrylamide was present in all espresso coffee samples collected from the market, with coffee shop espresso generally containing higher levels than household espresso coffees. Nevertheless, acrylamide exposure through espresso consumption alone does not appear to pose a serious health risk to the studied adolescent and adult populations. The high MOE values, low estimated cancer risks, and non-carcinogenic indices well below 1 collectively support a low level of concern. However, espresso is considered only one contributor to total dietary acrylamide intake, as acrylamide can also be formed in other thermally processed foods. Therefore, evaluation of combined exposure from various dietary sources and further investigation of cumulative health risks are recommended to provide a more comprehensive risk assessment.

Keywords: Acrylamide, Carcinogenicity, Coffee, Maillard reaction, Risk assessment

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۳۴۸-۳۳۱

آکریل آمید در قهوه اسپرسو: تعیین غلظت و ارزیابی خطر دریافت آن در نوجوانان و بزرگسالان

شیمای تقوی^۱ - مرضیه معین فرد^{۱*} - رضا فرهوش^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

چکیده

قهوه با میانگین مصرف سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد فنجان، یکی از محبوب‌ترین نوشیدنی‌ها در جهان است. فرآیند برشته‌کاری دانه‌های قهوه ضمن ایجاد ویژگی‌های حسی مطلوب، منجر به تشکیل آکریل آمید به عنوان یک ترکیب احتمالاً سرطان‌زا می‌شود. با توجه به افزایش مصرف قهوه در جامعه ایرانی، در این پژوهش محتوای آکریل آمید در ۳۵ نمونه قهوه اسپرسو شامل ۲۶ نمونه تهیه‌شده در کافی‌شاپ‌ها (ES-C) و ۹ نمونه تهیه‌شده با استفاده از اسپرسوساز خانگی (ES-H) اندازه‌گیری شد و سپس ارزیابی خطر دریافت آن در دو گروه سنی نوجوانان و بزرگسالان انجام گرفت. نتایج بیانگر حضور آکریل آمید در همه نمونه‌ها بود، با این حال، مقدار آن در ES-C (۹/۱۶-۲/۱۵ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) بیشتر از ES-H (۴/۰۰-۰/۹۳ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) گزارش شد. میانگین دریافت روزانه آکریل آمید در مجموع ۳۵ نمونه اسپرسو توسط نوجوانان و بزرگسالان به ترتیب ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۷ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز، بدست آمد. حاشیه مواجهه با خطر، در همه نمونه‌ها و برای هر دو گروه سنی، بیشتر از ۱۰۰۰۰ بود. بنابراین خطر قرار گرفتن در معرض آکریل آمید از طریق مصرف اسپرسو در جمعیت مورد مطالعه نگران‌کننده نبوده و با اولویت پایین برای مدیریت خطر شناخته می‌شود. خطر افزایش سرطان در نوجوانان و بزرگسالان به ترتیب $10^{-5} \times 0/244$ و $10^{-5} \times 0/221$ برآورد شد که هر دو از سطح اعلام‌شده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست (10^{-5}) کمتر بودند. خطر غیرسرطان‌زایی در نوجوانان، ۰/۰۰۱۹ و در بزرگسالان، ۰/۰۰۲۶ بدست آمد که به مراتب کمتر از ۱ بود. در مجموع، نتایج نشان داد که دریافت آکریل آمید از طریق مصرف قهوه اسپرسو به‌تنهایی تهدید جدی برای سلامت جامعه هدف محسوب نمی‌شود و میزان مواجهه در بزرگسالان اندکی بیشتر از نوجوانان است. با این حال، مصرف اسپرسو می‌تواند دریافت کلی آکریل آمید را افزایش دهد. بنابراین بررسی همزمان دریافت آن از منابع غذایی مختلف و ارزیابی اثرات تجمعی آن بر سلامت جامعه ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آکریل آمید، ارزیابی خطر، سرطان‌زایی، قهوه، واکنش مایلارد

مقدمه

انتخاب مواد خام، برشته کردن، شرایط نگهداری و روش‌های استخراج است که بر اساس مناطق جغرافیایی و عادات مصرف‌کننده بسیار متفاوت هستند (Schouten, Tappi, & Romani, 2020). الگوهای مصرف قهوه بین کشورهای مختلف نیز به‌طور قابل توجهی متفاوت است. به‌عنوان مثال، بزرگسالان در آمریکای شمالی معمولاً ۲ فنجان، و در بسیاری از مناطق اروپا حداقل ۴ فنجان در روز قهوه می‌نوشند. در

قهوه با میانگین مصرف سالانه ۵۰۰ میلیارد فنجان در سال یا ۹/۴ میلیون تن در سال، یکی از محبوب‌ترین نوشیدنی‌ها در جهان است (Taghizadeh, Azizi, Hassanpourfard, Rezaee, & Karimi, 2023). کیفیت کلی یک فنجان قهوه، که به ظاهر یک نوشیدنی "ساده" قلمداد می‌شود، نتیجه کنترل دقیق عوامل متعددی مانند

^۱ - گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(* - نویسنده مسئول: Email: moeenfard@um.ac.ir)

بودند، اشاره کردند (Fan et al., 2023). تاکنون، چپیس و سیبزمینی سرخ شده (۵-۸۴۴۰ میکروگرم بر کیلوگرم نمونه)، قهوه و فرآورده‌های آن (۳۷-۱۱۳۹ میکروگرم بر کیلوگرم نمونه)، و فرآورده‌های پخت مانند نان، بیسکوئیت و غلات صبحانه (۱۰-۲۵۴۲ میکروگرم بر کیلوگرم نمونه) مهم‌ترین منابع دریافت آکریل‌آمید توسط افراد جامعه به شمار می‌روند (Sebastià et al., 2023; Yan et al., 2023). لازم به ذکر است که حضور آکریل‌آمید در غذاهای خام، آب پز (Yan et al., 2023)، و قهوه سبز (Bertuzzi, Martinelli, Mulazzi, & Rastelli, 2020) گزارش نشده است.

آکریل‌آمید بعد از بلع، اشتیاق و یا جذب از طریق پوست، به راحتی وارد جریان خون شده (Yan et al., 2023)، و در کبد بعد از تشکیل کانژوگ با گلوکاتینون، به گلیسیدآمید متابولیزه می‌شود که به راحتی در بافت‌های بدن بخش می‌گردد. به دنبال اتصال گلیسیدآمید با اسیدهای نوکلئیک یا پروتئین‌ها (مانند آنزیم‌ها) و تشکیل ترکیبات افزایشی^۵، آسیب‌های جدی مانند جهش‌زایی و تخریب سلولی رخ داده و خطر ابتلا به سرطان‌هایی مانند سرطان جداره رحم، تخمدان، پستان، کلیه، و لنفوم فولیکولار (نوعی سرطان خون) افزایش می‌یابد (Fan et al., 2025; Sharma et al., 2025; Zahir et al., 2025). بنابراین بر طبق مستندات آژانس بین‌المللی تحقیقات بر روی سرطان^۶، آکریل‌آمید به عنوان "سرطان‌زای احتمالی برای انسان" و در گروه 2A طبقه‌بندی شده است (Zahir et al., 2025). در اتحادیه اروپا، آکریل‌آمید به عنوان سرطان‌زا (Category 1B)، جهش‌زا (Category 1B) و سم دستگاه تولید مثل (Category 2, fertility) شناخته می‌شود (Eslamizad et al., 2019). اگرچه به منظور حفظ سلامت افراد جامعه، حداکثر مقدار مجاز دریافت آکریل‌آمید، یک میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز تعیین شده است (Yan et al., 2023)، اما در میان کشورهای اتحادیه اروپا، مقدار تخمینی که باعث بروز خطرات جدی برای سلامتی می‌شود، از ۰/۴ الی ۳/۴ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز گزارش شده است (Zahir et al., 2025). به طور کلی، قرارگیری در معرض این ترکیب از طریق رژیم غذایی برای نوزادان و کودکان ۱/۹ - ۵/۸ و برای افراد مسن ۰/۴ الی ۰/۹ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز تخمین زده شده است (EFSA, 2015; Fan et al., 2023).

تحلیل خطر^۷، فرآیندی است مشتمل بر سه مؤلفه ارزیابی خطر^۵، مدیریت خطر^۶ و ارتباط خطر^۷. مؤلفه اول، یعنی ارزیابی خطر، فرآیندی است جهت برآورد خطر برای یک موجود، سیستم یا (زیر)جامعه. ارزیابی خطر می‌تواند مربوط به مواجهات گذشته، حال یا مواجهات بالقوه در

میان کشورهای اروپایی نیز تفاوت‌ها قابل توجهی مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه، میانگین و حداکثر مصرف قهوه در لهستان به ترتیب ۲۱۰ و ۱۴۵۰ میلی‌لیتر در روز، در دانمارک ۷۵۰ و ۱۸۰۰ میلی‌لیتر در روز، و در سوئد، حداکثر مصرف معادل ۲۸۲۹ میلی‌لیتر در روز گزارش شده است (Arisseto & Vicente, 2015). در خاورمیانه، چای همچنان رایج‌ترین نوشیدنی گرم به شمار می‌رود، اما به دلیل تغییر سبک زندگی، مصرف قهوه نیز رشد قابل توجهی داشته است (Malmir et al., 2019). در پژوهش‌های مرتبط با جامعه ایرانی، متوسط مصرف قهوه برای هر نفر معادل ۲ گرم در روز (Roudbari et al., 2021; Taghizadeh et al., 2023)، چای و سایر دمنوش‌های گیاهی نیز به ترتیب ۴ و ۲ گرم در روز گزارش شده است (Taghizadeh et al., 2023).

کنترل درجه برشته‌گی یکی از مهم‌ترین عوامل در تولید دانه‌های قهوه با کیفیت بالا محسوب می‌شود. برشته کردن یک فرآیند بسیار پیچیده، مشتمل بر انتقال جرم و انرژی است. طی واکنش مایلارد، تغییرات فیزیکی و شیمیایی متعددی در دانه قهوه رخ می‌دهد که در ایجاد ساختار، رنگ، عطر و طعم خاص قهوه دخیل هستند (Freitas et al., 2024). با این حال، ترکیبات مضر نیز طی واکنش مایلارد تولید می‌شوند که در این میان می‌توان به آکریل‌آمید اشاره کرد. آکریل‌آمید با فرمول شیمیایی $(CH_2=CH-CONH_2)$ یک آمید غیراشباع، کوچک، و محلول در آب (۲۰۴ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر در °C ۲۵) است. این ترکیب به صورت جامد سفید رنگ، با نقطه ذوب °C ۸۴/۵ و نقطه جوش °C ۱۹۲/۶ و فشار بخار پایین (۰/۰۰۷ میلی‌لیتر جیوه در °C ۲۵) یافت می‌شود (PubChem, 2023). افراد جامعه از طرق مختلف در معرض آکریل‌آمید قرار می‌گیرند که از این میان می‌توان به رژیم غذایی، سیگار، آب آشامیدنی، حرفه و شغل اشاره کرد (Zahir, Ge, & Khan, 2025). در صنعت غذا، آکریل‌آمید از طریق واکنش بین گروه‌های آمینه آزاد (عمدتاً از آسپاراژین) و ترکیبات کربونیلی (منشأ گرفته از قندهای احیاکننده، فرآورده‌های حاصل از هیدرولیز روغن مانند دی‌کربونیل‌ها، آکرولین و اسیدآکریلیک) در دمای بالاتر از °C ۱۲۰ و طی فرآیندهایی مانند سرخ کردن، گریل کردن، تست کردن، و برشته کردن تشکیل می‌شود (Khaloo Kermani, Moenfar, Farhoosh, & Alves, 2023; Sebastião et al., 2023). محققان سازمان ملی غذایی سوئد (SNFA) و دانشگاه استکهلم در سال ۲۰۰۲، برای اولین بار به حضور مقادیر قابل توجه آکریل‌آمید در مواد غذایی نشاسته‌دار که تحت تیمار حرارتی قرار گرفته

5- Risk assessment
6- Risk management
7- Risk communication

1- Swedish National Food Administration (SNFA)
2 Adducts
3- International Agency for Research on Cancer (IARC)
4- Risk analysis

مواد و روش‌ها

مواد شيميايي

استاندارد آکريل آميد، آمين‌هاي اول و دوم (PSA)^۳ و اکتادسیل سیلان (C18)^۴ با خلوص ۹۹/۹ درصد از شرکت سیگما فراهم شدند. استات روی بدون آب، پتاسیم هگزاسیانوفرات (II) و اسید استیک گلاسیال از شرکت مرک (آلمان) خریداری شدند. حلال‌های مورد استفاده همگی درجه کروماتوگرافی داشته و شامل استونیتریل، هگزان (مرک، آلمان)، و آب (شارلو، اسپانیا) بودند. فیلتر سرسرنگی PVDF^۴ (قطر ۲/۵ سانتی‌متر، حفرات ۰/۴۵ میکرومتر) از شرکت Membrane Solution (آمریکا) فراهم شدند. ستون با تعادل آب‌دوستی و چربی‌دوستی^۵ (Oasis® HLB: ۲۰۰ میلی‌گرم، ۶ میلی‌لیتر) از Waters Corporation (ایرلند) تهیه شدند. آب دیونیزه با هدایت الکتریکی ۰/۷-۱/۳ میکروزیمنس (بتاژن) جهت تهیه محلول‌های استاندارد و نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

تهیه نمونه‌های قهوه

در این پژوهش ۲ گروه قهوه اسپرسو مورد آزمون قرار گرفتند: (الف) قهوه‌های اسپرسو تهیه شده از کافی شاپ‌های مختلف در سطح شهر (۲۶ نمونه، ES-C^۶)، (ب) قهوه‌های اسپرسو تهیه شده از انواع پودرهای قهوه خریداری شده از شرکت‌های معتبر داخلی و خارجی (۹ نمونه، ES-H^۷) برای این منظور از اسپرسو ساز De'Longhi مدل EC685 استفاده شد. اسپرسوهای خانگی با حجم ۵۰±۵ میلی‌لیتر با ۷/۵±۰/۵ گرم پودر قهوه و تحت فشار ۱۵ بار تهیه شدند. مشخصات انواع قهوه مورد استفاد در این پژوهش تا حد ممکن جمع‌آوری شده و در جدول ۱، نشان داده شده است.

استخراج آکريل آميد

برای این منظور از روش دریو و همکاران (Deribew & Woldegiorgis, 2021) با کمی اصلاحات استفاده شد. در ابتدا، ۵ میلی‌لیتر از قهوه اسپرسوی سانتریفیوژ شده دو بار متوالی توسط ۲/۵ میلی‌لیتر هگزان تا حدی چربی‌زدایی شد. فاز چربی‌زدایی شده با یک میلی‌لیتر کاریز ۱ (۱۰/۶ گرم پتاسیم هگزاسیانوفرات (II) با آب مقطر به حجم ۱۰۰ رسيد) و یک میلی‌لیتر محلول کاریز ۲ (۲۱/۹ گرم استات روی با ۲ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال ترکیب شد و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ رسيد) مخلوط شده و بعد از ۵ دقیقه سکون، سانتریفیوژ (۵

آينده باشد. همچنين می‌تواند ماهيت کيفی و يا کمی داشته باشد و معمولاً به جهت حفظ سلامت عموم، به نحوی تخمین زده می‌شود که از کم‌برآورد کردن خطر واقعی اجتناب شود. به عبارت دیگر مقدار خطر بیان شده معمولاً از مقدار واقعی بیشتر است (Kashani, Gharibzadeh, Nakhjirgan, Younesian, & Zaeim, 2021; Karami, Akbari-Adergani, Jahed, Khaniki, Shariatifar, & Sadighara, 2022). در پژوهشی ارزيابي خطر را برای سطوح آکريل آميد در انواع قهوه فوری (پودر خالص يا کافی میکس) موجود در بازار تهران برای افراد بزرگسال مورد بررسی قرار دادند. میانگین دریافت آکريل آميد از کافی میکس ۰/۰۰۰۸۴۵ و برای پودر خالص قهوه فوری معادل ۰/۰۰۰۸۱۵ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست آمد که بسیار اندک بود. متعاقباً میزان حاشیه مواجهه با خطر (MOE)^۱ برای پودر خالص و کافی میکس به ترتیب ۱۰^۵ × ۵ و ۱۰^۴ × ۵/۲ بدست آمد که به مراتب از ۱۰^۴ بیشتر بود. بنابراین مصرف این محصولات خطری را از جهت قرارگرفتن در معرض آکريل آميد ایجاد نمی‌کند (Karami et al., 2022).

علی‌رغم مواجهه اجتناب‌ناپذیر جمعیت با آکريل آميد از طریق رژیم غذایی، تاکنون حد مجاز مشخص و یکپارچه‌ای برای میزان این ترکیب در اغلب مواد غذایی و نوشیدنی‌ها تعیین نشده است، به استثنای آب آشامیدنی، که مقدار آکريل آميد در آن نباید از ۰/۱ میکروگرم در لیتر تجاوز کند (Xu et al., 2014). با توجه به طبقه‌بندی آکريل آميد به‌عنوان ترکیبی با پتانسیل سرطان‌زایی، ارزيابي خطر آن عمدتاً بر پیامدهای سرطان‌زایی متمرکز است. با این حال، اگرچه سطوح بالای دریافت، احتمال ظهور علائم ذکر شده در بخش‌های قبل را افزایش می‌دهد، اما بروز اثرات نامطلوب سلامت به عوامل دیگری نظیر مدت‌زمان مواجهه، الگوی کلی رژیم غذایی و روش‌های فرآوری و پخت مواد غذایی نیز وابسته است. از این رو، برآورد دقیق نقش آکريل آميد در بروز سرطان در جمعیت‌های مختلف با عدم قطعیت قابل توجهی همراه است (Garg & Singla, 2025)، و در نتیجه، مطالعات ارزيابي خطر اغلب به‌صورت موردی و وابسته به الگوی مصرف هر جامعه انجام می‌شوند. با توجه به افزایش چشمگیر مصرف قهوه در جامعه ایرانی و پیامدهای بالقوه آکريل آميد بر سلامت مصرف‌کنندگان، در این پژوهش غلظت آکريل آميد در ۳۵ نمونه قهوه جمع‌آوری شده از کافی شاپ‌ها و فروشگاه‌های سطح شهر اندازه‌گیری و متعاقب آن، ارزيابي خطر ناشی از مصرف این نوشیدنی مورد بررسی قرار گرفت.

5- Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB) cartridge

6- Espresso coffee– Coffee shop

7- Espresso coffee– Household espresso machine

1- Margins of Exposure (MOE)

2- Primary and secondary amine (PSA)

3- C18–octadecylsilane (C18)

4- Polyvinylidene fluoride (PVDF)

از ستون خارج شدند، دور ریخته شد و مابقی جمع‌آوری گردید. جهت خالص‌سازی بیشتر، ۲ میلی‌لیتر عصاره پاک‌سازی شده با ۱۰۰ میلی‌گرم PSA و ۵۰ میلی‌گرم C18 مخلوط و سپس سانتریفیوژ شد. عصاره تمیز نهایی بعد از عبور از فیلتر سرسرنگی PVDF به HPLC-PDA تزریق شد.

دقیقه، ۵۰۰۰ دور بر دقیقه) گردید. به فاز شفاف میانی، مجدداً هگزان و محلول‌های کاریز اضافه شده و این فرآیند تکرار گردید. لایه میانی جهت خالص‌سازی بیشتر، از ستون HLB عبور داده شد. جهت آماده‌سازی ستون، به‌ترتیب ۳/۵ میلی‌لیتر متانول و ۳/۵ میلی‌لیتر آب با خلوص کروماتوگرافی از کارتریج عبور داده شد. بعد از تخلیه کامل، ۳ میلی‌لیتر فاز شفاف بالای ستون قرار گرفت. ۴ الی ۵ قطره ابتدایی که

جدول ۱- مشخصات قهوه‌های مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های اسپرسو در این پژوهش

Table 1- General description of ground coffees used for preparation of espresso coffee brews in the present study

کد نمونه Sample code	واریت قهوه Coffee variety	محل کاشت Origin	درجه برشته‌گی Roasting degree
نمونه‌های جمع‌آوری شده از کافی شاپ‌ها (ES-C) *Samples from coffee shop (ES-C)			
1	عربیکا (۶۰٪) / روبوستا (۴۰٪) Arabica (40%) / Robusta (60%)	برزیل / ویتنام Brazil/Vietnam	متوسط Medium
2	-	-	-
3	روبوستا (۱۰۰٪) Robusta (100%)	هند / اتیوپی / اندونزی India/Ethiopia/Indonesia	تیره Dark
4	-	-	-
5	-	-	-
6	عربیکا (۷۰٪) / روبوستا (۳۰٪) Arabica (70%) / Robusta (30%)	عربیکا (اتیوپی) / روبوستا (اندونزی) Arabica (Ethiopia) / Robusta (Indonesia)	متوسط Medium
7	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	کلمبیا Colombia	متوسط Medium
8	-	-	-
9	-	-	-
10	-	-	متوسط تا تیره Medium to dark
11	عربیکا (۷۰٪) / روبوستا (۳۰٪) Arabica (70%) / Robusta (30%)	کلمبیا / هند Colombia / India	متوسط Medium
12	عربیکا (۷۰٪) / روبوستا (۳۰٪) Arabica (70%) / Robusta (30%)	کلمبیا / اتیوپی Colombia / Ethiopia	-
13	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	برزیل Brazil	متوسط Medium
14	-	-	-
15	-	-	-
16	عربیکا (۴۰٪) / روبوستا (۶۰٪) Arabica (40%) / Robusta (60%)	عربیکا (برزیل) / روبوستا (ویتنام) Arabica (Brazil) / Robusta (Vietnam)	متوسط تا تیره Medium to dark
17	-	-	-
18	-	-	-
19	-	-	-
20	عربیکا (۸۰٪) / روبوستا (۲۰٪) Arabica (80%) / Robusta (20%)	عربیکا (برزیل) / روبوستا (ویتنام) Arabica (Brazil) / Robusta (Vietnam)	متوسط Medium
21	-	-	-
22	-	-	-
23	-	-	-
24	-	-	-
25	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	کلمبیا / اندونزی Colombia / Indonesia	-
26	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	متوسط Medium

نمونه‌های تهیه شده توسط اسپرسوساز خانگی (ES-H)
Samples prepared using household espresso machine (ES-H) **

27	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	متوسط تا تیره Medium to dark
28	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	اتیوپی Ethiopia	متوسط تا تیره Medium to dark
29	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	تیره Dark
30	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	متوسط Medium
31	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	متوسط تا تیره Medium to dark
32	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	متوسط Medium
33	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	-
34	عربیکا (۱۰۰٪) Arabica (100%)	-	روشن Light
35	عربیکا و روبوستا Arabica & Robusta	-	متوسط Medium

* اطلاعات تا حد ممکن از مسئولین کافی‌شاپ‌ها جمع‌آوری شدند. ** اطلاعات تا حد ممکن از اطلاعات روی بسته‌بندی قهوه‌های خریداری شده جمع‌آوری شد.

*Information was collected from coffee shops. **Information was collected from labels of packaging

تعیین مقدار آکریل آمید به روش کروماتوگرافی

برای این منظور از HPLC (KNAUER، آلمان)، به طریق فاز معکوس با کمک ستون Eurospher 100-5 C18، با طول ۲۵۰ و قطر ۴/۶ میلی‌متر انجام شد. دستگاه کروماتوگرافی مجهز به پمپ (Smartline Pump 1000)، سمپلر اتومات (Smartline) (Autosampler 3900) و آشکارساز فرابنفش-مرئی (PDA) (Detector 2800) بود. فاز متحرک شامل ترکیب آب (۹۷٪) - استونیتریل (۳٪) با سرعت ۰/۷ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. ۲۰ میکرولیتر از نمونه (عصاره تمیز شده یا محلول‌های استاندارد) به ستون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، تزریق گردید و شناسایی آکریل آمید در طول موج ۲۰۲ نانومتر انجام گرفت. پردازش داده‌های کروماتوگرافی نیز با نرم‌افزار EZChrom Elite انجام شد. جهت تعیین مقدار آنالیت در نمونه مجهول از روش استاندارد خارجی و رسم منحنی کالیبراسیون در محدوده غلظتی ۳۰-۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر آب استفاده شد. شناسایی آکریل آمید در نمونه‌های مجهول با مقایسه زمان بازداری و طیف آکریل آمید در نمونه مجهول و محلول استاندارد صورت گرفت.

اعتبارسنجی روش کروماتوگرافی

روش بهینه کروماتوگرافی، با در نظر گرفتن پارامترهای ضریب تعیین (R^2)، صحت (درصد بازیابی)، حداقل مقدار تشخیص (LOD) و

حداقل مقدار اندازه‌گیری (LOQ) اعتبار سنجی شد. جهت محاسبه مقادیر LOD و LOQ از معادله (۱) استفاده شد. در این معادله، S/N نسبت سیگنال به نویز (برای LOD معادل ۳ و برای LOQ معادل ۱۰)، C غلظت نمونه، N مقدار نویز زمان شناسایی نمونه شاهد و H ارتفاع سیگنال در زمان شناسایی نمونه می‌باشد (Khaloo Kermani et al., 2023).

$$LOD, LOQ = \frac{C \times S/N \times N}{H} \quad (1)$$

بررسی ارزیابی خطر

تخمین دریافت روزانه آکریل آمید (EDI) از طریق مصرف

قهوه اسپرسو

نعمت الهی و همکاران (Nematollahi et al., 2020)، مصرف قهوه (گرم/روز) در گروه‌های سنی متفاوت در جامعه ایرانی را به صورت $1/70 \pm 0/47$ در کودکان (۱۰-۳ سال)، $2/03 \pm 0/85$ در نوجوانان (۱۱-۱۷ سال)، $4/63 \pm 1/79$ در بزرگسالان (۶۰-۱۶ سال) و $2/68 \pm 0/66$ در افراد مسن (۹۶-۶۱ سال) گزارش کردند. در نتیجه مقادیر $0/85$ و 2 گرم در روز به ترتیب برای نوجوانان و بزرگسالان در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفت (Karami et al., 2022; Nematollahi et al., 2020). میانگین وزن یک نوجوان (۱۱ الی ۱۷

BMDL₁₀های ۱۷۰، ۳۱۰ و ۴۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز، مورد استفاده قرار گرفتند.

$$MOE = \frac{BMDL_{10}}{EDI} \quad (3)$$

تخمین خطر افزایش سرطان در طول عمر

خطر افزایش سرطان در طول عمر به دلیل دریافت آکریل آمید از طریق رژیم غذایی (در اینجا مصرف قهوه) که توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده^۷ (USEPA) پیشنهاد شده است، بر اساس معادله (۴) محاسبه شد. در این معادله،^۸ ILCR (پارامتر بدون بعد) احتمال افزایش سرطان در طول زندگی یک فرد را بیان می کند. پارامتر C_i مقدار آکریل آمید در ماده غذایی i ($\mu\text{g/kg}$)، IR_i میزان مصرف ماده غذایی i در هر گروه سنی (g/day)، ED^9 زمان قرار گرفتن در معرض آکریل آمید (بر حسب سال، برای نوجوانان ۷ و برای بزرگسالان ۴۳ سال)، EF^{10} تناوب قرار گرفتن در معرض آکریل آمید (۳۶۵ روز در سال)، SF^{11} عامل شیب آکریل آمید ($(\text{mg/kg/day})^{-1} \cdot 0.5$)، CF^{12} فاکتور تصحیح ($10^{-6} \text{ mg}/\mu\text{g}$)، $ADAF^{13}$ ضریب تعدیل وابسته به سن (برای ۳ تا ۱۵ سال ۳ و برای سنین بیشتر از ۱۶ سال ۱ در نظر گرفته می شود)، bw وزن هر فرد در گروه سنی مورد نظر (kg) و AT^{14} میانگین زمان برای سرطان زایی مواد (۲۵۵۵۰ روز بر مبنای سن ۷۰ سال و ۶۰۲۵ روز بر مبنای سن ۱۷ سال) می باشد (Nematollahi et al., 2020).

$$ILRC = \frac{C_i \times IR_i \times ED \times EF \times SF \times CF \times ADAF}{BW \times AT} \quad (4)$$

تخمین خطر غیرسرطان زایی

ضریب خطر هدف^{۱۵} (THQ) به منظور تخمین خطر غیر سرطان زایی به هنگام دریافت آکریل آمید از ماده غذایی i به کمک معادله (۵) محاسبه شد که در آن THQ، ضریب خطر هدف و یک پارامتر بدون بعد است. EDI، میزان دریافت آکریل آمید از طریق ماده

در حدود ۶۰ کیلوگرم و بزرگسال (۱۸ الی ۶۰ سال) نیز ۷۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد (Nematollahi et al., 2020). بر این اساس، مقدار تخمینی دریافت روزانه آکریل آمید ($\mu\text{g/kg bw/day}$) از طریق نوشیدن قهوه اسپرسو برای هر گروه سنی از روی معادله (۲) محاسبه گردید، که در آن C_i ، مقدار آکریل آمید در ماده غذایی i ($\mu\text{g/kg}$)، IR_i میزان مصرف ماده غذایی i (g/day)، و bw وزن بدن هر فرد (kg) بر اساس گروه های سنی است (Nematollahi et al., 2020).

Estimated Daily Intake (EDI)

$$= \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times IR_i}{bw \times 1000} \quad (2)$$

تخمین مواجهه با خطر آکریل آمید

برای ارزیابی میزان خطر آکریل آمید دریافت شده از رژیم غذایی، اولین مرحله تعیین حاشیه مواجهه با خطر آکریل آمید^۱ (MOE) است که برای گروه های سنی از طریق معادله (۳) محاسبه شد. در این معادله، MOE حاشیه مواجهه با خطر آکریل آمید (بدون بعد)، BMDL₁₀ حد اطمینان پایین دوز محک^۲ ($\mu\text{g/kg bw/day}$) و EDI مقدار تخمینی دریافت روزانه آکریل آمید از طریق مصرف ماده غذایی i ($\mu\text{g/kg bw/day}$) است (Nematollahi et al., 2020). برای تخمین اثر سرطان زایی آکریل آمید، کمیته مشترک FAO/WHO درباره افزودنی های غذایی^۳ (JECFA) دو مقدار متفاوت از حد اطمینان پایین دوز محک یا همان BMDL₁₀ را برای آکریل آمید پیشنهاد کرده اند: (الف) ۳۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز برای شروع تومورهای پستانی در موش های صحرایی ماده، و (ب) ۱۸۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز برای بروز تومورهای غده هاردیرین^۴ در موش. این درحالی است که مرجع ایمنی غذایی اروپا^۵ (EFSA)، مقدار ۱۷۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز را برای بروز پیامدهای نئوپلاستیک^۶ و ۴۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز را برای سمیت عصبی در موش صحرایی تعیین کرده است. در این پژوهش،

7 - United States Environmental Protection Agency (USEPA)

8- Incremental lifetime cancer risk (ILCR)

9- Exposure duration (ED)

10- Exposure frequency (EF)

11- Slope factor of acrylamide (SF)

12- Correction factor (CF)

13- Age-dependent adjustment factor (ADAF)

14- Average time (AT)

15- Target hazard quotient (THQ)

1- Margins of Exposure (MOE)

2 - Benchmark dose lower confidence limit 10 (BMDL10)

3- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additive (JECFA)

4- Harderian gland

5- European Food Safety Authority (EFSA)

۶- فرآیند نئوپلاستیک معمولاً به مجموعه ای از جهش های سوماتیک در ژن های خاص اطلاق می شود که متعاقباً باعث ایجاد تومور می شوند. به عبارت دیگر نئوپلاسم رشد غیر طبیعی بافتی است که می تواند خوش خیم (غیر سرطانی) یا بدخیم (سرطانی) باشد.

بالا تر در اسپرسوسازهای تجاری باشد که منجر به استخراج طیف وسیعی از ترکیبات خواهد شد.

نتایج اعتبارسنجی که در جدول ۲ نشان داده شده است، بیانگر پاسخ خطی در محدوده غلظتی ۲۵-۳۰۰۰ میکروگرم بر لیتر با ضریب تعیین ۰/۹۹۷ بود. تکرارپذیری داده‌ها قابل قبول بوده و ضریب تغییرات طی سه روز متوالی کمتر از ۴ درصد (۳/۵۹-۰/۶۵ درصد) به دست آمد. مقادیر LOD و LOQ به ترتیب ۹/۱۹ و ۳۰/۶۲ میکروگرم بر لیتر محاسبه شدند. به مقادیر ۵ و ۲۰/۴ میکروگرم بر کیلوگرم از طریق HPLC-DAD (Endshaw & Belay, 2020)، ۶ و ۲۳ میکروگرم بر کیلوگرم از طریق SPE-HPLC-UV (Haiyan Wang, 2008) و محدوده ۳/۶-۴/۳ و ۱۲/۱-۱۴/۳ توسط HPLC-UV (Oroian,) (Amariei, & Gutt, 2015) به ترتیب برای LOD و LOQ در منابع اشاره شده است. درصد بازیابی از نمونه قهوه ۱۰۰ درصد عربیکا با درجه برستگی متوسط ۱/۵ ± ۹۲ بدست آمد. کارایی انواع روش‌های آنالیز به شکل قابل توجهی به روش استخراج و آنالیز بستگی دارد. در یک مقاله مروری جامع (Sebastià et al., 2023)، انواع روش‌های استخراج و آنالیز آکریل آمید مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان دادند که درصد بازیابی آکریل آمید در بین مقالات مورد مطالعه از ۷۰ تا ۱۰۹ درصد متغیر بود.

مقدار آکریل آمید در قهوه‌های اسپرسو

مقدار آکریل آمید نمونه‌ها در شکل ۲ خلاصه شده که نشان‌دهنده تنوع محتوای آکریل آمید در اسپرسوهای مورد مطالعه می‌باشد. مقدار میانگین در ۳۵ نمونه ۲/۱۱ ± ۴/۰۶ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر گزارش شد. با این حال، طیف تغییرات غلظت آکریل آمید در ES-C گسترده‌تر از ES-H بود. این مقدار در ES-C از ۰/۱۱ ± ۲/۱۵ تا ۰/۴۵ ± ۹/۱۶ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر و در ES-H از ۰/۰۵ ± ۰/۹۳ تا ۰/۱۱ ± ۴/۰۰ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر بدست آمد. با توجه به اینکه مقادیر بالای آکریل آمید می‌تواند خطر سرطان‌زایی را افزایش دهد، تنها درصدی از نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق، در محدوده خطر قرار می‌گیرند که در بخش‌های بعدی به آن خواهیم پرداخت. اگرچه، روش دم کردن قهوه بر غلظت آکریل آمید در قهوه تأثیر قابل توجهی دارد، با این حال، مقادیر حاصل از این پژوهش با سایر گزارش‌ها همخوانی داشت. در مقالات به مقادیر ۵/۸ - ۲/۷ و ۴/۹ - ۲/۴ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر به ترتیب برای اسپرسوهای کافئین دار و بدون کافئین پودرهای تجاری موجود در بازار (Alves, Soares, Casal,) (Fernandes, & Oliveira, 2010)، ۴/۰ - ۰/۷۷ میکروگرم بر ۱۰۰

غذایی i ($\mu\text{g/kg bw/day}$) و RFD^1 دوز مرجع خوراکی آکریل آمید یا به عبارتی "مصرف روزانه قابل تحمل" (TDI^2) آن ترکیب است. JECFA مقدار RFD را برای آکریل آمید در ۱ الی ۴ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز تعیین کرده است که در این مطالعه مقدار متوسط ۲ ($\mu\text{g/kg bw/day}$) در نظر گرفته شد. اگر THQ بیشتر از یک باشد، بیانگر وجود یک خطر بالقوه و غیرقابل قبول برای سلامت جامعه انسانی مورد مطالعه است (Aghvami et al., 2023; Karami et al., 2022).

$$\text{THQ} = \frac{\text{EDI}}{\text{RFD}} \quad (5)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

استخراج تمامی نمونه‌ها در دو تکرار انجام شده و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار بیان شدند. نتایج مورد تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) قرار گرفته و مقایسه میان میانگین داده‌های آزمایشی با آزمون دانکن در سطح اطمینان ۵ درصد ($p < 0.05$) انجام پذیرفت. نتایج با نرم‌افزار Minitab آنالیز و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی روش کروماتوگرافی

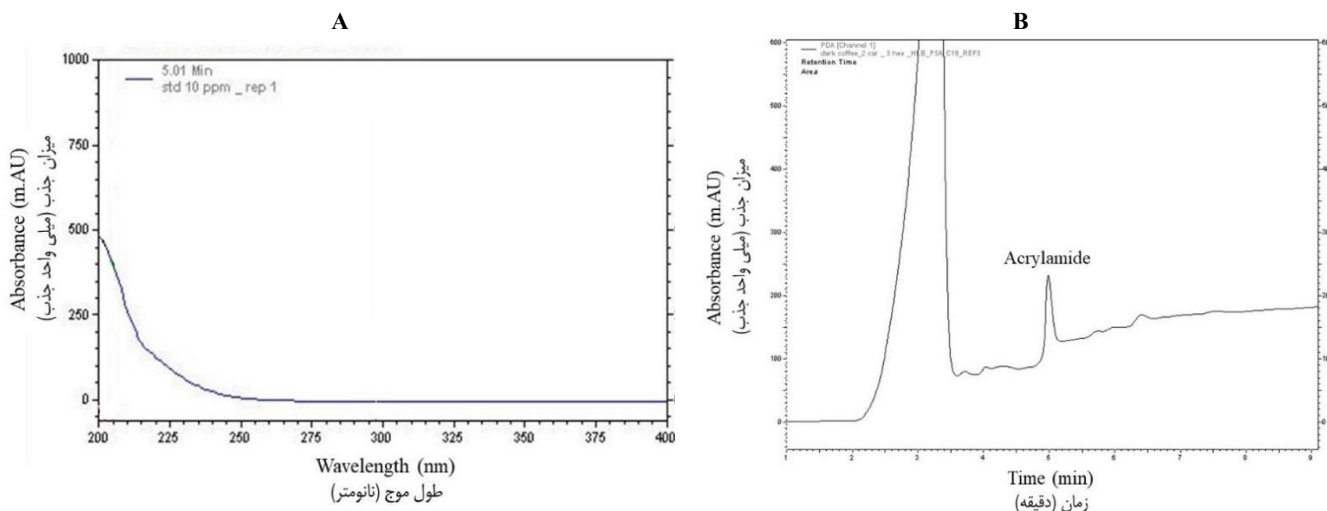
ترکیب حلال به منظور شناسایی آکریل آمید موجود در قهوه با نسبت آب (۹۷٪) / استونیتریل (۳٪) و سرعت ۰/۷ میلی‌لیتر بر دقیقه در ۲۰۲ نانومتر (شکل ۱-۱A)، منجر به تفکیک پذیری مطلوب آنالیت و تداخل‌گرها و ظهور پیک‌های باریک از نمونه گردید که امکان شناسایی آکریل آمید را در زمانی کمتر از ۶ دقیقه فراهم کرد (شکل ۱-۱B). با توجه به نتایج سایر محققین (Michalak, Gujska, & Kunciewicz, 2013; Wang, Feng, Guo, Shuang, & Choi, 2013)، حلال استونیتریل نسبت به متانول توانایی بهتری در جداسازی پیک نمونه و تداخل‌گرها دارد، جلوی پهن‌شدگی پیک را می‌گیرد، و فشار وارد بر ستون را کاهش می‌دهد. مهم‌تر از همه این‌که استونیتریل در طول موج‌های کم (مانند ۲۰۲ نانومتر)، تابش UV را نسبت به متانول کمتر جذب می‌کند و در نتیجه به دلیل کاهش نویز پس زمینه، خط پایه از ثبات بیشتری برخوردار خواهد بود (Shimadzu, 2021). مشاهدات تجربی ما نشان داد که کروماتوگرام‌های ES-C به مراتب آلوده‌تر از ES-H بود که می‌تواند به دلیل استفاده از مقادیر بیشتر قهوه، استفاده از قهوه‌ها با ترکیب شیمیایی و درجات برشته‌گی متفاوت، و یا دما و فشار

2- Tolerable daily intake (TDI)

1- Oral reference dose (RFD)

قهوه ترک، فرانسوی، فیلتر شده و اسپرسو (Michalak, Czarnowska-Kujawska, Gujska, Klepacka, & Tońska, 2020)، ۵۵۰ - ۳۹۰ نانوگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر در قهوه سرد (Han, Boo, & Chung, 2020) و ۴۳۰-۳۵۰ و ۴۱۰-۵۴۰ نانوگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر به ترتیب در قهوه گرم و قهوه سرد (Kang, Lee, Davaatseren, & Chung, 2020) اشاره شده است.

میلی لیتر در اسپرسوی وندینگ ماشین‌ها^۱ (Mesías, & Morales, 2016)، ۰/۴ الی ۱۵/۹ میکروگرم آکریل آمید در ۲۰۰ میلی لیتر قهوه (۲۲ قهوه فوری، ۷ قهوه سنتی ترک، ۱۲ قهوه دم کرده آماده برای نوشیدن) (Basaran, Aydin, & Kaban, 2020)، ۱/۰۵ الی ۲/۸۵ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر قهوه فیلتر شده (Galuch et al., 2019)، ۴/۱۰، ۳/۱۹، ۲/۹۵ و ۲/۱۳ میکروگرم بر ۱۰۰ میلی لیتر نیز به ترتیب در



شکل ۱- (الف) طیف محلول استاندارد آکریل آمید. (ب) کروماتوگرام نمونه واقعی (۱۰۰ درصد عربیکا)

Fig. 1. (A) Spectra of acrylamide standard solution. (B) Chromatogram of real sample (100% Arabica coffee)

جدول ۲- پارامترهای اعتبارسنجی آنالیز آکریل آمید توسط کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا

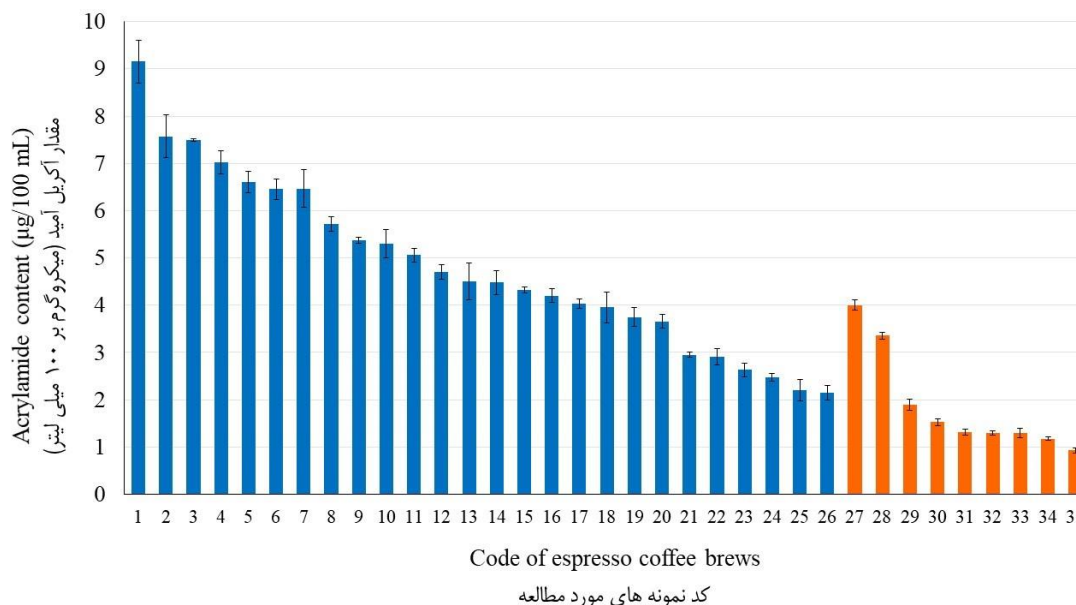
Table 2- Validation parameters for acrylamide analysis using HPLC-DAD

پارامترها Parameters	اعتبار Values
محدوده خطی منحنی کالیبراسیون Linearity range (µg/L)	25-3000
ضریب تعیین (N = ۶) Coefficient of determination (N = 6)*	0.997
حداقل غلظت قابل تشخیص Limit of detection (LOD) (µg/L)**	9.19
حداقل غلظت قابل اندازه گیری Limit of quantification (LOQ) (µg/L)**	30.62
بازیابی Recovery (%)	92 ± 1.5
ضریب تغییرات (CV%) برای سه محلول استاندارد طی سه روز متوالی	250 µg/L 3.5 ± 0.29
Coefficient of variation (%CV) for three standard solutions during the three sequential days	500 µg/L 2.8 ± 0.11 1000 µg/L 0.65 ± 0.02

* N تعداد محلول‌های استاندارد منحنی کالیبراسیون، ** محاسبه شده از نسبت سیگنال به نویز ۳ (حد تشخیص) و ۱۰ (حد اندازه گیری)، *** غلظت‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰

میکروگرم بر لیتر به ترتیب به عنوان سطوح کم، متوسط و زیاد منحنی کالیبراسیون انتخاب شده و برای تعیین ضریب تغییرات طی سه روز متوالی مورد آزمون قرار گرفتند.

*N number of calibration curve standard, **Calculated from the signal to noise ratio of 3 (LOD) and 10 (LOQ), *** The concentrations of 250, 500, and 1000 µg/L were selected as the low, medium, and high levels of the calibration curve, respectively, and were tested to determine the coefficient of variation over three consecutive days.



شکل ۲- مقدار آکریل آمید (میکروگرم در ۱۰۰ میلی لیتر) در قهوه اسپرسو ستون‌های آبی رنگ (کد ۱ الی ۲۶) نمونه‌های جمع‌آوری شده از کافی شاپ‌های سطح شهر (ES-C) و ستون‌های نارنجی (کد ۲۷ الی ۳۵)، انواع تهیه شده توسط اسپرسوساز خانگی (ES-H) می‌باشند.

Fig. 2. Concentration of acrylamide ($\mu\text{g}/100\text{ mL}$) in espresso coffee analyzed in the present study Blue columns (code 1 to 26) are espresso coffee obtained from coffee shops (ES-C); Orange columns (code 27 to 35) are espresso prepared using household espresso machine (ES-H)

استانداردسازی محاسبات در نظر گرفته شد. این مقدار در محدوده حداقل مقادیر متداول برای تهیه اسپرسو قرار دارد و با توجه به تفاوت در نوع دستگاه، اندازه سید پرتافیلتر، درجه آسیاب و عادات مصرف‌کنندگان، ممکن است در شرایط واقعی مقدار پودر قهوه مصرف‌شده بیشتر از این مقدار باشد. در چارچوب محاسبات این مطالعه، استفاده از مقدار بیشتر پودر قهوه برای تهیه همان حجم اسپرسو، مقدار آکریل آمید متناظر بر حسب میکروگرم بر کیلوگرم پودر قهوه و در نتیجه برآورد دریافت روزانه را کاهش می‌دهد. بنابراین، استفاده از مقدار ۷/۵ گرم در محاسبات، از کم‌برآورد شدن مواجهه و خطر جلوگیری کرده و برآوردی محافظه‌کارانه‌تر ارائه می‌دهد. با این حال، تبدیل مقدار آکریل آمید از مبنای نوشیدنی به مبنای پودر قهوه و برآورد دریافت روزانه، همچنان با درجاتی از عدم قطعیت همراه است. در پژوهش حاضر، داده‌های ستون "مقدار آکریل آمید متناظر در پودر قهوه" در تمامی محاسبات بعدی به‌عنوان C_i یا همان مقدار آکریل آمید در ماده غذایی i (میکروگرم بر کیلوگرم) جهت مطالعه ارزیابی خطر مورد استفاده قرار گرفتند. شایان ذکر است که طبق مقررات اتحادیه اروپا به شماره ۲۱۵۸/۲۰۱۷ مصوب سال ۲۰۱۷، سطح معیار آکریل آمید برای قهوه برشته‌شده ۴۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم و برای قهوه فوری ۸۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است (Strocchi, Rubiolo, & Cordero, Bicchi, & Liberto, 2022).

بررسی ارزیابی خطر

تخمین دریافت روزانه آکریل آمید از طریق مصرف قهوه

اسپرسو

برای تخمین مواجهه با آکریل آمید از طریق مصرف مواد غذایی، دو نوع داده شامل داده‌های وقوع (غلظت آکریل آمید در قهوه به‌دست‌آمده) و داده‌های مصرف (میزان دریافت محصول غذایی توسط یک جمعیت معین) مورد نیاز است (Nematollahi et al., 2020). قرار گرفتن در معرض آکریل آمید از طریق مصرف ماده غذایی با ضرب این دو داده محاسبه می‌شود و سپس بر میانگین وزن بدن جمعیت تقسیم می‌شود و به‌صورت میلی گرم یا میکروگرم آکریل آمید بر کیلوگرم وزن بدن در روز بیان می‌شود (Akbari-Adergani et al., 2023). در این مطالعه، حجم انواع اسپرسوها بین ۴۰ تا ۷۰ میلی لیتر متغیر بودند که به‌طور میانگین ۵۰ میلی لیتر در نظر گرفته شد. بر این اساس، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، به‌طور متوسط مقدار آکریل آمید در هر فنجان ۵۰ میلی لیتری برای ES-C و ES-H به‌ترتیب 0.92 ± 0.24 و 0.53 ± 0.93 میکروگرم در ۵۰ میلی لیتر و در مجموع ۳۵ نمونه مورد مطالعه 1.06 ± 0.23 میکروگرم در ۵۰ میلی لیتر بدست آمد. با فرض این که برای استخراج هر ۵۰ میلی لیتر اسپرسو، ۷/۵ گرم پودر قهوه مصرف شده باشد، مقدار آکریل آمید متناظر در پودر قهوه مورد مطالعه محاسبه گردید (جدول ۳). لازم به ذکر است که این فرض به‌منظور

جدول ۳- حداقل، حداکثر و میانگین مقدار آکریل آمید در قهوه‌های اسپرسو و تخمین مقدار متناظر آن در پودر قهوه*

Table 3- Minimum, maximum and average concentration of acrylamide in espresso coffees and estimation of its respective content in coffee powder*

نمونه Sample	تعداد نمونه‌ها Number of samples	مقدار آکریل آمید در نمونه‌های اسپرسو Acrylamide content in espresso samples (µg/50 mL)			مقدار آکریل آمید متناظر در پودر قهوه Acrylamide content in respective coffee powder (µg/kg)		
		حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average
اسپرسو - کافی شاپ Espresso - Coffee shop (ES-CS)	26	1.08	4.58	2.41 ± 0.92	143.33	610.50	320.90 ± 122.57
اسپرسو - تهیه شده در منزل Espresso - Household espresso machine (ES-H)	9	0.46	2.00	0.93 ± 0.53	61.83	266.99	124.30 ± 71.59
مجموع نمونه‌ها All samples	35	-	-	2.03 ± 1.06	-	-	270.35 ± 140.90

* در تمامی نمونه‌ها فرض شد که هر فنجان قهوه اسپرسو معادل ۵۰ میلی‌لیتر باشد و از ۷/۵ گرم قهوه آسیاب شده استخراج شده باشد.

* It was assumed that each espresso cup contains 50 mL and was prepared using 7.5 g coffee powder

(۱/۱۰۶)، فرانسه (۰/۱۶۸)، و سوئد (۰/۱۷۱) تفاوت قابل توجهی با هم دارند. در اسپانیا، مقدار دریافت آکریل آمید از قهوه تهیه شده در وندینگ ماشین‌ها در محدوده ۰/۰۱۸ الی ۰/۰۵۶ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) گزارش شد (Mesías, & Morales, 2016). در ترکیه نیز EDI گروه‌های مختلف سنی از ۱۸ الی ۶۵ سال در حدود ۰/۰۸۴ ± (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست آمد (Basaran, & Aydin, 2020).

به‌طور خلاصه، میزان EDI برای نوجوانان در محدوده ۰/۰۰۹ - ۰/۰۰۱ و برای بزرگسالان در محدوده ۰/۰۱۶ - ۰/۰۰۲ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) متغیر بود (جدول ۴). با توجه به تفاوت در فرهنگ‌ها و عادات غذایی، مقادیر متفاوتی برای مواجهه با آکریل آمید از طریق مصرف قهوه در بین کشورهای مختلف گزارش شده است. به‌عنوان مثال مقدار دریافت آکریل آمید بر حسب (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) در کشوری مانند انگلستان (۰/۰۰۵)، ایرلند (۰/۰۰۴)، هلند (۰/۰۴۸)، لاتویا (۰/۰۲۹)، دانمارک

جدول ۴- تخمین دریافت آکریل آمید (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) از طریق مصرف قهوه اسپرسو توسط نوجوانان (۱۷-۱۱ سال) و بزرگسالان (۶۰-۱۸ سال)

Table 4- Estimation of dietary intake of acrylamide (µg/body weight/day) via espresso coffee in adolescents (11-17 years) and adults (18-60 years)

نمونه Sample	تعداد نمونه‌ها Number of samples	نوجوانان Adolescents			بزرگسالان Adults		
		حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average
اسپرسو - کافی شاپ Espresso - Coffee shop (ES-C)	26	0.002	0.009	0.005	0.004	0.016	0.009
اسپرسو - تهیه شده در منزل Espresso - Household espresso machine (ES-H)	9	0.001	0.004	0.002	0.002	0.004	0.003
مجموع نمونه‌ها All samples	35	-	-	0.004	-	-	0.007

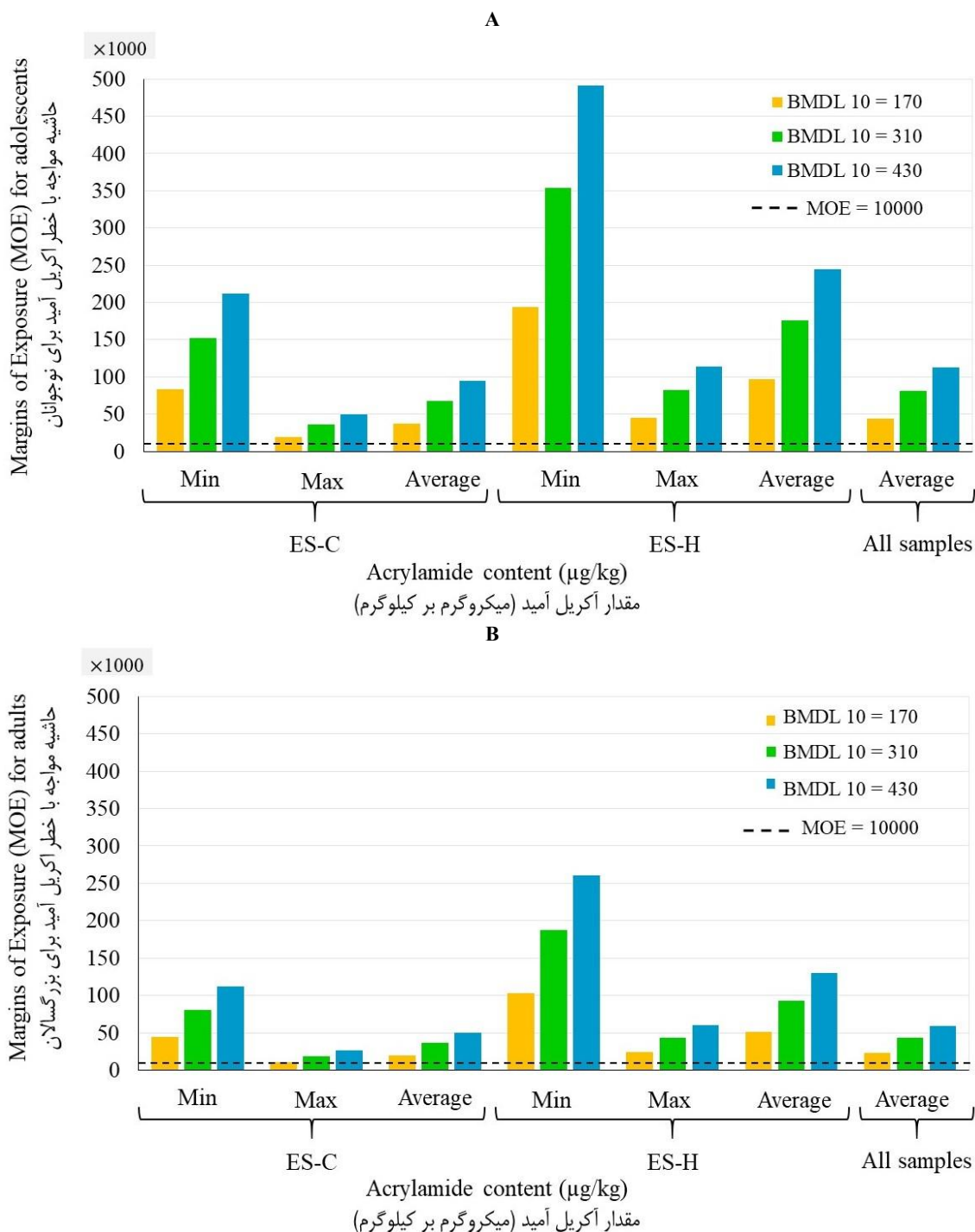
طبق توصیه‌های WHO و طبق قوانین EFSA، مقادیر MOE معادل ۱۰۰۰۰ یا بالاتر، "سطحی از قرار گرفتن در معرض" یک ترکیب را بیان می‌کند که نگران‌کننده نیست و با اولویت پایین برای مدیریت خطر شناخته می‌شود. در مقابل، مقادیر کمتر از ۱۰۰۰۰ برای MOE، بیانگر پتانسیل بالای خطر برای سلامت جامعه هدف به شمار می‌روند (Akbari-Adergani et al., 2023; Fan et al., 2023). مقدار MOE در همه نمونه‌ها و برای هر دو گروه سنی نوجوانان (شکل ۳-۳A)، و بزرگسالان (شکل ۳-۳B)، بیشتر از ۱۰۰۰۰ بود. بنابراین خطر اثرات نامطلوب بر سلامتی مانند سرطان‌زایی در اثر مصرف اسپرسو در جمعیت مورد مطالعه احتمالاً ناچیز است. کمترین مقدار MOE محاسبه شده در این پژوهش که می‌تواند با سطح خطر نسبتاً بالا همراه باشد، ۱۰۴۴۲ بود که در اسپرسوی کد ۱ و برای افراد بزرگسال، توسط BMDL₁₀ با مقدار ۱۷۰ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) محاسبه گردید (شکل ۳-۳B). به‌طور کلی، MOE برآورد شده ناشی از میانگین دریافت روزانه از طریق مصرف قهوه اسپرسو توسط بزرگسالان از نوجوانان کمتر است. به عبارتی، خطر آکریل آمید بر سلامتی بزرگسالان جدی‌تر از نوجوانان است. در هر دو گروه سنی مورد مطالعه، ES-C نسبت به ES-H به دلیل داشتن مقادیر بیشتر آکریل آمید، MOE کمتری را نشان دادند که با خطر بیشتر برای سلامتی رابطه مستقیم دارد.

تعیین و ارزیابی خطر سلامتی سطوح آکریل آمید در انواع پودر خالص قهوه فوری و کافی‌میکس موجود در بازار تهران توسط کرمی و همکاران (Karami et al., 2022) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر بیشتر بودن مقدار آکریل آمید در پودر خالص قهوه فوری نسبت به کافی‌میکس بود. آن‌ها با استفاده از (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) BMDL₁₀ = ۱۷۰، مقدار MOE را ۵۰۰۰۰۰ (پودر خالص) و ۵۲۰۰۰۰ (کافی میکس) و با استفاده از (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) BMDL₁₀ = ۴۳۰، مقدار MOE را ۲۰۰۰۰۰ (پودر خالص) و ۲۰۸۰۰۰ (کافی میکس) محاسبه کردند که به مراتب از مقادیر محاسبه شده در این پژوهش بالاتر بود. این نتایج بیانگر خطر ناچیز آکریل آمید این محصولات برای سلامت جامعه مصرف‌کننده است (Karami et al., 2022). در برخی از مطالعات پیشین که در آن‌ها MOE با مقادیر کم بدست آمده بود، ارتباط مثبتی بین EDI و سمیت ژنتیکی و سرطان‌زایی آکریل آمید گزارش شد (Riboldi, Vinhas, & Moreira, 2014).

نعمت‌اللهی و همکاران (Nematollahi et al., 2020)، محتوای آکریل آمید را در ۱۹۵ نمونه غذایی (۲۵ نمونه نان صنعتی و سنتی، ۴۲ نمونه کیک و بیسکوئیت، ۲۶ نمونه شکلات و شربتی، ۵۰ نمونه اسنک بر پایه سیب‌زمینی و ذرت، ۱۶ نمونه قهوه، ۲۴ نمونه مغزیجات برشته و ۱۲ نمونه فست فود مانند پیتزا، سوسیس و همبرگر) موجود در سوپرمارکت‌های تهران اندازه‌گیری کرده و ارزیابی خطر ناشی از دریافت آن را در طیف وسیعی از مردم اعم از کودکان، نوجوانان و بزرگسالان بررسی کردند. مقدار آکریل آمید برندهای مختلف قهوه بین ۱۰۶ تا ۱۷۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم بدست آمد که علیرغم غلظت بالا، به دلیل کمترین میزان پایین مصرف در روز برای تمام گروه‌های سنی، تنها ۱ تا ۲ درصد از دریافت روزانه را به خود اختصاص دادند (Nematollahi et al., 2020). نتایج ما با این پژوهشگران همخوانی داشت. با در نظر گرفتن سهم ۱/۵ درصد، به‌طور متوسط مقدار EDI برای نوجوانان ۰/۱۵ و برای بزرگسالان ۰/۰۹ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) محاسبه شد. مطالعات اخیر در اسپانیا نیز ادعا کرده‌اند که مصرف قهوه تنها مسئول ۳ درصد از دریافت روزانه آکریل آمید در این کشور است (Peris-Camarasa, Pardo, Fernández, Dualde, & Coscollà, 2023).

حاشیه مواجهه با خطر آکریل آمید

استفاده از MOE مهمترین راه برای ارزیابی خطر ناشی از مصرف آکریل آمید در قهوه است. به غیر از آب آشامیدنی، برای سایر مواد خوراکی TDI مشخص و معینی در اتحادیه اروپا توصیه نشده است. به همین دلیل، MOE به‌منظور ارزیابی خطر این آلاینده بر سلامت انسان توسط JECFA ارائه گردید (Xu et al., 2014). همانطور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد، MOE با استفاده از BMDL₁₀ معادل ۱۷۰، ۳۱۰ و ۴۳۰ (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز)، محاسبه گردید. BMDL مقداری از آلاینده است که از مطالعات اپیدمیولوژیک یا مطالعات بر روی حیوانات آزمایشگاهی بدست می‌آید و حداقل دوز از یک آلاینده را بیان می‌کند که خطری واضح برای سلامتی ایجاد می‌کند. به‌عنوان مثال BMDL₅ یا BMDL₁₀، به‌ترتیب بیانگر غلظتی از آلاینده هستند که باعث افزایش ۵ یا ۱۰ درصدی القای سرطان یا شروع رشد تومر می‌شوند (Kashani et al., 2021). به‌طور کلی، MOE ابزاری است که توسط محققین برای بیان سطوح ایمن ناشی از وجود آلاینده در غذا و خوراک استفاده می‌شود (Barrios-Rodríguez et al., 2021) و رهنمودهایی را برای مسئولین مدیریت خطر فراهم کرده و نشان می‌دهد که مواجهات انسانی تا چه حد به مواجهات قابل سنجش در حیوانات آزمایشگاهی، نزدیک هستند.



شکل ۳- مقدار حاشیه مواجهه با خطر سرطان زایی آکریل آمید (MOE) با استفاده از (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) ۴۳۰، ۳۱۰، ۱۷۰ در BMDL₁₀ = ۱۷۰ (الف) نوجوانان (۱۱-۱۷ سال) و (ب) بزرگسالان (۱۸-۶۰ سال). ES-C (اسپرسوی کافی شاپ‌ها)، ES-H (اسپرسوی تهیه شده با اسپرسوساز خانگی)

Fig. 3. Margin of exposure (MOE) values for carcinogenicity of acrylamide based on BMDL₁₀= 170, 310, 430 (µg/kg bw/day) for (A) adolescents (11–17 years), and (B) adults (18–60 years). ES-C (espresso obtained from coffee shops), ES-H (espresso prepared using household espresso machine)

خطر غیرسرطان‌زایی (THQ) و سرطان‌زایی (ILCR)

آکریل آمید

یکی دیگر از خروجی‌های قابل استفاده، تخمین خطر با محاسبه ILCR است. مقادیر حاصل از تخمین خطر افزایش سرطان در طول عمر یا همان ILCR در جدول ۵ نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها و در هر دو گروه سنی مورد مطالعه، مقدار محاسبه شده کمتر از 1×10^{-5} است. نکته قابل توجه این است که علی‌رغم EDI متفاوت بین دو گروه سنی، خطر سرطان‌زایی (هر چند بسیار ناچیز) برای هر دو گروه سنی نسبتاً مشابه بود. این عدد یعنی 1×10^{-5} ، حد مجاز خطر

سرطان‌زایی آکریل آمید در طول عمر است که توسط USEPA تعیین شده و بدین معنی است که از هر ۱۰۰۰۰۰ نفری که در مواجهه با این غلظت آکریل آمید قرار گیرند، حد مجاز ابتلا به سرطان در طول عمر، یک نفر خواهد بود (Eslamizad et al., 2019). بنابراین، طبق نتایج جدول ۵، هر دو گروه سنی مورد مطالعه با مصرف انواع قهوه اسپرسو در معرض خطر سرطان‌زایی آکریل آمید قرار ندارند. هیچ شواهد اپیدمیولوژیک واضحی وجود ندارد که نشان دهد آکریل آمید در دوزهای پایین، خطر سرطان را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Eslamizad et al., 2019).

جدول ۵- تخمین خطر افزایش سرطان در طول عمر (ILCR) و خطر غیرسرطان‌زایی (THQ)

Table 5- Estimation of incremental lifetime cancer risk (ILCR) and target hazard quotient (THQ)

نمونه Sample	تعداد نمونه‌ها Number of samples	مقدار آکریل آمید Acrylamide content (µg/kg)	ILCR		THQ	
			نوجوانان Adolescents	بزرگسالان Adults	نوجوانان Adolescents	بزرگسالان Adults
اسپرسو - کافی شاپ Espresso - Coffee shop (ES-CS)	26	حداقل Min	$10^{-5} \times 0.129$	0.117×10^{-5}	0.001	0.0019
		حداکثر Max	$10^{-5} \times 0.550$	0.500×10^{-5}	0.0043	0.0081
		میانگین Average	$10^{-5} \times 0.289$	0.263×10^{-5}	0.0023	0.0043
اسپرسو - تهیه شده در منزل Espresso - Household espresso machine (ES-H)	9	حداقل Min	$10^{-5} \times 0.055$	0.050×10^{-5}	0.0004	0.0008
		حداکثر Max	$10^{-5} \times 0.241$	0.219×10^{-5}	0.0019	0.0036
		میانگین Average	$10^{-5} \times 0.112$	0.102×10^{-5}	0.0009	0.0017
مجموع نمونه‌ها All samples	35	میانگین Average	$10^{-5} \times 0.244$	0.221×10^{-5}	0.0019	0.0036

اسپرسو ممکن است برای سلامتی مضر باشد، اما این خطر بسیار ناچیز است. همچنین THQ حاصل از مصرف ES-C تقریباً دو برابر بیشتر از ES-H بدست آمد که به دلیل مقدار بیشتر آکریل آمید در این دسته از اسپرسوها بود. همچنین، خطر غیرسرطان‌زایی برای بزرگسالان نیز در حدود دو برابر بیشتر از نوجوانان برآورد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خطر ناشی از مصرف آکریل آمید از طریق مصرف قهوه اسپرسو مورد ارزیابی قرار گرفت. ۲۶ قهوه اسپرسو از کافی‌شاپ‌های سطح شهر جمع‌آوری شدند (ES-C) و ۹ نمونه نیز توسط اسپرسوساز خانگی و از پودرهای تجاری، تهیه شدند (ES-H).

تخمین خطر غیرسرطان‌زایی آکریل آمید با محاسبه ضریب خطر هدف^۱ (THQ) محاسبه شد که از تقسیم EDI بر RFD (به‌طور متوسط ۲ میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست می‌آید (Aghvami et al., 2023). در مطالعات ارزیابی خطر آکریل آمید مشخص شده است که اگر THQ کمتر از ۱ باشد، احتمال اثرات نامطلوبی آکریل آمید بر سلامتی ناچیز است، در حالی که THQ برابر یا بیشتر از ۱، بیانگر وجود یک خطر بالقوه و غیرقابل قبول برای سلامت جامعه هدف است (Aghvami et al., 2023; Karami et al., 2022). در پژوهش ما، میانگین THQ برآورد شده از طریق مصرف قهوه اسپرسو در مجموع ۳۵ نمونه مورد مطالعه برای نوجوانان 0.0019 و در بزرگسالان 0.0036 بدست آمد که به مراتب کمتر از ۱ است. این بدان معنی است که اگرچه دریافت آکریل آمید از طریق مصرف قهوه

1- Target hazard quotient (THQ)

نتایج این مطالعه نشان داد که آکریل آمید در تمامی نمونه‌های قهوه اسپرسو مورد بررسی، قابل شناسایی بود و غلظت آن در نمونه‌های تهیه شده در کافی‌شاپ‌ها عموماً بالاتر از اسپرسوهای تهیه شده از پودرهای تجاری در شرایط خانگی بدست آمد، که می‌تواند به دلیل تفاوت در وارپته‌های قهوه، مقدار قهوه جهت استخراج و نیز تفاوت در پارامترهای استخراج (دما، فشار، میزان فشرده کردن پودر داخل پرتافیلتر) و مدل دستگاه اسپرسوساز باشد. میانگین دریافت روزانه آکریل آمید توسط نوجوانان و بزرگسالان به ترتیب 0.004 و 0.007 (میکروگرم/کیلوگرم وزن بدن/روز) بدست آمد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی خطر شامل حاشیه مواجهه (MOE)، خطر سرطان‌زایی و شاخص خطر غیرسرطان‌زایی همگی در محدوده‌ای قرار داشتند که نشان‌دهنده نگرانی اندک از نظر سلامت عمومی است. بنابراین، مصرف قهوه اسپرسو به تنهایی در جامعه مورد مطالعه تهدید جدی برای سلامت مصرف‌کنندگان محسوب نمی‌شود. با این حال، باید توجه داشت که قهوه اسپرسو یکی از منابع بالقوه دریافت آکریل آمید در رژیم غذایی است و مصرف آن می‌تواند به افزایش دریافت تجمعی این ترکیب در بدن منجر شود. از آنجا که آکریل آمید در طیف وسیعی از مواد غذایی فرآوری شده حرارتی مانند محصولات سیب‌زمینی، نان و فرآورده‌های غلات نیز تشکیل می‌شود، دریافت همزمان آن از چندین منبع غذایی ممکن است سطح مواجهه کلی را افزایش دهد. از این رو، ارزیابی خطر آکریل آمید نباید صرفاً محدود به یک ماده غذایی باشد و لازم است الگوی کلی رژیم غذایی در نظر گرفته شود. همانند هر مطالعه‌ای، این پژوهش نیز با محدودیت‌هایی همراه بوده است. از جمله محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به تعداد کم نمونه، و نیز عدم تفاوت میان مصرف‌کنندگان (بانوان و آقایان) اشاره کرد. همچنین داده‌های مصرف

برای برآورد دریافت روزانه بر اساس فرضیات عمومی مصرف بوده و ممکن است بازتاب‌دهنده دقیق الگوی مصرف در همه جمعیت‌ها نباشد. این مورد در ایران نیازمند مطالعه‌ای دقیق و گسترده است که می‌تواند از طریق تکمیل پرسش‌نامه‌ها در شهرهای مختلف، منجر به ارزیابی‌هایی قابل قبول و نزدیک به واقعیت گردد. در نهایت، با توجه به روند رو به افزایش مصرف انواع قهوه در جامعه ایرانی و تفاوت‌های الگوی مصرف بر اساس جنسیت (بانوان و آقایان) و سن (نوجوانان و بزرگسالان)، انجام مطالعات تکمیلی و گسترده‌تر در این زمینه ضرورت دارد. این پژوهش می‌تواند به عنوان نقطه آغازین در مسیر شناخت دقیق‌تر میزان مواجهه و ارزیابی خطرات بالقوه مصرف قهوه از منظر سلامت عمومی تلقی شود. علاوه بر این، انجام مطالعات جامع‌تر برای ارزیابی دریافت تجمعی آکریل آمید از منابع مختلف غذایی در کنار بررسی الگوهای واقعی مصرف قهوه در گروه‌های سنی مختلف می‌تواند به ارائه برآورد دقیق‌تر از سطح مواجهه و مدیریت بهتر خطرات احتمالی برای سلامت جامعه کمک کند.

منابع تأمین مالی

این کار توسط دانشگاه فردوسی مشهد (۵۱۷۰۸ / ۳) پشتیبانی مالی شد.

میزان مشارکت نویسندگان

شیمیا تقوی: انجام آزمایش‌ها. **مرضیه معین فرد:** مفهوم‌سازی، نظارت، منابع، تأمین مالی، مدیریت پروژه، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، تحلیل رسمی، اعتبارسنجی، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش. **رضا فرهوش:** نظارت، منابع.

References

1. Aghvami, M., Mohammadi, A., Khaniki, G.J., Ahmadi, M., Moazzen, M., Arabameri, M., & Shariatifar, N. (2023). Investigation of cocoa and cinnamon effect on acrylamide formation in cakes production using GC/MS method: A risk assessment study. *Food Chemistry: X*, 18, 100629. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100629>
2. Akbari-Adergani, B., Shahbazi, R., Esfandiari, Z., Kamankesh, M., Vakili Saatloo, N., Abedini, A., . . . Sadighara, P. (2023). Acrylamide content of industrial and traditional popcorn collected from Tehran's market, Iran: A risk assessment study. *Journal of Food Protection*, 86(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2022.10.001>
3. Alves, R.C., Soares, C., Casal, S., Fernandes, J.O., & Oliveira, M.B.P.P. (2010). Acrylamide in espresso coffee: Influence of species, roast degree and brew length. *Food Chemistry*, 119(3), 929-934. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.051>
4. Ariseto, A.P., & Vicente, E. (2015). Chapter 65 - Estimate of Acrylamide Intake from Coffee and Health Risk Assessment. In V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 575-584). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00065-6>
5. Barrios-Rodríguez, Y.F., Pedreschi, F., Rosowski, J., Gómez, J.P., Figari, N., Castillo, O., & Mariotti Celis, M.S. (2021). Is the dietary acrylamide exposure in Chile a public health problem? *Food Additives & Contaminants: Part A*, 38(7), 1126-1135. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1914867>

6. Basaran, B., & Aydin, F. (2020). Estimating the acrylamide exposure of adult individuals from coffee: Turkey. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 37(12), 2051-2060. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1819570>
7. Basaran, B., Aydin, F., & Kaban, G. (2020). The determination of acrylamide content in brewed coffee samples marketed in Turkey. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 37(2), 280-287. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1685133>
8. Bertuzzi, T., Martinelli, E., Mulazzi, A., & Rastelli, S. (2020). Acrylamide determination during an industrial roasting process of coffee and the influence of asparagine and low molecular weight sugars. *Food Chemistry*, 303, 125372. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125372>
9. Deribew, H.A., & Woldegiorgis, A.Z. (2021). Acrylamide levels in coffee powder, potato chips and French fries in Addis Ababa city of Ethiopia. *Food Control*, 123, 107727. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107727>
10. EFSA, E. P. o. C. i. t. F. C. (2015). Scientific Opinion on acrylamide in food. *EFSA Journal*, 13(6), 4104. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4104>
11. Endeshaw, H., & Belay, A. (2020). Optimization of the roasting conditions to lower acrylamide content and improve the nutrient composition and antioxidant properties of *Coffea arabica*. *PloS One*, 15(8), e0237265. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237265>
12. Eslamizad, S., Kobarfard, F., sitsimpikou, C., Tsatsakis, A., Tabib, K., & Yazdanpanah, H. (2019). Health risk assessment of acrylamide in bread in Iran using LC-MS/MS. *Food and Chemical Toxicology*, 126, 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.02.019>
13. Fan, M., Xu, X., Lang, W., Wang, W., Wang, X., Xin, A., . . . Zhu, B. (2023). Toxicity, formation, contamination, determination and mitigation of acrylamide in thermally processed plant-based foods and herbal medicines: A review. *Ecotoxicology Environment Safty*, 260, 115059. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115059>
14. Freitas, V.V., Borges, L.L.R., Castro, G.A.D., Almeida, L.F., Crepalde, L.T., Kobi, H.d.B., . . . Stringheta, P.C. (2024). Influence of roasting levels on chemical composition and sensory quality of Arabica and Robusta coffee: A comparative study. *Food Bioscience*, 59, 104171. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104171>
15. Galuch, M.B., Magon, T.F.S., Silveira, R., Nicacio, A.E., Pizzo, J.S., Bonafe, E.G., . . . Visentainer, J. V. (2019). Determination of acrylamide in brewed coffee by dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME) and ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). *Food Chem*, 282, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.114>
16. Garg, R., & Singla, N. (2025). An architecture for acrylamide detection in carbohydrate-rich food products using deep learning method. *Journal of Food Composition and Analysis*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107497>
17. Haiyan Wang, A.W.M.L.C., Shaomin Shuang, A., Martin, M.F. (2008). SPE/HPLC/UV studies on acrylamide in deep-fried flour-based indigenous Chinese foods. *Microchemical Journal*, 89(2), 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.12.006>
18. Han, J.-W., Boo, H., & Chung, M.-S. (2020). Effects of extraction conditions on acrylamide/furan content, antioxidant activity, and sensory properties of cold brew coffee. *Food Science and Biotechnology*, 29(8), 1071-1080. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00747-1>
19. Kang, D.-e., Lee, H.-U., Davaatseren, M., & Chung, M.-S. (2020). Comparison of acrylamide and furan concentrations, antioxidant activities, and volatile profiles in cold or hot brew coffees. *Food Science and Biotechnology*, 29(1), 141-148. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00644-2>
20. Karami, M., Akbari-Adergani, B., Jahed Khaniki, G., Shariatifar, N., & Sadighara, P. (2022). Determination and health risk assessment of acrylamide levels in instant coffee products available in Tehran markets by GC-MS. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2076225>
21. Kashani, H., Gharibzadeh, F., Nakhjirgan, P., Younesian, M., & Zaeim, M. (2021). *WHO Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazard* (Second Edition ed.). Tehran: Teymour Zadeh Novin.
22. Khaloo Kermani, P., Moeenfar, M., Farhoosh, R., & Alves, A. (2023). Modified QuEChERS purification method for analysis of acrylamide in roasted *Phoenix dactylifera* L. seeds via HPLC-PDA. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02015-2>
23. Malmir, H., Shayanfar, M., Mohammad-Shirazi, M., Tabibi, H., Sharifi, G., & Esmailzadeh, A. (2019). Tea and coffee consumption in relation to glioma: a case-control study. *European Journal of Nutrition*, 58(1), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s00394-017-1575-z>
24. Mesías, M., & Morales, F.J. (2016). Acrylamide in coffee: Estimation of exposure from vending machines. *Subtropical Plant Science*, 48, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.02.005>

25. Michalak, J., Czarnowska-Kujawska, M., Gujska, E., Klepacka, J., & Tońska, E. (2020). Effect of the brewing process on the acrylamide content in coffee beverages. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2020;79(OCE2):E293. <https://doi.org/10.1017/S0029665120002414>
26. Michalak, J., Gujska, E., & Kunciewicz, A. (2013). RP-HPLC-DAD studies on acrylamide in cereal-based baby foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 32(1), 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.08.006>
27. Nematollahi, A., Kamankesh, M., Hosseini, H., Ghasemi, J., Hosseini-Esfahani, F., Mohammadi, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2020). Acrylamide content of collected food products from Tehran's market: a risk assessment study. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30558-30570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121896>
28. Oroian, M., Amariei, S., & Gutt, G. (2015). Acrylamide in Romanian food using HPLC-UV and a health risk assessment. *Food Addit Contam Part B Surveill*, 8(2), 136-141. <https://doi.org/10.1080/19393210.2015.1010240>
29. Peris-Camarasa, B., Pardo, O., Fernández, S. F., Dualde, P., & Coscollà, C. (2023). Assessment of acrylamide exposure in Spain by human biomonitoring: Risk and predictors of exposure. *Environmental Pollution*, 331, 121896. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121896>
30. PubChem. (2023). Acrylamide. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acrylamide>
31. Riboldi, B.P., Vinhas, Á.M., & Moreira, J.D. (2014). Risks of dietary acrylamide exposure: A systematic review. *Food Chemistry*, 157, 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.046>
32. Roudbari, A., Rafiei Nazari, R., Shariatifar, N., Moazzen, M., Abdolshahi, A., Mirzamohammadi, S., . . . Arabameri, M. (2021). Concentration and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in commercial tea and coffee samples marketed in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(4), 4827-4839. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10794-0>
33. Schouten, M.A., Tappi, S., & Romani, S. (2020). Acrylamide in coffee: formation and possible mitigation strategies - a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(22), 3821-3807. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1708264>
34. Sebastià, A., Pallarés, N., Bridgeman, L., Juan-García, A., Castagnini, J.M., Ferrer, E., . . . Berrada, H. (2023). A critical review of acrylamide green extraction and determination in food matrices: Current insights and future perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 167, 117267. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117267>
35. Sharma, N., Thakur, S., Bains, A., Goksen, G., Ali, N., Ansari, M.A., . . . Chawla, P. (2025). Green hydrothermal approach for the synthesis of carbon quantum dots from waste tea bags for acrylamide detection in drinking water: A fluorescence assay validated by HPLC-PDA analysis. *Food Chemistry: X*, 25, 102043. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102043>
36. Shimadzu. (2021). Differences Between Using Acetonitrile and Methanol for Reverse Phase Chromatography. Retrieved from <https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/lib/1ctalk/35/35lab.html>
37. Strocchi, G., Rubiolo, P., Cordero, C., Bicchi, C., & Liberto, E. (2022). Acrylamide in coffee: What is known and what still needs to be explored. A review. *Food Chemistry*, 393, 133406. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133406>
38. Taghizadeh, S.F., Azizi, M., Hassanpourfard, G., Rezaee, R., & Karimi, G. (2023). Assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risk of exposure to metals via consumption of coffee, tea, and herbal tea in Iranians. *Biological Trace Element Research*, 201(3), 1520-1537. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03239-x>
39. Wang, H., Feng, F., Guo, Y., Shuang, S., & Choi, M.M.F. (2013). HPLC-UV quantitative analysis of acrylamide in baked and deep-fried Chinese foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 31(1), 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.02.006>
40. Xu, Y., Cui, B., Ran, R., Liu, Y., Chen, H., Kai, G., & Shi, J. (2014). Risk assessment, formation, and mitigation of dietary acrylamide: Current status and future prospects. *Food and Chemical Toxicology*, 69, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.03.037>
41. Yan, F., Wang, L., Zhao, L., Wang, C., Lu, Q., & Liu, R. (2023). Acrylamide in food: Occurrence, metabolism, molecular toxicity mechanism and detoxification by phytochemicals. *Food and Chemical Toxicology*, 175, 113696. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113696>
42. Zahir, A., Ge, Z., & Khan, I.A. (2025). Public health risks associated with food process contaminants – A Review. *Journal of Food Protection*, 88(2), 100426. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2024.100426>

Research Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 349-362

Effect of Cream Fat Content and Milk Protein Concentrate on the Formation and Stability of Industrial Sarshir

M. Mazaheri Tehrani^{1*}, S. Abdullahzadeh¹, Sh. Taziki Shams-abadi¹

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

(* - Corresponding Author Email: mmtehrani@um.ac.ir)

Received: 07.05.2026

Revised: 02.06.2026

Accepted: 06.06.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Mazaheri Tehrani, M., Abdullahzadeh, S., & Taziki Shams-abadi, Sh. (2026). Effect of cream fat content and milk protein concentrate on the formation and stability of industrial Sarshir. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 349-362. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.98607.1572>

Introduction

In recent years, consumer interest in traditional and natural dairy products has increased due to their perceived health benefits, cultural value, and unique sensory properties. Among traditional Iranian dairy products, sarshir is widely consumed and valued for its rich taste and high energy content. Sarshir is a traditional Iranian high-fat dairy product obtained through heat-induced creaming of milk. However, its industrial production faces several challenges, including long processing time, low yield, high susceptibility to lipid oxidation, and variability in texture and quality. Milk protein concentrate (MPC), rich in casein and whey proteins, is widely used in the dairy industry due to its functional properties such as emulsification, gelation, and texture enhancement. Therefore, the incorporation of MPC into sarshir formulations may improve structural stability, enhance sensory properties, and potentially enable partial fat reduction. Accordingly, this study aimed to evaluate the effects of different cream fat levels (50%, 60%, and 70%) and MPC concentrations (0%, 1%, and 2%) on the physicochemical, textural, sensory, yield, and shelf life of Sarshir, and to determine and introduce an optimal formulation for industrial production.

Materials and Methods

Raw milk was obtained from Sepidan Shir Company (Mashhad, Iran), and milk protein concentrate (MPC-80) was supplied by Pegah Isfahan Company (Isfahan, Iran). Sarshir samples were prepared by standardizing milk fat content to 50, 60, and 70% (w/w) using cream, along with MPC addition at 0, 1, and 2% (w/w). Raw milk was heated to 40–45 °C and centrifuged (7000 rpm) to obtain cream fractions, which were recombined with skim milk based on mass balance calculations. MPC was hydrated at 40 °C for 20 min under stirring. The mixtures were then heated to 90 °C and incubated at 43 °C for 3 h, followed by cooling at 5–6 °C for 24–48 h to form the sarshir layer. The sarshir layer was separated and analyzed for different properties. Shelf life was evaluated at 4–5 °C every 2 days based on sensory acceptability.

Results and Discussion

The highest dry matter and fat contents were observed in the samples containing 70% fat and 2% protein (68.03 g/g and 72.50%, respectively), whereas the lowest values were recorded in the control treatment (50% fat and 0% protein). The increase in MPC significantly affected the physicochemical properties, particularly pH and acidity ($p < 0.05$), with higher pH and lower acidity observed in formulations with higher fat and protein levels. The highest protein content (5.44%) was also recorded in samples containing 50% fat and 2% protein. Texture profile analysis indicated that increasing fat content from 50% to 70% significantly reduced hardness (61.00 to 21.00 g), consistency (5.00 to 1.75 g·s), and adhesiveness (25.50 to 9.50 g·s). In contrast, MPC addition generally increased



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.2026.98607.1572>

textural parameters, suggesting a strengthening effect of milk proteins on the gel structure, while fat had a softening effect on product consistency. Accordingly, the lowest textural values were observed in the 70% fat and 2% protein treatment, whereas the highest hardness was associated with the control sample. Production yield was significantly influenced by formulation ($p < 0.05$), reaching a maximum in the 70% fat and 2% protein treatment (approximately 58%) and a minimum in the control sample (approximately 30%). However, storage time showed an inverse trend, decreasing with increasing fat and MPC levels, with the shortest storage time (7 days) observed in the 70% fat and 2% protein sample and the longest (16 days) in the control. Sensory evaluation revealed that although high-fat/high-protein samples showed improved creaminess and mouthfeel, the formulation containing 50% fat and 2% protein received the highest overall sensory scores, particularly for flavor intensity, dairy flavor, and creamy mouth feel aftertaste.

Conclusion

The results indicated that the addition of milk protein concentrate (MPC) significantly influenced the physicochemical, textural, and sensory properties of sarshir. Increasing both fat and MPC concentrations improved total solids, fat content, production yield, and textural attributes; however, such increasing trend was associated with a reduction in shelf life. The sample containing 50% fat and 2% MPC demonstrated the highest sensory acceptability. Overall, this formulation achieved an optimal balance between quality and stability, and is therefore recommended for industrial production.

Acknowledgement: No specific acknowledgement is declared.

Keywords: Cream fat, Functional properties, Industrial Sarshir, Milk protein concentrate, Sensory evaluation

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۳۶۲-۳۴۹

تأثیر میزان چربی خامه و کنسانتره پروتئین شیر بر تشکیل و پایداری بافت سرشیر صنعتی

مصطفی مظاهری طهرانی^{۱*} - صدف عبدالله‌زاده^۱ - شکوفه تازیکی شمس‌آبادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

چکیده

تولید صنعتی سرشیر با وجود مقبولیت بالا با محدودیت‌هایی همراه است. کنسانتره پروتئین شیر به دلیل خواص عملکردی مطلوب، می‌تواند در بهبود ویژگی‌های کیفی این محصول مؤثر باشد. بنابراین، در این پژوهش اثر افزودن خامه با سطوح مختلف چربی (۵۰، ۶۰ و ۷۰٪) و کنسانتره پروتئین شیر (۱ و ۲٪) بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی، بافتی، حسی، راندمان تولید و زمان نگهداری نمونه‌های سرشیر جهت بهینه‌سازی فرمولاسیون و امکان تولید صنعتی آن مورد بررسی قرار گرفتند. افزودن کنسانتره پروتئین شیر به‌طور معنی‌داری موجب افزایش ماده خشک، کاهش نسبی چربی، افزایش pH و کاهش اسیدیته شد. نمونه حاوی ۷۰٪ چربی خامه و ۲٪ کنسانتره پروتئین شیر بیشترین ماده خشک و راندمان تولید را داشت. ویژگی‌های بافتی و ساختاری سرشیر تا حدود زیادی تحت تأثیر مقادیر بالای پروتئین قرار داشت. ارزیابی خصوصیات بافتی نشان داد که در سطح ۵۰٪ چربی، افزایش پروتئین از ۰ به ۲٪ موجب افزایش پارامترهای سختی از ۶۱/۰۰ به ۷۳/۵ گرم، چسبندگی از ۲۵/۵۰ به ۳۱/۰۰ گرم در ثانیه و قوام از ۵/۰۰ به ۶/۹۰ گرم در ثانیه گردید. افزایش سطوح چربی از ۵۰ به ۷۰٪ باعث کاهش این پارامترها شد اما در سطوح بالای پروتئین این کاهش کمتر اتفاق می‌افتد. زمان نگهداری محصول با افزایش چربی خامه و کنسانتره پروتئین کاهش معنی‌داری یافت (از ۱۶ روز در نمونه ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین به ۷ روز در نمونه ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین). ارزیابی حسی نشان داد که نمونه حاوی ۵۰٪ چربی خامه و ۲٪ کنسانتره پروتئین از بالاترین امتیاز در پارامترهای طعم خامه‌ای، قوام، نرمی و لطافت و پذیرش کلی برخوردار بود. استفاده از کنسانتره پروتئین شیر در فرمولاسیون سرشیر می‌تواند خواص تغذیه‌ای، بافتی و حسی محصول را بهبود بخشد. فرمولاسیون بهینه با ۵۰٪ چربی خامه و ۲٪ کنسانتره پروتئین شیر دارای بهترین ویژگی‌های بافتی و حسی بود که می‌تواند برای تولید صنعتی سرشیر با کیفیت مطلوب پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی حسی، چربی خامه، خواص عملکردی، سرشیر صنعتی، کنسانتره پروتئین شیر

مقدمه

تنها در ایران، بلکه در گستره وسیعی از کشورهای جهان از آمریکای جنوبی (Crema de Leche) تا آسیای مرکزی (Kaymak) در ترکیه، Malai در هند و پاکستان، Qaymoq در قزاقستان) تولید و مصرف می‌شود (Akarca, Tomar, & Çağlar, 2014). سرشیر از نظر ساختاری یک محصول لبنی غنی از چربی است که از طریق حرارت‌دهی شیر تا نقطه جوش و سپس سرد کردن بسیار آهسته آن طی حدود ۱۲ ساعت تهیه می‌شود (Cakmakci & Hayaloglu, 2011). در این فرآیند، ساختار امولسیون شیر تخریب شده و گلبول‌های

صنعت لبنیات نقش حیاتی در تأمین مواد مغذی ضروری برای جمعیت جهانی ایفا می‌کند. شیر و فرآورده‌های لبنی به‌عنوان منابع غنی از پروتئین‌های با کیفیت بالا، ویتامین‌ها (به‌ویژه ریبوفلاوین و ویتامین B12)، مواد معدنی (کلسیم، فسفر) و سایر ترکیبات زیست‌فعال، در رژیم غذایی انسان جایگاه ویژه‌ای دارند (Jensen & Newburg, 1995). سرشیر در برخی مناطق به قیماق، سرقیماق یا کایماک نیز معروف است (Akalin, Tokusoglu, Gönç, & Ökten, 2005). این محصول نه

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

(*)- نویسنده مسئول: Email: mmtehrani@um.ac.ir

افزودنی لبنی است که از طریق فیلتراسیون غشایی (اولترافیلتراسیون)^{۱۲} شیر پس چرخ تولید می‌شود. در این فرآیند، کازئین و پروتئین‌های آب‌پنیر در رتنتیت^{۱۳} باقی مانده و تغلیظ می‌گردند، در حالی که لاکتوز، نمک‌های شیر و سایر اجزای مولکولی کوچک همراه پرمیت^{۱۴} خارج می‌شوند (Weinbreck, De Vries, Schrooyen, & De Kruif, 2003). کنسانتره پروتئین شیر معمولاً حاوی ۴۲٪ تا ۸۵٪ پروتئین (بر مبنای ماده خشک) است و نسبت کازئین به پروتئین‌های آب‌پنیر در آن معادل شیر (حدود ۲۰:۸۰) است (Goh, Teo, Sarkar, & Singh, 2020). تولید جهانی کنسانتره پروتئین شیر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ از ۴۰,۰۰۰ تن به ۲۵۰,۰۰۰ تن افزایش یافته است که نشان‌دهنده اهمیت روزافزون این ماده در صنایع غذایی است (Kelly, Woonton, & Smithers, 2009). کنسانتره پروتئین شیر به دلیل خواص عملکردی مطلوب از جمله ژل‌شوندگی، امولسیفایی، خامه‌ای شدن و بهبود بافت، در طیف گسترده‌ای از محصولات لبنی مانند ماست، پنیر، بستنی، نوشیدنی‌های پروتئینی و سس‌ها به کار می‌رود (Akalin, Karagözü, & Ünal, 2008). فرضیه اصلی این پژوهش این است که افزودن کنسانتره پروتئین شیر به فرمولاسیون سرشیر می‌تواند با بهبود شبکه پروتئینی، پایداری بافت و خواص حسی محصول را ارتقا داده و همزمان امکان کاهش نسبی چربی را فراهم آورد (Liang & Luo, 2020). بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون تحقیق جامع و سیستماتیک در خصوص تأثیر کنسانتره پروتئین شیر بر خواص سرشیر انجام نشده است. با توجه به خواص عملکردی مطلوب این ترکیب، استفاده از آن می‌تواند رویکردی مؤثر برای بهبود ویژگی‌های کیفی سرشیر محسوب شود. بر این اساس، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر سطوح مختلف چربی خامه (۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪) و کنسانتره پروتئین شیر (۰٪، ۱٪ و ۲٪) بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی (ماده خشک، چربی، پروتئین، pH و اسیدیته)، ویژگی‌های بافتی (سختی، قوام و چسبندگی)، خواص حسی، راندمان تولید و تغییرات ظاهر و پایداری بافت طی زمان نگهداری به جهت حسی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین فرمولاسیون بهینه برای تولید صنعتی سرشیر با کیفیت مطلوب تعیین می‌گردد.

مواد و روش‌ها

چربی به همراه بخشی از پروتئین‌های شیر در اثر پدیده‌های فیزیکی نظیر انعقاد^۱ و لخته شدن^۲ دچار تجمع شده و بر مبنای نیروی ثقل به سطح مهاجرت می‌کنند (Hansen, Nielsen, Rasmussen, Larsen, & Wiking, 2020). فرآیند حرارتی موجب دناتوراسیون و باز شدن ساختار زنجیره‌ای پروتئین‌های شیر، به‌ویژه پروتئین‌های آب‌پنیر شامل بتا-لاکتوگلوبولین^۳، آلفا-لاکتوآلبومین^۴ و برخی اجزای کازئین به خصوص کاپا-کازئین^۵ می‌شود (De Kruif & Holt, 2003). این تغییرات کنفورماسیونی توانایی ایجاد برهم‌کنش و قرارگیری بر سطح غشای گلوبول‌های چربی را تسهیل می‌کند. قرارگیری زنجیره‌های پروتئینی همراه با ایجاد پل‌های دی‌سولفیدی به‌ویژه در حضور بتا-لاکتوگلوبولین^۶ موجب اتصال بین گلوبول‌ها و تشکیل ساختار توده‌ای منحصربه‌فرد سرشیر می‌شود (Oliveira & O'Mahony, 2020). در مرحله سرد شدن، پدیده آگلوتیناسیون سرد^۷ اتفاق می‌افتد بدین صورت که آگلوتینین‌ها بخشی از ایمونوگلوبولین‌های شیر، به‌ویژه ایمونوگلوبولین نوع ام^۸، در دماهای پایین بر روی گلوبول‌های چربی رسوب کرده و باعث چسبیدن آن‌ها به یکدیگر و تشدید پدیده خامه بستن می‌شوند (Deeth, 1997). سرشیر به دلیل ارزش غذایی بالا و طعم منحصر به فرد مورد توجه مصرف‌کنندگان قرار دارد. با این حال، تولید صنعتی این محصول با چالش‌هایی مواجه می‌باشد. از جمله فرآیند تولید زمان‌بر است و نیازمند حدود ۱۵-۱۸ ساعت زمان است که برای مقیاس صنعتی مقرون به صرفه نیست (Jukkola, Partanen, Rojas, & Heino, 2018) و به دلیل اتکا به نیروی ثقل برای جداسازی چربی، راندمان تولید نسبتاً پایین است (معمولاً ۸-۱۲٪ وزنی) (Ma & Barbano, 2000). از طرفی به دلیل محتوای بالای چربی (۵۰-۷۰٪) و فعالیت آنزیم لیپاز، سرشیر مستعد اکسیداسیون چربی و هیدرولیز تری‌گلیسیریدها است که منجر به ایجاد طعم‌های نامطلوب^۹ می‌شود (Santos, Suzuki, & Lannes, 2025). همچنین عدم یکنواختی کیفیت محصول تولیدی (Hasdogan, 2004) و مشکلات بافتی شامل آباندازی^{۱۰} و عدم پایداری بافت از مشکلات رایج در تولید سرشیر می‌باشند (Ong et al., 2020).

با توجه به نیاز به اصلاح ساختار پروتئینی سرشیر برای بهبود پایداری و راندمان، استفاده از افزودنی‌های لبنی غنی از پروتئین با قابلیت ژل‌شوندگی و پایدارکنندگی، به‌عنوان یک استراتژی نوین مورد توجه قرار گرفته است. کنسانتره پروتئین شیر (MPC)^{۱۱} یک ماده

- 8- Immunoglobulin M
- 9- Rancidity
- 10- Syneresis
- 11- Milk Protein Concentrate
- 12- Ultrafiltration
- 13- Retentate
- 14- Permeate

- 1- Coagulation
- 2- Flocculation
- 3- β -lactoglobulin
- 4- α -lactalbumin
- 5- κ -casein
- 6- β -lactoglobulin
- 7- Cold Agglutination

افزایش یابد. چربی شیر بر اساس معادله موازنه جرمی زیر محاسبه شد (Pelegrine & Gasparetto, 2005):

$$(۱): \text{وزن شیر} + \text{وزن خامه} / ((\text{وزن شیر} \times \text{چربی شیر}) + (\text{وزن خامه} \times \text{چربی خامه})) = \text{چربی شیر}$$

پس از تنظیم سطح چربی شیر، پودر کنسانتره پروتئین شیر به میزان صفر، ۱ و ۲٪ (وزنی/وزنی) به مخلوط اضافه و با استفاده از همزن مغناطیسی (IKA RCT Basic، آلمان) در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه و تحت همزدن مداوم به‌طور کامل حل گردید تا هیدراتاسیون کامل حاصل شود (Pelegrine & Gasparetto, 2005). مخلوط‌های آماده شده در ظروف استیل ضدزنگ با قطر ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۵ سانتی‌متر ریخته شد. نمونه‌ها روی حرارت مستقیم (شعله گاز) قرار گرفته و با همزدن مستمر تا رسیدن به دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. سپس ظروف به محیطی با دمای ثابت ۴۳ درجه سانتی‌گراد (کنار شوفاژ) منتقل شده و به مدت ۳ ساعت در این دما نگهداری شدند. پس از آن، نمونه‌ها به یخچال با دمای ۵-۶ درجه سانتی‌گراد منتقل و به مدت ۲۴-۴۸ ساعت سرد شدند تا لایه سرشیر به‌طور کامل تشکیل گردد. سپس با استفاده از کارد، لایه سرشیر از سطح جدا شده و در ظروف دربدار استریل نگهداری شدند. نمونه S1 نمونه شاهد می‌باشد.

شیر خام مورد استفاده در این پژوهش از شرکت سپیدان شیر (مشهد، ایران) تهیه شد. شیر خام دارای ۳/۲٪ چربی، ۳/۱٪ پروتئین و pH معادل ۶/۷ بود. کنسانتره پروتئین شیر (MPC-80) حاوی ۸۰٪ پروتئین، ۶٪ رطوبت، ۱/۵٪ چربی و ۶٪ لاکتوز از شرکت پگاه اصفهان (ایران) خریداری شد. سایر مواد شیمیایی شامل متانول، هگزان، سدیم هیدروکسید، هیدروکسید پتاسیم اتانولی و سایر معرف‌ها با درجه خلوص آزمایشگاهی (AR Grade) از شرکت مرک (آلمان) خریداری گردیدند.

تهیه نمونه‌های سرشیر

نمونه‌های سرشیر با افزودن خامه با سطوح ۵۰، ۶۰ و ۷۰٪ چربی (به‌عنوان منبع چربی) و افزودن صفر، ۱ و ۲٪ کنسانتره پروتئین شیر به شیر تهیه شدند. جزئیات نمونه‌ها و مقادیر وزنی اجزا آن‌ها بر حسب گرم در ۱۰۰ گرم شیر در جدول ۱ آورده شده است. نمونه‌ها بدین‌صورت آماده شدند؛ ابتدا شیر خام به دمای ۴۵-۴۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد و با استفاده از دستگاه سیراتور (Cream Separator Model CS-100، دانمارک) با سرعت چرخش ۷۰۰۰ دور در دقیقه، خامه با سطوح مختلف چربی از شیر جدا گردید (Phipps, 1983). خامه به‌دست آمده از سیراتور با شیر پایه (فراوری نشده) ترکیب شد تا میزان چربی شیر

جدول ۱- تیمارهای تحقیق شامل سطوح هر تیمار و مقدار وزنی اجزای تشکیل دهنده

Table 1- The treatments include the levels of each treatment and the amount of the components (Milk, Cream fat (F), Milk protein concentrate (MPC))

نمونه Sample	چربی خامه Cream fat (%)	کنسانتره پروتئین شیر MPC (%)	اجزای تشکیل دهنده Components (g/100g)		
			کنسانتره پروتئین شیر		
			شیر Milk	خامه Cream	کنسانتره پروتئین شیر MPC
S1		0	85.71	14.29	0.00
S2	50	1	84.86	14.14	1.00
S3		2	84.00	14.00	2.00
S4		0	85.71	14.29	0.00
S5	60	1	84.86	14.14	1.00
S6		2	84.00	14.00	2.00
S7	70	0	85.71	14.29	0.00
S8		1	84.86	14.14	1.00
S9		2	84.00	14.00	2.00

S1 (شاهد): ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین، S2: ۵۰٪ چربی-۱٪ پروتئین، S3: ۵۰٪ چربی-۲٪ پروتئین، S4: ۶۰٪ چربی-۰٪ پروتئین، S5: ۶۰٪ چربی-۱٪ پروتئین، S6: ۶۰٪ چربی-۲٪ پروتئین، S7: ۷۰٪ چربی-۰٪ پروتئین، S8: ۷۰٪ چربی-۱٪ پروتئین، S9: ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین

S1 (control): 50%F-0%MPC, S2: 50%F-1%MPC, S3: 50%F-2%MPC, S4: 60%F-0%MPC, S5: 60%F-1%MPC, S6: 60%F-2%MPC, S7: 70%F-0%MPC, S8: 70%F-1%MPC, S9: 70%F-2%MPC

(Memmert UNB 100، آلمان) با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت خشک گردید. سپس نمونه‌ها در دسیکاتور سرد شده و مجدداً توزین شدند. این فرآیند تا رسیدن به وزن ثابت (اختلاف کمتر از ۰/۰۰۱ گرم) تکرار شد. ماده خشک بر اساس معادله ۲ محاسبه گردید:

آزمون‌های فیزیکو شیمیایی

اندازه‌گیری ماده خشک کل

ماده خشک کل بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۶۹۵ (ISIRI, 695) با روش خشک کردن در آون اندازه‌گیری شد. بدین صورت که مقدار ۵ گرم از نمونه به‌طور دقیق توزین شد و در آون

(۲)
$$\frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \times 100$$
 ماده خشک بر حسب درصد وزنی که در این معادله M_0 ، M_1 و M_2 به ترتیب وزن ظرف، درپوش و شن، وزن ظرف، درپوش، شن و نمونه، وزن ظرف، درپوش، شن و نمونه خشک شده بر حسب گرم می‌باشند.

اندازه گیری چربی

میزان چربی سرشیر با استفاده از روش ژربر^۱ بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۶۶ (ISIRI, 366) تعیین شد. ابتدا ۳ گرم از نمونه در بوتیرومتر وزن شد سپس ۵ میلی‌لیتر آب گرم، ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۶٪ و ۱ میلی‌لیتر الکل آمیلیک به آن اضافه گردید. بوتیرومتر در حمام آب با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵-۱۰ دقیقه قرار داده شد و در نهایت در سانتریفیوژ (Sigma 2-16P، آلمان) با سرعت ۱۱۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد (Jensen & Newburg, 1995).

اندازه گیری pH

مقدار pH نمونه‌ها با استفاده از pH متر کالیبره (Metrohm 827، سوئیس) اندازه‌گیری گردید. الکتروده به‌طور مستقیم در نمونه هم‌وزن شده وارد شد و pH آن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید.

اندازه گیری اسیدیته

اسیدیته بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۲۸۵۲ (ISIRI, 2852) به روش تیتراسیون با سود ۰/۱ نرمال اندازه‌گیری شد. اسیدیته توسط معادله ۳ بر حسب درصد اسید لاکتیک محاسبه گردید (Akaline et al., 2005):

$$(۳) \quad \text{اسیدیته} = \frac{N \times 0.009 \times 100}{M_1} \times \frac{\text{حجم بالن مورد استفاده}}{V}$$

که در این رابطه N میزان سود ۰/۱ نرمال بر حسب میلی‌لیتر، M_1 وزن نمونه بر حسب گرم و V حجم آزمونه بر حسب میلی‌لیتر می‌باشند.

اندازه گیری پروتئین

پروتئین کل نمونه‌ها به روش کج‌لدال با استفاده از دستگاه کج‌لتک (Gerhardt Kjeldatherm، آلمان) اندازه‌گیری شد. مقدار پروتئین با ضرب نیتروژن در ضریب ۶/۳۸ (برای محصولات لبنی) محاسبه گردید (AOAC, 1970).

ارزیابی ویژگی‌های بافتی

خواص بافتی نمونه‌های سرشیر با استفاده از دستگاه بافت‌سنج بروکفیلد (Brookfield CT3 Texture Analyzer، آمریکا) از طریق آزمون نفوذ توسط پروب استیل ضد زنگ استوانه‌ای (با قطر ۶ میلی‌متر) تعیین شدند. نمونه‌ها در ظروف استوانه‌ای با ابعاد یکنواخت (قطر حدود ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع حدود ۲۰ میلی‌متر) آماده شدند و آزمون تا عمق نفوذ ۵۰٪ (تا ارتفاع ۱۰ میلی‌متر از سطح نمونه) در سرعت‌های پیش‌آزمون ۲ میلی‌متر بر ثانیه، آزمون ۱ میلی‌متر بر ثانیه و پس‌آزمون ۲ میلی‌متر بر ثانیه انجام پذیرفت. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه قبل از انجام آزمون از یخچال خارج شدند تا به دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) برسند. هر نمونه در ۲ تکرار مورد آزمون قرار گرفت و میانگین نتایج گزارش شد. پارامترهای استخراج شده از منحنی نیرو-زمان شامل سختی (حداکثر نیروی اعمال شده برای فشرده سازی نمونه بر حسب گرم (g))، چسبندگی (سطح زیر منحنی در ناحیه منفی بر حسب گرم در ثانیه (g.s)) و قوام (سطح زیر منحنی در ناحیه مثبت بر حسب گرم در ثانیه (g.s)) برآورد شدند (Adapa, Dingeldein, Schmidt, & Herald, 2000).

ارزیابی راندمان تولید

راندمان تولید سرشیر بر اساس نسبت وزن محصول نهایی سرشیر به وزن کل محصول طبق رابطه ۴ محاسبه شد (Keogh, 2006):

$$(۴) \quad \text{راندمان تولید} = \frac{\text{وزن سرشیر}}{\text{وزن کل محصول}} \times 100$$

ارزیابی زمان نگهداری

به‌منظور ارزیابی پایداری ظاهر و بافت نمونه‌های سرشیر طی زمان در ظروف دربدار در یخچال با دمای ۴-۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. هر ۲ روز یکبار توسط ۵ داور آموزش‌دیده از نظر تغییرات ظاهری رنگ، بو، طعم، آب اندازی و بافت ارزیابی شدند. زمان نگهداری به‌عنوان مدت زمانی تعریف شد که نمونه‌ها خواص حسی ظاهری و بافت اولیه و قابل قبول خود را حفظ می‌کردند (امتیاز بالاتر از ۵ از ۹ در پذیرش کلی) (Berge & Baars, 2020).

ارزیابی حسی و تحلیل توصیفی-کمی (QDA)

ارزیابی حسی نمونه‌ها توسط آزمون هدونیک ۹ نقطه‌ای با استفاده از ۱۲ پانلیست آموزش‌دیده (۸ زن و ۴ مرد، بازه سنی ۲۵-۴۵ سال) از دانشجویان و اساتید گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد انجام پذیرفت. پانلیست‌ها طی ۴ جلسه آموزشی (هر جلسه ۲ ساعت) با

با آب معدنی و نان سفید شستشو دادند (Sajedi, Nasirpour, Keramat, & Desobry, 2014). خصوصیات حسی به روش QDA با استفاده از مقیاس خطی بدون ساختار ۱۰ سانتی‌متری (=۰ فقدان کامل صفت، ۱۰= شدت بسیار زیاد صفت) ارزیابی شد (Akarca et al., 2014) پارامترهای مورد بررسی در جدول ۲ نمایش داده شدند:

خصوصیات حسی سرشیر، روش‌های ارزیابی و استفاده از مقیاس‌ها آشنا شدند. پذیرش کلی و درجه پسندیدگی نمونه‌ها با استفاده از مقیاس هدونیک ۹ نقطه‌ای (۱= بسیار نامطلوب، ۵= نه مطلوب و نه نامطلوب، ۹= بسیار مطلوب) ارزیابی شد. نمونه‌ها به‌صورت رمزگذاری شده (کدهای سه رقمی تصادفی) در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد به پانلیست‌ها ارائه شدند. بین ارزیابی هر نمونه، پانلیست‌ها دهان خود را

جدول ۲- تعریف پارامترهای خصوصیات حسی

Table 2- Definition of parameters for sensory attributes

پارامتر Parameter	تعریف خصوصیت Introduce the charactritic
	شدت مزه: شدت کلی مزه احساس شده Taste intensity: Overall intensity of perceived taste
مزه و طعم Taste and flavor	طعم لبنی: طعم شیر تازه Dairy flavour: Fresh, sweet milk flavor طعم خامه‌ای: طعم خامه‌ای و چربی Creamy flavor: Creamy and fatty flavor
	قوام و غلظت: مقاومت در برابر جریان در دهان Viscosity and consistency: Resistance to flow in the mouth
احساس دهانی Mouthfeel	نرمی و لطافت: بافت ابریشمی و نرم Smoothness and softness: Silky and soft texture حس خامه‌ای: احساس چربی و غنا در دهان Creaminess: Sensation of fat and richness in the mouth
پس طعم Aftertaste	پوشش دهانی: لایه باقی‌مانده در دهان پس از بلع Mouth coating: Residual layer remaining in the mouth after swallowing پس طعم خامه‌ای: حس خامه‌ای پس از بلع Creamy aftertaste: Creamy sensation perceived after swallowing

بود که در نمونه حاوی ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین (S9) مشاهده شد و کمترین مقدار ۶۴/۶۲٪ بود که در نمونه شاهد با ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین (S1) مشاهده گردید. افزودن کنسانتره پروتئین شیر به فرمولاسیون سرشیر باعث افزایش ماده جامد کل و در نتیجه افزایش ماده خشک نمونه‌های حاوی کنسانتره پروتئین شیر می‌شود. این یافته‌ها با نتایج فرج‌زاده، شهاب‌لوسانی و اسحاقی (Farajzadeh, Shahbalvasani, & Eshaghi, 2020) و فان لنت، لی، وانلیگه و فاندمیقن (van Lent, Le, Vanlerberghe, & Van der Meeren, 2008) همخوانی دارد که گزارش کردند افزودن پروتئین به محصولات لبنی منجر به افزایش معنی‌دار ماده خشک می‌گردد.

چربی

میزان چربی در نمونه‌ها تحت تأثیر معنی‌دار اثرات متقابل پروتئین و چربی قرار گرفت ($p < 0.05$). مطابق جدول ۳، بیشترین مقدار چربی در نمونه ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین و کمترین در نمونه شاهد با ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین بود که به ترتیب در مقادیر ۷۲/۵٪ و ۴۹/۸٪ مشاهده شد. پروتئین کنسانتره شیر کمتر از ۳٪ دارای چربی می‌باشد

طرح آزمایشی و تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش اثر افزودن خامه با سطوح چربی مختلف (۵۰، ۶۰ و ۷۰٪) و پروتئین کنسانتره شیر در سطوح (۱، ۲ و ۳٪) بر خصوصیات سرشیر به‌صورت طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل مورد مطالعه قرار گرفت. تمامی آزمون‌ها حداقل در دو تکرار مستقل انجام شدند؛ در آزمون‌های دستگاهی دو تکرار و در سایر آزمون‌ها سه تکرار لحاظ گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab (نسخه ۱۹) انجام گرفت. تحلیل نتایج داده‌ها توسط آنالیز واریانس (ANOVA) دو طرفه انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۹۵٪ ($p < 0.05$) صورت گرفت.

نتایج و بحث

ماده خشک کل

نتایج مقادیر ماده خشک کل نمونه‌های سرشیر در جدول ۳ مشاهده می‌شوند. آنالیز آماری نتایج نشان داد که اثرات متقابل چربی و پروتئین در مورد ماده خشک معنی‌دار نبودند ($p > 0.05$). با افزایش درصد چربی از ۵۰ به ۷۰٪ و افزایش کنسانتره پروتئین شیر از صفر به ۲٪، مقدار ماده خشک افزایش یافته است. بیشترین مقدار ماده خشک ۶۸/۰۳٪

بنابراین با افزودن آن میزان چربی کل سرشیر همراه با افزایش میزان چربی کل نمونه افزایش می‌یابد.

pH و اسیدیته

نتایج مقادیر pH و اسیدیته نمونه‌های سرشیر در جدول ۳ مشاهده می‌شوند. اثرات متقابل پروتئین و چربی بر اسیدیته دارای اختلاف بسیار معنی‌داری بودند ($p < 0.05$) درحالی‌که بر pH اثر معنی‌دار نداشتند. با افزایش درصد چربی، مقدار املاح محلول در سرشیر کاهش یافته که منجر به کاهش تبدیل لاکتوز به اسید لاکتیک و در نتیجه کاهش اسیدیته و افزایش pH می‌گردد (Walstra, Walstra, Wouters, & Geurts, 2005). درحالی‌که افزودن کنسانتره پروتئین شیر منجر به کاهش pH می‌شود که به دلیل افزایش اسیدیته و پایین‌تر بودن ظرفیت بافری پروتئین‌های سرشیر است (Foroughinia, Abbasi, & Hamidi Esfahani, 2007). با این حال، با افزایش بیشتر کنسانتره پروتئین شیر، ظرفیت بافری نیز افزایش می‌یابد که نوسانات pH را

کاهش می‌دهد. بیشترین pH که معادل ۶/۶۲ بود و کمترین اسیدیته در نمونه ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین مشاهده شد. این نمونه با pH معادل ۶/۶۲ در محدوده استاندارد (۶/۸-۶/۵) قرار داشت. کاملان و همکاران (Kamelan, Mazaheri Tehrani, Edalatian Dovom, Razavi, & Haddad Khodaparast, 2020) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند.

پروتئین

اثرات متقابل پروتئین و چربی بر میزان پروتئین کل اثر بسیار معنی‌داری داشتند ($p < 0.05$). بیشترین مقدار پروتئین (۵/۴۴٪) در نمونه ۵۰٪ چربی-۲٪ پروتئین و کمترین (۲/۵۷٪) در نمونه ۷۰٪ چربی-۰٪ پروتئین مشاهده شد (جدول ۳). افزایش کنسانتره پروتئین شیر به‌طور طبیعی منجر به افزایش محتوای پروتئینی محصول نهایی می‌گردد که برای بهبود ارزش تغذیه‌ای سرشیر حائز اهمیت است (Swaigood, 1982).

جدول ۳- خصوصیات فیزیکیوشیمیایی سرشیر در حضور سطوح مختلف چربی خامه و کنسانتره پروتئین شیر
Table 3- Physicochemical properties of Sarshir in the presence of different cream fat levels and milk protein concentrate (MPC)

چربی خامه Cream fat (%)	کنسانتره پروتئین شیر MPC (%)	پارامترها Parameters				
		ماده جامد کل Total solids (g/g)	چربی Fat (%)	بی‌اچ pH	اسیدیته Acidity	پروتئین Protein (%)
50	0	0.00±64.62	0.00±49.80	0.00±6.78	0.00±9.90	0.00±4.99
	1	0.04±65.04	0.14 ^{bc} ±51.10	0.01±6.77	0.01 ^{ab} ±9.79	0.04 ^b ±5.07
	2	0.00±65.58	0.07 ^{bc} ±52.05	0.01±6.75	0.00 ^{abc} ±9.75	0.00 ^a ±5.44
60	0	0.00±66.04	0.07 ^b ±59.65	0.00±6.84	0.00 ^{abc} ±9.70	0.00 ^d ±3.02
	1	0.01±66.41	0.21 ^{ab} ±60.45	0.01±6.82	0.02 ^{bc} ±9.64	0.11 ^d ±3.26
	2	0.02±66.97	0.00 ^{ab} ±61.20	0.01±6.80	0.01 ^c ±9.49	0.11 ^{cd} ±3.55
70	0	0.00±67.08	0.14 ^a ±69.80	0.00±6.96	0.00±9.45	0.00±2.57
	1	0.01±67.47	0.21 ^a ±71.15	0.14±6.92	0.02±9.34	0.03 ^e ±2.65
	2	0.02±68.03	0.00 ^a ±72.50	0.03±6.88	0.07±9.30	0.03 ^{de} ±2.81

نتایج به‌صورت میانگین ± انحراف معیار برای دو تکرار است. میانگین‌های با حروف یکسان اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p > 0.05$).

All data are expressed as mean ± standard deviation of two determinations. Values followed by the same letters show no significant differences (Tukey test, $P > 0.05$).

1998). پروتئین‌های کاربئین موجود در کنسانتره پروتئین شیر با تشکیل شبکه سه‌بعدی و ایجاد پل‌های دی‌سولفیدی، به ساختار سفت‌تری کمک می‌کنند (Girard, Turgeon, & Gauthier, 2002). این نتایج با یافته‌های فو و همکاران (Fu, He, Zeng, Qin, & Chen, 2020) و ساجدی و همکاران (Sajedi et al., 2014) مطابقت دارد که افزایش سختی بافت خامه هوادهی شده را با افزایش سطح پروتئین گزارش کردند. جذب پروتئین‌ها بر سطوح حباب‌های هوا و متراکم شدن تدریجی گویچه‌های چربی بر سطوح پروتئینی منجر به تشکیل شبکه‌ای پایدار می‌شود که ساختار را سفت و پایدار می‌کند (Allen, Murray, & Dickinson, 2008).

ویژگی‌های بافتی

آنالیز بافت نشان داد که اثرات متقابل پروتئین و چربی بر پارامترهای بافتی شامل سختی، چسبندگی و قوام تأثیر بسیار معنی‌داری دارد ($p < 0.05$). همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، نمونه حاوی ۵۰٪ چربی-۲٪ پروتئین (S3) بیشترین سختی (۷۳/۵۰ گرم)، قوام (۳۱/۰۰ گرم در ثانیه) و چسبندگی (۶/۹۰ گرم در ثانیه) را نشان داد، در حالی‌که نمونه حاوی ۷۰٪ چربی-۰٪ پروتئین (S7) کمترین مقادیر سختی (۲۱/۰۰ گرم)، قوام (۱/۷۵ گرم در ثانیه) و چسبندگی (۹/۵۰ گرم در ثانیه) را داشت. با کاهش چربی و افزایش پروتئین، بافت سخت‌تری با چسبندگی و قوام بیشتر حاصل می‌شود (Dickinson, 2003).

جدول ۴- ویژگی‌های بافت سرشیر در حضور سطوح مختلف چربی خامه و کنسانتره پروتئین شیر

Table 4- Textural characteristics of Sarshir in the presence of different cream fat levels and milk protein concentrate (MPC)

چربی خامه Cream fat (%)	کنسانتره پروتئین شیر MPC (%)	پارامترها Parameters		
		سختی Hardness (g)	قوام Consistency (g.s)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)
50	0	61.00±1.52	5.00±0.42	25.50±2.12 ^{bc}
	1	63.00±0.00	5.50±0.28	27.00±0.001 ^{ab}
	2	73.50±1.41	6.90±0.70	31.00±1.41 ^a
60	0	45.50±0.71	3.85±0.21	19.00±1.41 ^{de}
	1	52.50±0.71	4.20±0.14	20.50±0.71 ^{cd}
	2	59.50±1.12	5.15±0.21	24.50±0.71 ^{bc}
70	0	21.00±1.41	1.75±0.63	9.50±2.12 ^f
	1	30.00±2.21	2.50±0.28	17.50±0.71 ^e
	2	43.00±0.00	3.65±0.07	19.50±0.11 ^{de}

نتایج به صورت میانگین ± انحراف معیار برای دو تکرار است. میانگین‌های با حروف یکسان اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p > 0.05$).

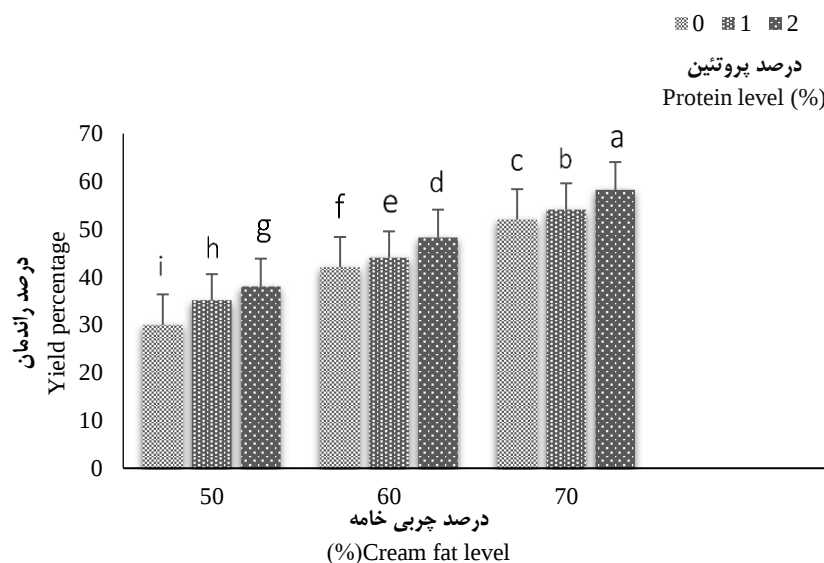
All data are expressed as mean ± standard deviation of three determinations. Values followed by the same letters show no significant differences (Tukey test, $P > 0.05$).

راندمان تولید

اثرات متقابل پروتئین و چربی بر راندمان تولید اثر معنی‌داری داشت ($p < 0.05$). افزایش درصد چربی و پروتئین به‌طور معنی‌دار باعث افزایش راندمان تولید سرشیر شد. مطابق شکل ۱، بالاترین راندمان در نمونه ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین (۵۸/۲۰۰٪) و کمترین راندمان در نمونه شاهد با ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین (۳۰/۰۰۰٪) مشاهده شد. شیر با محتوای پروتئین و چربی بالاتر باعث تولید بیشتر سرشیر و افزایش راندمان می‌شود. افزایش راندمان تولید سرشیر در تیمارهای دارای درصد بالاتر چربی و پروتئین را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی شیر نسبت داد. چربی به‌عنوان فاز اصلی تشکیل‌دهنده سرشیر، با افزایش غلظت خود موجب افزایش تعداد گلبول‌های چربی قابل جداسازی می‌شود. از سوی دیگر، پروتئین‌های شیر به‌ویژه کازئین‌ها نقش مهمی در پایداری امولسیون و پوشش سطح گلبول‌های چربی دارند و موجب بهبود قابلیت جداسازی و بازیابی چربی می‌شوند. بنابراین، وجود همزمان مقادیر بالاتر چربی و پروتئین می‌تواند اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و راندمان استخراج سرشیر را افزایش دهد. این یافته با گزارش‌های قبلی در زمینه نقش ساختار امولسیونی شیر و ترکیب آن بر کارایی فرآوری لبنی همخوانی دارد (O'Mahony, Auty, & McSweeney, 2005; Walstra et al., 2005). این یافته با نتایج جوکولا و همکاران (Jukkola et al., 2018) همخوانی دارد که نشان دادند کیفیت شیر خام و فناوری فرآوری نقش مهمی در تعیین بازده کلی تولید دارند.

زمان نگهداری

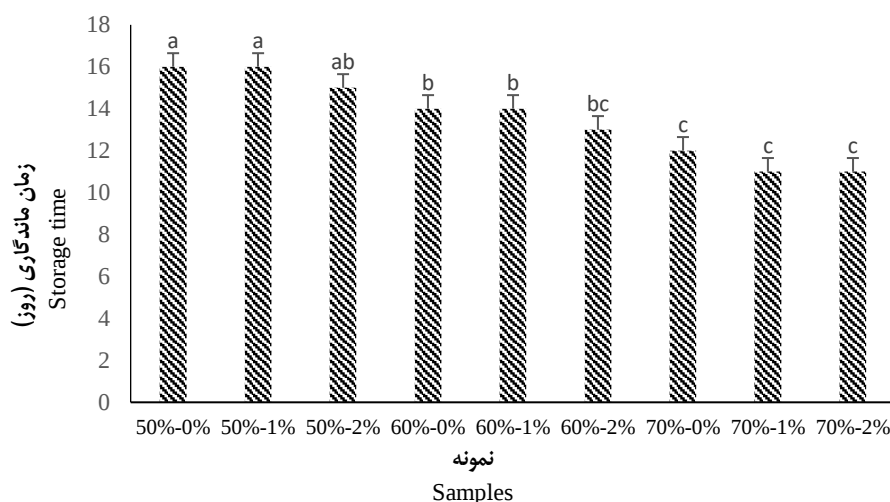
زمان نگهداری محصول در نمونه‌های مختلف اختلاف آماری بسیار معنی‌داری نشان داد ($p < 0.05$). زمان نگهداری نمونه‌های سرشیر در حضور سطوح مختلف چربی و پروتئین در شکل ۲ مشاهده می‌شود. بیشترین زمان نگهداری (۱۶ روز) در نمونه شاهد با ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین و کمترین (۷ روز) در نمونه ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین مشاهده شد. همان‌طوری که مشاهده می‌کنید، با افزایش درصد چربی زمان نگهداری محصول کاهش یافت که به دلیل حساسیت بیشتر چربی به اکسیداسیون و فراهم شدن محیط مطلوب برای رشد میکروارگانیسم‌ها است (Arul, Boudreau, Makhlouf, Tardif, & Grenier, 2009). علت رنگ زرد شدن سرشیر در واقع اکسیداسیون چربی‌ها و تیز شدن طعم به سبب هیدرولیز تری‌گلیسیریدها توسط آنزیم لیپاز می‌باشد (Jensen, 2002). همچنین، افزایش پروتئین به علت وجود گروه‌های نیتروژنی و کاهش ظرفیت بافری، خاصیت اسیدی را افزایش داده و نگهداری را کاهش می‌دهد (Precht, 2001). این نتایج با یافته‌های رودارت، زامورا، توجیلو و یوان (Rodarte, Zamora, Trujillo, & Juan, 2018) و آبابو، انداشاو و فِسِها (Ababu, Endashaw, & Fesseha, 2020) مطابقت داشت.



شکل ۱- درصد راندمان سرشیر در حضور سطوح مختلف چربی خامه و کنسانتره پروتئین شیر

(a-i، حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی دار بین نمونه‌ها می‌باشد)

Fig. 1- Yield percentage of Sarshir in the presence of different cream fat levels and milk protein concentrate (MPC) (a-i, means followed by the different are significantly different (Tukey test, $P < 0.05$))



شکل ۲- زمان نگهداری در حضور سطوح مختلف چربی خامه (۵۰، ۶۰ و ۷۰٪) و کنسانتره پروتئین شیر (۰، ۱ و ۲٪)

(a-c، حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی دار بین نمونه‌ها می‌باشد)

Fig. 2. Storage time of Sarshir in the presence of different cream fat levels (50, 60 and 70%) and milk protein concentrate (MPC) (0, 1 and 2%)

(a-c, means followed by the different are significantly different (Tukey test, $P < 0.05$))

2025). در بررسی شدت مزه، نمونه حاوی ۵۰٪ چربی-۲٪ پروتئین (S3) بالاترین امتیاز (۹/۵۹) را کسب کرد. این نمونه همچنین در پارامترهای طعم لبنی امتیاز ۹/۳۰، طعم خامه‌ای امتیاز ۶/۱۰، قوام امتیاز ۱۰/۵۴، نرمی و لطافت امتیاز ۹/۴۱، حس خامه‌ای امتیاز ۱۰/۲۳، پوشش دهانی امتیاز ۹/۵۲ و پس طعم خامه‌ای امتیاز ۹/۲۳ را کسب کرد که امتیازات بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها بود.

خصوصیات حسی

آزمون هدونیک ۹ نقطه‌ای و تحلیل توصیفی-کمی

(QDA)

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، نتایج ارزیابی حسی نشان دادند که استفاده از کنسانتره پروتئین شیر در سرشیر منجر به تغییرات معنی‌داری در خصوصیات حسی گردید (Santos et al.,)

از کاربردهای آشپزی مورد نظر است. علاوه بر این، پروتئین‌ها با تشکیل ماتریکسی مانند ژل که آب و قطرات چربی را درون مخلوط نگه می‌دارد، به ویسکوزیته و ضخامت سرشیر کمک می‌کنند. با توجه به یافته‌های به‌دست آمده می‌توان گفت افزایش شدت درک حس دهانی خامه‌ای باعث بیشتر شدن پس طعم خامه‌ای می‌شود. یافته‌های دیویک و همکاران (de Wijk, Prinz, Engelen, & Weenen, 2004) نشان داد حضور ترکیبات ساده‌تر پروتئین با کاهش پس طعم خامه‌ای همراه است که مطابق با یافته‌های این پژوهش بود.

طعم لبنی قابل درک در سرشیر با فرمولاسیون حاوی ۵۰٪ چربی-۲٪ پروتئین بالاترین امتیاز را داشت. چربی و پروتئین اگرچه دخالت مستقیم در مزه ندارند، اما باعث قوی‌تر شدن طعم می‌شوند (Kilpatrick, 2012). پوشش دهانی ایجاد شده در این نمونه نیز بهترین امتیاز را کسب کرد که نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین پروتئین و چربی با احساس دهانی مطلوب است (Ledward, 1993).

افزایش پروتئین منجر به افزایش امتیاز حسی پارامترهای لبنی، طعم خامه‌ای، نرمی و لطافت، پوشش دهانی و پس طعم خامه‌ای شد و همچنین باعث بهبود خواص بافتی از قبیل افزایش سختی، چسبندگی و قوام گردید (Vanderghem, Danthine, Blecker, & Deroanne, 2007). کاهش چربی نیز منجر به افزایش قابل توجه غلظت و قوام و همچنین افزایش حس خامه‌ای نمونه‌ها شد. این یافته‌ها با نتایج کاسارس، اسکریبا و روسلا (Casares, Escribá, & Rosselló, 2019) و فروست، دایکستهوس و مافتنس (Frøst, Dijksterhuis, & Martens, 2001) مطابقت داشت که نشان دادند پروتئین نقش مهمی در تعیین خواص بافتی و حسی محصولات لبنی دارد. وجود پروتئین بر ویسکوزیته، ثبات و احساس کلی سرشیر در دهان تأثیر می‌گذارد. هنگامی که پروتئین‌ها دناتوره یا باز می‌شوند، شبکه‌ای را تشکیل می‌دهند که به دام انداختن هوا و تثبیت ساختار سرشیر کمک می‌کند. این منجر به یک بافت مطلوب و کرمی می‌شود که در بسیاری

جدول ۵- رتبه‌بندی پاسخ هدونیک ۹ نقطه‌ای سرشیر در حضور سطوح مختلف چربی و کنسانتره پروتئین شیر

Table 5- Nine-point hedonic rating of Sarshir in the presence of different cream fat (F) levels and milk protein concentrate (MPC)

پارامتر Parameter	خصوصیت Charactritic	رتبه‌بندی پاسخ هدونیک ۹ نقطه‌ای Nine-point hedonic rating								
		اول First	دوم Second	سوم Third	چهارم Fourth	پنجم Fifth	ششم Sixth	هفتم Seventh	هشتم Eighth	نهم Ninth
مزه و طعم Taste and flavor	شدت مزه Taste intensity	S3	S2	S1	S6	S5	S4	S9	S8	S7
	طعم لبنی Dairy flavour	S3	S1	S2	S6	S5	S4	S7	S9	S8
	طعم خامه‌ای Creamy flavor	S3	S2	S1	S6	S5	S4	S7	S9	S8
احساس دهانی Mouthfeel	قوام و غلظت Viscosity and consistency	S3	S2	S1	S6	S5	S4	S9	S8	S7
	نرمی و لطافت Smoothness and softness	S3	S1	S2	S6	S5	S4	S9	S8	S7
	حس خامه‌ای Creaminess	S3	S2	S1	S6	S5	S4	S9	S8	S7
پس طعم Aftertaste	پوشش دهانی Mouth coating	S3	S2	S1	S6	S5	S4	S9	S8	S7
	پس طعم خامه‌ای Creamy aftertaste	S3	S1	S2	S6	S4	S5	S9	S8	S7

S1 (شاهد): ۵۰٪ چربی-۰٪ پروتئین، S2: ۵۰٪ چربی-۱٪ پروتئین، S3: ۵۰٪ چربی-۲٪ پروتئین، S4: ۶۰٪ چربی-۰٪ پروتئین، S5: ۶۰٪ چربی-۱٪ پروتئین، S6: ۶۰٪ چربی-۲٪ پروتئین، S7: ۷۰٪ چربی-۰٪ پروتئین، S8: ۷۰٪ چربی-۱٪ پروتئین، S9: ۷۰٪ چربی-۲٪ پروتئین
S1 (control): 50%F-0%MPC, S2: 50%F-1%MPC, S3: 50%F-2%MPC, S4: 60%F-0%MPC, S5: 60%F-1%MPC, S6: 60%F-2%MPC, S7: 70%F-0%MPC, S8: 70%F-1%MPC, S9: 70%F-2%MPC

فیزیکوشیمیایی، بافتی و حسی محصول داشته باشد. افزایش سطوح مختلف چربی و پروتئین باعث افزایش میزان ماده خشک کل و چربی در نمونه‌های سرشیر شد درحالی‌که باعث کاهش میزان اسیدیته گردید.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از کنسانتره پروتئین شیر در فرمولاسیون سرشیر می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های

میزان مشارکت نویسندگان

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است. نمونه سازی سرشیر، انجام آزمون های فیزیکی و شیمیایی و حسی، طراحی و اجرای پژوهش و نگارش پیش نویس اصلی مقاله توسط خانم صدف عبدالله زاده انجام شده است. آقای دکتر مظاهری تهرانی (استاد راهنمای پایان نامه و نویسنده مسئول) در طراحی کلی پژوهش، نظارت علمی، تفسیر نتایج و ویراستاری نهایی مقاله با سهم مشارکت ۳۰ تا ۴۰ درصد مشارکت داشته اند. خانم شکوفه تازیکی شمس آبادی در انجام آزمون بافتی و تحلیل داده های آن، نگارش و ویرایش مقاله با سهم مشارکت ۱۰ درصد همکاری داشته اند. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید نموده اند.

منابع تأمین مالی

این پژوهش برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است و با حمایت مالی (گرنٹ پژوهشی) دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

افزایش سطح چربی خامه در نمونه سرشیر باعث کاهش چشمگیری در مقدار پروتئین شد و نمونه حاوی ۵۰٪ چربی-۲٪ کنسانتره پروتئین دارای بیشترین مقدار پروتئین بود. افزایش سطوح چربی خامه باعث کاهش پارامترهای سختی، چسبندگی و قوام نمونه های سرشیر شد درحالی که حضور و افزایش پروتئین موجب افزایش پارامترهای بافتی گردید و از این کاهش جلوگیری کرد. راندمان تولید تحت تأثیر درصد چربی و پروتئین قرار داشت و با افزایش آن ها افزایش پیدا کرد. ارزیابی حسی نشان داد که نمونه حاوی ۵۰٪ چربی خامه و ۲٪ کنسانتره پروتئین از بالاترین امتیاز در پارامترهای طعم خامه ای، قوام، نرمی و لطافت و پذیرش کلی برخوردار بود. زمان نگهداری محصول با افزایش چربی خامه و کنسانتره پروتئین کاهش معنی داری یافت. نتایج نشان داد که نمونه حاوی ۵۰٪ چربی خامه و ۲٪ کنسانتره پروتئین شیر (S3)، بهترین تعادل را بین ویژگی های تغذیه ای، بافتی و حسی دارد و می تواند به عنوان فرمولاسیون بهینه برای تولید صنعتی سرشیر پیشنهاد شود. افزودن کنسانتره پروتئین شیر نه تنها ارزش تغذیه ای محصول را افزایش می دهد، بلکه موجب بهبود بافت و پایداری آن نیز می شود. با این حال، برای افزایش زمان نگهداری، کنترل دقیق میزان چربی و استفاده از بسته بندی مناسب ضروری است. همچنین پیشنهاد می شود جهت بررسی زمان ماندگاری محصول در پژوهش های آتی آزمون میکروبی انجام پذیرد.

References

1. Ababu, A., Endashaw, D., & Fesseha, H. (2020). Isolation and antimicrobial susceptibility profile of *Escherichia coli* O157:H7 from raw milk of dairy cattle in Holeta district, central Ethiopia. *International Journal of Microbiology*, 2020(1), 6626488. <https://doi.org/10.1155/2020/6626488>
2. Adapa, S., Dingeldein, H., Schmidt, K., & Herald, T. (2000). Rheological properties of ice cream mixes and frozen ice creams containing fat and fat replacers. *Journal of Dairy Science*, 83(10), 2224-2229. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75106-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75106-X)
3. Akalin, A.S., Karagözlü, C., & Ünal, G. (2008). Rheological properties of reduced-fat and low-fat ice cream containing whey protein isolate and inulin. *European Food Research and Technology*, 227(3), 889-895. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0800-z>
4. Akalin, A.S., Tokusoglu, Ö., Gönç, S., & Ökten, S. (2005). Detection of biologically active isomers of conjugated linoleic acid in kaymak. *Grasas Y Aceites*, 56(4), 298-302. <https://doi.org/10.3989/gya.2005.v56.i4.96>
5. Akarca, G., Tomar, O., & Çağlar, A. (2014). Production of Afyon kaymak with traditional and technological methods. *Journal of Food Science and Engineering*, 4(3). <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2014.03.001>
6. Allen, K.E., Murray, B.S., & Dickinson, E. (2008). Development of a model whipped cream: Effects of emulsion droplet liquid/solid character and added hydrocolloid. *Food Hydrocolloids*, 22(4), 690-699. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.01.017>
7. AOAC. (1970). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Association of official analytical chemists*. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.44636>
8. Arul, J., Boudreau, A., Makhlouf, J., Tardif, R., & Grenier, B. (2009). Distribution of cholesterol in milk fat fractions. *Journal of Dairy Research*, 55(3), 361-371. <https://doi.org/10.1017/S0022029900028624>
9. Berge, A., & Baars, T. (2020). Raw milk producers with high levels of hygiene and safety. *Epidemiology & Infection*, 148, e14. <https://doi.org/10.1017/S0950268820000060>
10. Cakmakci, S., & Hayaloglu, A.A. (2011). Evaluation of the chemical, microbiological and volatile aroma characteristics of Ispir Kaymak, a traditional Turkish dairy product. *International Journal of Dairy Technology*, 64(3), 444-450. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2011.00687.x>

11. Casares, D., Escribá, P.V., & Rosselló, C.A. (2019). Membrane lipid composition: effect on membrane and organelle structure, function and compartmentalization and therapeutic avenues. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2167. <https://doi.org/10.3390/ijms20092167>
12. De Kruif, C., & Holt, C. (2003). Casein micelle structure, functions and interactions *Advanced dairy chemistry—1 proteins: part a/part b* (pp. 233-276): Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8602-3_5
13. de Wijk, R.A., Prinz, J.F., Engelen, L., & Weenen, H. (2004). The role of α -amylase in the perception of oral texture and flavour in custards. *Physiology & Behavior*, 83(1), 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2004.07.014>
14. Deeth, H. (1997). The role of phospholipids in the stability of milk fat globules. *Australian Journal of Dairy Technology*, 52, 44-46.
15. Dickinson, E. (1998). Stability and rheological implications of electrostatic milk protein-polysaccharide interactions. *Trends in Food Science & Technology*, 9(10), 347-354. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00057-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00057-0)
16. Farajzadeh, J., Shahbalvasani, A., & Eshaghi, M. (2020). Production of low-fat pastry cream using cow's milk protein concentrate. *Journal of Animal Environment*, 12(1), 435-442.
17. Foroughinia, S., Abbasi, S., & Hamidi Esfahani, Z. (2007). Effect of individual and combined addition of salep, tragacanth and guar gums on the stabilization of Iranian doogh. *Iranian Journal of Nutrition Science and Food Technology*, 2(2), 25-15.
18. Frøst, M.B., Dijksterhuis, G., & Martens, M. (2001). Sensory perception of fat in milk. *Food Quality and Preference*, 12(5), 327-336. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(01\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(01)00018-0)
19. Fu, L., He, Z., Zeng, M., Qin, F., & Chen, J. (2020). Effects of soy protein composition in recombined soy-based cream on the stability and physical properties of whipping cream. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(6), 2732-2741. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10305>
20. Girard, M., Turgeon, S.L., & Gauthier, S.F. (2002). Interbiopolymer complexing between β -lactoglobulin and low- and high-methylated pectin measured by potentiometric titration and ultrafiltration. *Food Hydrocolloids*, 16(6), 585-591. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00020-6)
21. Goh, K.K., Teo, A., Sarkar, A., & Singh, H. (2020). Milk protein-polysaccharide interactions *Milk proteins* (pp. 499-535): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815251-5.00013-X>
22. Hansen, S.F., Nielsen, S.D., Rasmussen, J.T., Larsen, L.B., & Wiking, L. (2020). Disulfide bond formation is not crucial for the heat-induced interaction between β -lactoglobulin and milk fat globule membrane proteins. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 5874-5881. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18066>
23. Hasdogan, H. (2004). *Determination of some chemical and microbiological properties of milk creams consumed in breakfast salons of Van province*. (M.Sc. Thesis), Yüzüncü Yıl University, Van, Turkey.
24. ISIRI. (366). Milk, cream and evaporated milk– Determination of fat content (Vol. 1992). Tehran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
25. ISIRI. (695). Milk, cream and evaporated milk– Determination of total solids content (Vol. 1985). Tehran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran. <https://doi.org/10.3403/30229880u>
26. ISIRI. (2852). Milk and milk products- Determination of titratable acidity and pH test method (Vol. 2007). Tehran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
27. Jensen, R.G. (2002). The composition of Bovine milk lipids: January 1995 to December 2000. *Journal of Dairy Science*, 85(2), 295-350. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74079-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74079-4)
28. Jensen, R.G., & Newburg, D.S. (1995). Bovine milk lipids *Handbook of milk composition* (pp. 543-575): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-012384430-9/50024-x>
29. Jukkola, A., Partanen, R., Rojas, O.J., & Heino, A. (2018). Effect of heat treatment and pH on the efficiency of micro-diafiltration for the separation of native fat globules from cream in butter production. *Journal of Membrane Science*, 548, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.11.012>
30. Kamelan, H., Mazaheri Tehrani, M., Edalatjan Dovom, M., Razavi, S.M.A., & Haddad Khodaparast, M.H. (2020). Study of the fatty acids profile and some physicochemical properties of Gilanvand and Daliran kaymaks in comparison to the heavy cream. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 17(104), 114-105. <https://doi.org/10.52547/fsct.17.104.105>
31. Kelly, P., Woonton, B., & Smithers, G. (2009). Improving the sensory quality, shelf-life and functionality of milk *Functional and speciality beverage technology* (pp. 170-231): Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845695569.2.170>
32. Keogh, M. (2006). Chemistry and technology of butter and milk fat spreads *Advanced dairy chemistry volume 2 lipids* (pp. 333-363): Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-28813-9_9
33. Kilpatrick, P.K. (2012). Water-in-Crude oil emulsion stabilization: Review and unanswered questions. *Energy & Fuels*, 26(7), 4017-4026. <https://doi.org/10.1021/ef3003262>

34. Ledward, D.A. (1993). Creating textures from mixed biopolymer systems. *Trends in Food Science & Technology*, 4(12), 402-405. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(93\)90044-B](https://doi.org/10.1016/0924-2244(93)90044-B)
35. Liang, L., & Luo, Y. (2020). Casein and pectin: Structures, interactions, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 391-403. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.027>
36. Ma, Y., & Barbano, D. (2000). Gravity separation of raw bovine milk: fat globule size distribution and fat content of milk fractions. *Journal of Dairy Science*, 83(8), 1719-1727. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75041-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75041-7)
37. O'Mahony, J.A., Auty, M.A.E., & McSweeney, P.L.H. (2005). The manufacture of miniature Cheddar-type cheeses from milks with different fat globule size distributions. *Journal of Dairy Research*, 72(3), 338-348. <https://doi.org/10.1017/S0022029905001044>
38. Oliveira, D., & O'Mahony, J. (2020). Composition, fractionation, techno-functional properties and applications of milk fat globule membrane-derived material *Advanced Dairy Chemistry, Volume 2: Lipids* (pp. 169-195): Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48686-0_6
39. Ong, L., Pax, A.P., Ong, A., Vongsivut, J., Tobin, M.J., Kentish, S.E., & Gras, S.L. (2020). The effect of pH on the fat and protein within cream cheese and their influence on textural and rheological properties. *Food Chemistry*, 332, 127327. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127327>
40. Pelegri, D., & Gasparetto, C. (2005). Whey proteins solubility as function of temperature and pH. *LWT-Food Science and Technology*, 38(1), 77-80. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.03.013>
41. Phipps, L.W. (1983). Effects of fat concentration on the homogenization of cream. *Journal of Dairy Research*, 50(1), 91-96. <https://doi.org/10.1017/S0022029900032556>
42. Precht, D. (2001). Cholesterol content in European bovine milk fats. *Food/Nahrung*, 45(1), 2-8. [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20010101\)45:1<2::aid-food2>3.0.co;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20010101)45:1<2::aid-food2>3.0.co;2-5)
43. Rodarte, D., Zamora, A., Trujillo, A.-J., & Juan, B. (2018). Effect of ultra-high pressure homogenization on cream: Shelf life and physicochemical characteristics. *LWT*, 92, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.020>
44. Sajedi, M., Nasirpour, A., Keramat, J., & Desobry, S. (2014). Effect of modified whey protein concentrate on physical properties and stability of whipped cream. *Food Hydrocolloids*, 36, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.09.007>
45. Santos, P.H.d.S., Suzuki, C.K., & Lannes, S.C.d.S. (2025). Structural properties before and after ripening of ice cream made with different dairy fat bases. *Foods*, 14(18), 3276. <https://doi.org/10.3390/foods14183276>
46. Swaisgood, H.E. (1982). Chemistry of milk protein.
47. van Lent, K., Le, C.T., Vanlerberghe, B., & Van der Meeren, P. (2008). Effect of formulation on the emulsion and whipping properties of recombined dairy cream. *International Dairy Journal*, 18(10-11), 1003-1010. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.04.002>
48. Vanderghem, C., Danthine, S., Blecker, C., & Deroanne, C. (2007). Effect of protease-peptone addition on some physico-chemical characteristics of recombined dairy creams. *International Dairy Journal*, 17(8), 889-895. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.10.008>
49. Walstra, P., Walstra, P., Wouters, J.T., & Geurts, T.J. (2005). *Dairy science and technology*: CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420028010>
50. Weinbreck, F., De Vries, R., Schrooyen, P., & De Kruif, C. (2003). Complex coacervation of whey proteins and gum arabic. *Biomacromolecules*, 4(2), 293-303. <https://doi.org/10.1021/bm025667n>

Research Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 363-388

Optimization of Enzymatic Hydrolysis of Olive Seeds Protein by Response Surface Methodology and Evaluation of Its Stability

M. Ranjbar¹, A. Sadeghi Mahoonak^{1*}, M. Ghorbani¹

1- Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources (GUASNR), Gorgan, Iran

(*- Corresponding Author Email: sadeghiaz@yahoo.com)

Received: 07.06.2026

Revised: 20.07.2026

Accepted: 02.08.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Ranjbar, M., Sadeghi Mahoonak, A., & Ghorbani, M. (2026). Optimization of enzymatic hydrolysis of olive seeds protein by response surface methodology and evaluation of its stability. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 363-388. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99163.1589>

Introduction

Olive Seeds is a major by-product of the olive oil industry, produced in millions of tons annually. It contains significant amounts of protein (approximately 13.5%) along with fiber, lipids, and phenolic compounds. However, native proteins have low solubility and complex structures that limit their functionality. Enzymatic hydrolysis is an eco-friendly method to release bioactive peptides with antioxidant, ACE-inhibitory, and cholesterol-lowering activities. The choice of enzyme is crucial; alcalase (a broad-specificity serine protease) and trypsin (a specific protease cleaving at lysine and arginine residues) produce different peptide profiles. Process variables such as hydrolysis time and enzyme-to-substrate (E/S) ratio significantly affect the degree of hydrolysis and antioxidant activity. Response Surface Methodology (RSM) is a powerful statistical tool for optimizing such multi-variable processes. Moreover, the stability of hydrolysates during storage, thermal processing, freeze-thaw cycles, and pH changes is essential for industrial applications. This study aimed to optimize the hydrolysis conditions (time and E/S ratio) for olive seeds protein using alcalase and trypsin via RSM, evaluate the antioxidant activities, and assess the stability of the optimal hydrolysates under different pH, heat, refrigeration, freeze-thaw, and ambient storage conditions.

Materials and Methods

Olive seeds were obtained from local market at Gorgan then dried, ground, defatted with hexane (AOAC method), and protein was isolated by alkaline extraction (pH 11) followed by isoelectric precipitation (pH 4). Protein isolate (5% w/v) was hydrolyzed in Tris-HCl buffer (pH 8 for alcalase, pH 7 for trypsin) at 50°C (alcalase) or 37°C (trypsin) with E/S ratios of 1–3% and 30–210 min according to a Central Composite Design (CCD) approach. The reaction was stopped by heating at 85°C for 30 min, then centrifuged and freeze-dried. Antioxidant activities were measured by different methods namely: DPPH radical scavenging, reducing power, and total antioxidant capacity (phosphomolybdenum method). Stability tests included: pH stability (pH 3–8, 30 min), thermal stability (95°C for 15–75 min), refrigeration storage stability (4°C for 15 days), freeze-thaw cycles stability (15 days), and ambient storage (25°C for 7 days). Data were analyzed by Design Expert, ANOVA followed by Duncan's multirange test (SPSS), and graphs prepared by Excel software.

Results and Discussion

RSM analysis showed that both time and E/S ratio had significant quadratic effects on DPPH, FRAP, and TAC for both enzymes. For alcalase, response surfaces exhibited a dome-shaped central peak with optimal conditions around 150 min and E/S 2%. For trypsin, a rising quadratic plateau was observed, with optimal conditions around 139 min and E/S 2%. These patterns confirm that excessive hydrolysis reduces antioxidant activity due to over-degradation of active peptides into free amino acids. Alcalase hydrolysates consistently showed higher antioxidant



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.2026.99163.1589>

activities than trypsin hydrolysates, attributed to alcalase's preference for hydrolyzing at hydrophobic/aromatic amino acids (Phe, Tyr, Trp, Leu, Val) which are strong electron donors. Stability studies revealed, pH: Maximum TAC at pH 7–8, minimum at pH 3–4 (near isoelectric point). Alcalase hydrolysate was more stable. Heat (95°C): Gradual time-dependent decrease in both FRAP and TAC; alcalase hydrolysate retained higher activity after 75 min. Refrigeration (4°C, 15 days): Progressive decline in TAC and FRAP; alcalase hydrolysate showed slower decay. Freeze-thaw (15 days): Significant reduction after each cycle, mainly due to ice crystal damage and cryoconcentration; alcalase hydrolysate more resistant. Ambient (25°C, 7 days): Faster decline than refrigeration; alcalase hydrolysate.

Conclusion

The optimal hydrolysis conditions for olive seeds protein were determined using RSM. Alcalase-produced hydrolysate exhibited superior antioxidant activity and stability compared to trypsin-hydrolysate due to the release of hydrophobic/aromatic-rich peptides. Stability decreased in all tested conditions (heat, freeze-thaw, storage), but alcalase hydrolysate consistently showed higher retention. These findings support the valorization of olive seeds protein as a source of stable antioxidant peptides for food and pharmaceutical applications.

Keywords: Antioxidant, Bioactive peptide, Olive seeds, Optimization, Protease

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۳۸۸-۳۶۳

بهینه‌سازی هیدرولیز آنزیمی پروتئین هسته زیتون با روش سطح پاسخ و ارزیابی پایداری آن

منا رنجبر^۱ - علیرضا صادقی ماهونک^{۱*} - محمد قربانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

چکیده

هسته زیتون به‌عنوان یک محصول جانبی صنعت روغن‌گیری، منبعی غنی از پروتئین با پتانسیل تولید پپتیدهای زیست‌فعال است. در این پژوهش، هیدرولیز آنزیمی پروتئین استخراج‌شده از هسته زیتون (رقم زر زیتون) با استفاده از دو آنزیم آلکالاز و تریپسین، با هدف بهینه‌سازی شرایط فرایند (زمان و نسبت آنزیم به سوبسترا) با روش سطح پاسخ (Central Composite Design) انجام شد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌ها با سه آزمون مهار رادیکال DPPH، قدرت احیاکنندگی آهن و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل (TAC)، روش فسفومولیدات) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که هر دو متغیر تأثیر معنی‌داری بر پاسخ‌ها داشته و الگوی پاسخ به‌صورت درجه دوم با وجود یک ناحیه بهینه مرکزی بود. هیدرولیزات حاصل از آلکالاز در تمامی شرایط، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به تریپسین نشان داد. طبق نتایج مقادیر بهینه برای آنزیم آلکالاز زمان ۱۵۰ دقیقه و نسبت آنزیم به سوبسترا ۲٪ و برای آنزیم تریپسین زمان ۱۳۹ دقیقه و نسبت آنزیم به سوبسترا ۲٪ می‌باشد. همچنین پایداری هیدرولیزات بهینه در برابر pH (۳ تا ۸)، حرارت (۹۵ درجه سانتی‌گراد تا ۷۵ دقیقه)، نگهداری در یخچال (۴ درجه، ۱۵ روز)، چرخه‌های انجماد-ذوب (۱۵ روز) و دمای محیط (۲۵ درجه، ۷ روز) بررسی شد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی در تمامی شرایط به‌طور وابسته به زمان کاهش یافت، اما هیدرولیز آلکالاز پایداری بهتری نشان داد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که هیدرولیز کنترل‌شده با آلکالاز در شرایط بهینه، روشی کارآمد برای تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدان پایدار از هسته زیتون با قابلیت کاربرد در صنایع غذایی و دارویی است.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، بهینه‌سازی، پروتئاز، پپتید زیست‌فعال، هسته زیتون

مقدمه

پایین مورد استفاده قرار می‌گرفتند. با این حال، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که هسته زیتون، برخلاف تصور رایج، منبعی غنی از ترکیبات ارزشمند تغذیه‌ای و زیست‌فعال است. هسته زیتون از دو بخش اصلی تشکیل شده است: یک پوسته چوبی بیرونی و یک مغز داخلی. هسته زیتون حاوی مقادیر قابل توجهی پروتئین (حدود ۱۳/۵٪)، فیبر غذایی (۴۲٪)، لیپیدها (۲۰٪)، خاکستر (۳٪) و طیف وسیعی از ترکیبات فنولی با خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی اثبات‌شده است (Hernández-Corroto, Marina, & García, 2020).

مجموعه این ترکیبات زیست‌فعال و مغذی، هسته زیتون را از یک ضایعات کشاورزی به یک ماده اولیه بالقوه و پایدار برای استخراج

صنعت فرآوری زیتون (شامل تولید روغن زیتون و کنسرو زیتون) سالانه حجم عظیمی از محصولات جانبی جامد تولید می‌کند که در صورت عدم مدیریت صحیح، به‌دلیل بار آلاینده‌ی بالا، تهدیدی جدی برای محیط‌زیست محسوب می‌شوند. تخمین زده می‌شود که این صنعت در سطح جهانی سالانه بیش از ۴۰ میلیون تن زیست‌توده زائد تولید می‌کند که بخش عمده‌ای از آن را هسته زیتون تشکیل می‌دهد (Dahdouh, Khay, Le Brech, El Maakoul, & Bakhouya, 2023). در رویکرد سنتی، این ضایعات عمدتاً به‌عنوان سوخت، خوراک دام و یا در برخی محصولات صنعتی به‌عنوان مواد اولیه با ارزش افزوده

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*)- نویسنده مسئول: sadeghiaz@yahoo.com (Email:)

ترکیبات زیست‌فعال و تولید مواد مغذی فراسودمند تبدیل کرده است (Dahdouh et al., 2023). در همین راستا، مفهوم اقتصاد چرخشی و بازیافت کامل پسماند، بازاستفاده از این محصول جانبی را به یک ضرورت اقتصادی و زیست‌محیطی تبدیل کرده است. در میان ترکیبات ارزشمند موجود در هسته زیتون، پروتئین‌های آن به دلیل پتانسیل بالایشان برای تولید پپتیدهای زیست‌فعال، اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (Bartolomei et al., 2022). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که پروتئین هسته زیتون از چندین فراکسیون پروتئینی تشکیل شده است که عمدتاً شامل گلوپلین، گلوبولین، آلبومین و مقادیر کمتری پرولامین هستند و گلوپلین معمولاً فراکسیون غالب را تشکیل می‌دهد. همچنین گزارش شده است که پروتئین هسته زیتون حاوی مقادیر قابل توجهی از اسیدهای آمینه گلوتامیک اسید، آسپارتیک اسید، آرژنین، لوسین، والین و فنیل‌آلانین است. حضور اسیدهای آمینه آب‌گریز و آروماتیک، به‌ویژه فنیل‌آلانین، تیروزین و در صورت حضور، تریپتوفان، می‌تواند زمینه مناسبی برای تولید پپتیدهای دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی پس از هیدرولیز آنزیمی فراهم کند (Maestri et al., 2019).

با این وجود، پروتئین‌ها در شکل اولیه و دست‌نخورده خود دارای حالیت پایین، وزن مولکولی بالا و ساختار پیچیده‌ای هستند که دسترسی زیستی و فعالیت عملکردی آن‌ها را محدود می‌کند (Mohammad, da Silva Ferreira, Jacintho Barbosa, & Barbosa Junior, 2023). برای غلبه بر این محدودیت‌ها، هیدرولیز آنزیمی کنترل‌شده به‌عنوان یک روش کارآمد و دوستدار محیط‌زیست برای بهبود خواص عملکردی، تغذیه‌ای و زیست‌فعالی پروتئین‌های گیاهی شناخته شده است (Wen, Zhang, Zhang, Duan, & Ma, 2020). این فرآیند با شکستن پیوندهای پپتیدی و تولید پپتیدهایی با زنجیره کوتاه‌تر، منجر به آزادسازی پپتیدهای نهفته در ساختار پروتئین می‌شود که اغلب فعالیت‌های زیستی قدرتمندی از جمله فعالیت آنتی‌اکسیدانی، کاهش کلسترول و فشارخون را از خود نشان می‌دهند (Udenigwe & Aluko, 2012). تحقیقات پیشین به وضوح نشان داده‌اند که هیدرولیز آنزیمی پروتئین‌های ایزوله شده از هسته و دانه زیتون با استفاده از آنزیم‌های مختلف، به تولید هیدرولیزات‌هایی با فعالیت‌های زیستی امیدوارکننده منجر می‌شود. برای مثال، بارتولومئی و همکاران (Bartolomei et al., 2022) نشان دادند که هیدرولیزات‌های پروتئینی حاصل از دلنه‌های زیتون با استفاده از آنزیم‌های مختلف، علاوه بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی، برخی پپتیدهای زیست‌فعال دارای اثرات ضددیابتی نیز هستند. یکی از مکانیسم‌های مهم این پپتیدها، مهار آنزیم دی‌پپتیدیل پپتیداز-۴^۱ است. این آنزیم

مسئول تجزیه هورمون‌های اینکرتینی، به‌ویژه پپتید شبه‌گلوکاگون-۱^۲، در بدن است. مهار DPP-IV موجب افزایش پایداری و نیمه‌عمر GLP-1 شده و در نتیجه، ترشح انسولین وابسته به گلوکز را تقویت، ترشح گلوکاگون را کاهش و به حفظ تعادل قند خون کمک می‌کند. از این رو، پپتیدهای حاصل از هیدرولیز آنزیمی پروتئین‌های غذایی به‌عنوان ترکیباتی با پتانسیل توسعه غذاهای فراسودمند و مکمل‌های ضددیابت مورد توجه قرار گرفته‌اند (Bartolomei et al., 2022). مطالعه‌ای با هدف تولید پپتیدهای زیست‌فعال از پروتئین هسته زیتون از طریق هیدرولیز آنزیمی انجام شد. پژوهشگران با بهینه‌سازی شرایط هیدرولیز و استفاده از آنزیم‌های مختلف، پپتیدهایی با توانایی اتصال به اسیدهای صفراوی، مهار کلسترول استراز و مهار آنزیم HMG-CoA ردکتاز تولید کردند. همچنین با استفاده از LC-MS/MS بیش از ۴۵ توالی پپتیدی زیست‌فعال شناسایی شد. نتایج نشان داد هسته زیتون منبع ارزشمندی برای تولید پپتیدهای عملکردی محسوب می‌شود (Prados, Dominguez-Vega, Marina, & Garcia, 2023).

انتخاب نوع آنزیم، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده در ویژگی‌های محصول نهایی هیدرولیز است. آنزیم‌های پروتئاز مختلف با توجه به ویژگی و محل برش خاص خود، پروفایل پپتیدی کاملاً متفاوتی تولید می‌کنند. در این میان، آلکالاز، یک اندوپپتیداز قلیایی از خانواده سرین پروتئازها، به‌طور گسترده به‌عنوان یکی از کارآمدترین آنزیم‌ها برای تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدانی از منابع مختلف پروتئینی گیاهی و حیوانی شناخته می‌شود (Mardani, Badakné, Farmani, & Aluko, 2023). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که هیدرولیزات‌های تولید شده با آلکالاز اغلب بالاترین درجه هیدرولیز و قوی‌ترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی را در مقایسه با سایر آنزیم‌های تجاری دارا هستند (Sripokar, Panya, & Sriwattana, 2022). از سوی دیگر، تریپسین یک پروتئاز گوارشی با ویژگی بالا است که پیوندهای پپتیدی را در سمت کربوکسیل اسیدهای آمینه لیزین و آرژنین هیدرولیز می‌کند. این آنزیم نیز به‌طور مؤثری برای تولید هیدرولیزات‌های پروتئینی با خواص آنتی‌اکسیدانی از منابع مختلف به کار رفته است (Mardani et al., 2024). آلکالاز و تریپسین از نظر اختصاصیت برش پیوندهای پپتیدی با یکدیگر تفاوت دارند؛ به‌طوری‌که آلکالاز با اختصاصیت نسبتاً گسترده، پیوندهای پپتیدی متنوعی را هیدرولیز می‌کند، در حالی‌که تریپسین به‌طور اختصاصی پیوندهای مجاور اسیدهای آمینه لیزین و آرژنین را می‌شکند. این تفاوت در الگوی هیدرولیز، منجر به تولید پپتیدهایی با توالی، طول زنجیره و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوت می‌شود که در نتیجه،

می‌توانند فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی متفاوتی از خود نشان دهند. همچنین، شرایط بهینه هیدرولیز از جمله غلظت آنزیم و زمان هیدرولیز، به‌طور چشمگیری بر درجه هیدرولیز و در نتیجه بر میزان و نوع فعالیت آنتی‌اکسیدانی محصول نهایی تأثیر می‌گذارند (Fathi, Hosseini, Ramezani, & Rashidi, 2022).

پپتیدهای زیست‌فعال حاصل از هیدرولیز آنزیمی پروتئین‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی در مهار فرآیندهای اکسیداتیو نقش ایفا می‌کنند. مهم‌ترین مکانیسم، خنثی‌سازی مستقیم گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد از طریق اهدای الکترون یا اتم هیدروژن است که موجب توقف واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداسیون می‌شود. علاوه بر این، بسیاری از پپتیدهای آنتی‌اکسیدان قادرند یون‌های فلزی واسطه نظیر Fe^{+2} و Cu^{+2} را کلاته کنند و از تشکیل رادیکال‌های بسیار واکنش‌پذیر از طریق واکنش فنتون جلوگیری نمایند. برخی پپتیدها نیز با احیای ترکیبات اکسیدشده یا افزایش فعالیت سامانه‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی درون‌سلولی، از آسیب اکسیداتیو جلوگیری می‌کنند. کارایی این پپتیدها به ویژگی‌های ساختاری آن‌ها از جمله توالی اسیدهای آمینه، وزن مولکولی، میزان آب‌گریزی و حضور اسیدهای آمینه آروماتیک (مانند تیروزین، تریپتوفان و فنیل‌آلانین)، اسیدهای آمینه گوگرددار (مانند سیستئین و متیونین) و همچنین هیستیدین وابسته است. این باقی‌مانده‌های اسیدآمینه به‌دلیل توانایی انتقال الکترون، اهدای هیدروژن و تشکیل کمپلکس با یون‌های فلزی، نقش مهمی در افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی پپتیدها ایفا می‌کنند. از این‌رو، نوع آنزیم مورد استفاده در هیدرولیز و اختصاصیت برش آن، با تعیین ترکیب و توالی پپتیدهای حاصل، تأثیر مستقیمی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌های پروتئینی خواهد داشت (Wen et al., 2018).

با توجه به پیچیدگی فرآیند هیدرولیز آنزیمی و تأثیر متقابل متغیرهای مختلف بر یکدیگر، استفاده از روش‌های آماری پیشرفته برای بهینه‌سازی این فرآیندها ضروری است. روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology, RSM) یکی از قدرتمندترین و کارآمدترین روش‌های آماری-ریاضی برای بهینه‌سازی فرآیندهایی است که تحت تأثیر چندین متغیر مستقل قرار دارند. این روش با طراحی آزمایش‌های هدفمند و مدل‌سازی ریاضی، امکان یافتن شرایط بهینه را با حداقل تعداد آزمایش فراهم می‌کند و هم‌زمان اثرات متقابل متغیرها را نیز بررسی می‌نماید (Yang, Huang, Dong, & Wang, 2023). یکی از چالش‌های اساسی در مسیر تجاری‌سازی و کاربرد پپتیدهای زیست‌فعال در صنایع غذایی و دارویی، حفظ پایداری ساختاری و عملکردی آن‌ها در طول فرآوری، انبارداری و مصرف است. پپتیدهای حاصل از هیدرولیز آنزیمی، برخلاف پروتئین‌های دست‌نخورده، به‌دلیل

وزن مولکولی پایین‌تر و در معرض قرار گرفتن گروه‌های عاملی، مستعد واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی متعددی هستند که می‌تواند منجر به از دست رفتن فعالیت زیستی آن‌ها شود (Liu, Guo, & Ma, 2023). عواملی نظیر تغییرات pH محیط، اعمال حرارت در طی فرآیندهای پاستوریزاسیون یا استریلیزاسیون، چرخه‌های انجماد-ذوب، و مدت زمان نگهداری در دماهای مختلف (محیط یا یخچال) از مهم‌ترین تنش‌های محیطی هستند که می‌توانند ساختار پپتیدها و در نتیجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (Ashaolu Le, & Suttikhana, 2023). از این‌رو، بخشی از این پژوهش، پایداری پروتئین‌های هیدرولیز شده هسته زیتون (تولید شده تحت شرایط بهینه با آنزیم‌های آلکالاز و تریپسین) در برابر طیف وسیعی از pH، تیمارهای حرارتی مختلف، چرخه‌های انجماد-ذوب و در طول دوره نگهداری در دماهای محیط و یخچال مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. pH محیط یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در پایداری و حالیت پروتئین‌ها و پپتیدها است. تغییرات pH می‌تواند با تغییر بار خالص مولکول‌ها و ایجاد نیروهای جاذبه یا دافعه الکترواستاتیک، منجر به تجمع، رسوب و یا حتی هیدرولیز بیشتر پپتیدها شود. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پپتیدهای حاصل از هیدرولیز آنزیمی معمولاً دارای پایداری خوبی در محدوده وسیعی از pH هستند (Wang, Luo, & Sun, 2021). در مقایسه با پروتئین‌های طبیعی، بسیاری از پروتئین‌های هیدرولیز شده به‌دلیل وزن مولکولی پایین‌تر، نداشتن ساختارهای سوم و چهارم پیچیده و انعطاف‌پذیری بیشتر، در برابر تغییرات pH مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهند. از آنجاکه این پپتیدها فاقد برهم‌کنش‌های ضعیف مسئول حفظ ساختار فضایی پروتئین‌ها (مانند پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های آب‌گریز و یونی) هستند، تغییرات pH معمولاً موجب دناتوره شدن آن‌ها نمی‌شود. با این حال، پایداری آن‌ها به توالی اسیدهای آمینه، وزن مولکولی و شرایط محیطی وابسته است و در pHهای بسیار اسیدی یا بسیارقلیایی ممکن است برخی تغییرات شیمیایی، از جمله هیدرولیز یا تغییر در بار الکتریکی، بر فعالیت زیستی آن‌ها اثر بگذارد (Rivero-Pino, 2023). انجماد یک روش رایج برای نگهداری طولانی‌مدت مواد غذایی و ترکیبات زیست‌فعال است. با این حال، چرخه‌های انجماد و ذوب می‌تواند تنش‌های فیزیکی شدیدی به سیستم‌های پروتئینی وارد کنند. تشکیل کریستال‌های یخ در حین انجماد می‌تواند منجر به تخریب ساختار، واسرشتگی و در نهایت تجمع پروتئین‌ها و پپتیدها شود. همچنین، در طی فرآیند ذوب، غلظت موضعی املاح افزایش یافته و احتمال واکنش‌های شیمیایی نامطلوب بالا می‌رود (Adjonu, Doran, Torley, & Agboola, 2023). پایداری در طول زمان یکی از مهم‌ترین معیارها برای تجاری‌سازی هر محصول غذایی یا دارویی است. پروتئین‌های هیدرولیز شده در طول نگهداری ممکن

است دچار تغییرات شیمیایی و فیزیکی متعددی شوند. واکنش‌های اکسیداسیون (به‌ویژه اکسیداسیون اسیدهای آمینه گوگرددار مانند متیونین و سیستئین)، واکنش میلارد (در حضور قندهای احیاکننده)، تجمع (آگرگاسیون) پپتیدها از طریق پیوندهای هیدروفوبیک یا دی‌سولفیدی، و جذب رطوبت از محیط از جمله مهم‌ترین تغییراتی هستند که می‌توانند در طول نگهداری رخ دهند. دمای نگهداری نیز نقش کلیدی در سرعت این تغییرات ایفا می‌کند (Roy, Ullah, Alam, & Islam, 2021).

اگرچه در سال‌های اخیر مطالعاتی درباره تولید پپتیدهای زیست‌فعال از پروتئین هسته زیتون منتشر شده است، این مطالعات عمدتاً بر ارزیابی فعالیت‌های زیستی هیدرولیزات‌های حاصل از تعداد محدودی آنزیم، به‌ویژه آلکالاز، و شناسایی پپتیدهای حاصل متمرکز بوده‌اند. با این حال، اطلاعات محدودی درباره مقایسه عملکرد آنزیم‌هایی با اختصاصیت متفاوت، مانند آلکالاز و تریپسین، در تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدان از پروتئین هسته زیتون وجود دارد. همچنین، پایداری فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌های حاصل در شرایط مختلف فرآوری و نگهداری، از جمله تغییرات pH، تیمارهای حرارتی، چرخه‌های انجماد-ذوب و نگهداری، به‌طور جامع بررسی نشده است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی تولید هیدرولیزات‌های پروتئینی هسته زیتون با استفاده از دو آنزیم آلکالاز و تریپسین، مقایسه ظرفیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌های حاصل و ارزیابی پایداری آن‌ها در شرایط مختلف فرآوری و نگهداری انجام شد تا بخشی از خلأهای موجود در زمینه توسعه ترکیبات زیست‌فعال حاصل از این محصول جانبی ارزشمند را برطرف کند.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه و چربی‌گیری

هسته زیتون (رقم زر) از بازار گرگان تهیه و پس از خشک شدن نسبی، به پودر یکنواخت تبدیل گردید. چربی نمونه با استفاده از هگزان و طی ۲۴ ساعت با نسبت ۱:۱۰ در دمای اتاق ۵ بار متوالی بر اساس روش (AOAC 1990) استخراج شد. پودر چربی‌گیری شده پس از تبخیر حلال، مجدداً آسیاب و با الک مش ۵۰ غربال گردید و تا زمان استخراج پروتئین در ۱۸- درجه سانتی‌گراد ذخیره شد (Farzanfar, Mahoonak, Ghorbani, Ghaboos, & Kaveh, 2025).

فرآیند استخراج پروتئین

پودر چربی‌گیری شده با آب مقطر به نسبت ۱:۱۰ (وزنی/حجمی) مخلوط شد و pH سوسپانسیون با استفاده از محلول هیدروکسید سدیم ۱ نرمال به ۱۱ تنظیم گردید تا حلالیت پروتئین به حداکثر برسد پس از یک ساعت هم‌زدن مداوم در دمای اتاق، سوسپانسیون در $600 \times g$ و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ (Z36HK, HERMLE, Germany) شد. فاز رویی جمع‌آوری و pH آن با استفاده از اسید کلریدریک ۱ نرمال به ۴ (نقطه ایزوالکتریک) رسانده شد تا پروتئین رسوب کند. سپس رسوب پروتئینی تحت همان شرایط سانتریفیوژ بازیابی شد، با آب مقطر سرد دوبار با نسبت ۱:۵ شسته شد تا نمک‌ها و سایر ترکیبات محلول حذف شوند و در نهایت به وسیله خشک‌کن انجمادی (FDB-5503, Operon, South Korea) خشک شد (Farzanfar et al., 2025). لازم به ذکر می‌باشد بازده استخراج پروتئین از پودر هسته زیتون ۱۵ درصد و میزان خلوص آن ۲۰ درصد بود.

هیدرولیز آنزیمی

ایزوله پروتئینی با غلظت ۵٪ (وزنی/حجمی) در بافر تریس HCl- با pH مناسب آنزیم (۸ برای آلکالاز (EC 3.4.21.62) L) تولیدشده از *Bacillus licheniformis* با فعالیت ۲/۹۷۲ U/mL و ۷ برای تریپسین (EC 3.4.21.4) استخراج‌شده از پانکراس، با فعالیت $10,000 \leq$ (BAEE units mg^{-1} protein) حل گردید. آنزیم (Sigma-Aldrich) (St. Louis, MO, USA) در سه سطح (نسبت به وزن پروتئین) مطابق جدول ۱ افزوده شد. فرآیند در شیکر انکوباتور با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه و در دماهای ۵۰ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد (به ترتیب برای آلکالاز و تریپسین) به مدت ۳۰ تا ۲۱۰ دقیقه صورت پذیرفت. جهت توقف واکنش، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در ۸۵ درجه سانتی‌گراد حرارت دید در نهایت، پس از سانتریفیوژ ۵۰۰۰ g به مدت ۳۰ دقیقه، سوپرناتانت توسط خشک‌کن انجمادی خشک شد و در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد بسته‌بندی شد (Farzanfar et al., 2025).

طراحی آزمایش و بهینه‌سازی

به‌منظور شناسایی شرایط بهینه هیدرولیز، از طرح مرکب مرکزی (CCD) در قالب روش سطح پاسخ (RSM) استفاده گردید. متغیرهای مستقل شامل غلظت آنزیم (۱-۳٪) و زمان واکنش (۲۱۰-۳۰ دقیقه) و پاسخ‌های مورد سنجش عبارت بودند از: فعالیت مهار DPPH، قدرت احیاکنندگی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل.

جدول ۱- طرح آزمایش مرکب مرکزی و پاسخ متغیرهای وابسته به متغیر مستقل در هیدرولیز پروتئین هسته زیتون توسط آنزیم آلکالاز و تریپسین

Table 1- Central composite design layout and dependent variable responses as a function of independent variables in hydrolysis of olive seeds protein by alcalase and trypsin

تیماها	زمان هیدرولیز	نسبت آنزیم به سوبسترا
Treatment	Hydrolysis time (min)	Enzyme-to-substrate (%)
1	56.36	1.29
2	183.64	1.29
3	183.64	2.70
4	120	2
5	120	1
6	120	2
7	30	2
8	56.36	2.70
9	120	3
10	120	2
11	210	2
12	120	2
13	120	2

روی با آب مقطر و محلول کلرید فریک (۱٪) مخلوط شد و جذب نهایی در طول موج ۷۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. افزایش جذب در ۷۰۰ نانومتر به‌عنوان شاخص افزایش قدرت احیاکنندگی نمونه در نظر گرفته شد.

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل بر اساس روش فسفومولیدنوم مطابق با فرزان فر و همکاران (Farzanfar et al., 2025) تعیین شد. بدین منظور، مقدار معینی از نمونه با معرف فسفومولیدنوم مخلوط و به‌مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد انکوبه شد. پس از خنک شدن نمونه‌ها تا دمای اتاق، جذب آن‌ها در طول موج ۶۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل بر اساس میزان احیای مولیدن (VI) به مولیدن (V) بیان گردید.

آزمون‌های پایداری

پایداری پروتئین‌های هیدرولیز شده در شرایط محیطی مختلف بر اساس روش لی و همکاران (Li et al., 2015) ارزیابی شد: پایداری حرارتی: حرارت‌دهی محلول نمونه در ۹۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۵ تا ۷۵ دقیقه. پایداری به pH: تنظیم pH نمونه‌ها در محدوده ۳ تا ۸ به‌مدت ۳۰ دقیقه و سپس خنثی‌سازی. پایداری نگهداری: نگهداری نمونه‌ها به‌مدت ۱۵ روز در سه شرایط: فریزر (۱۸-)، یخچال (۴) و محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد). سپس پایداری هر تیمار توسط فعالیت آنتی‌اکسیدانی (قدرت احیاکنندگی و ظرفیت کل) سنجیده شد.

روش آماری

به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند از نظر خواص آنتی‌اکسیدانی از نرم‌افزار Design Expert و روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی برای

درجه هیدرولیز (DH)

درجه هیدرولیز با اندازه‌گیری پروتئین محلول در ۲۰٪ TCA نسبت به کل پروتئین به روش فرزان فر و همکاران (Farzanfar et al., 2025) تعیین شد. غلظت پروتئین با روش بردفورد (He, 2011) اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری پروتئین محلول، پروتئین هیدرولیزشده و محلول ۲۰٪ TCA با نسبت حجمی ۱:۱ مخلوط شدند. سپس نمونه‌ها در $10000 \times g$ به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. غلظت پروتئین موجود در فاز رویی با روش بردفورد اندازه‌گیری و درجه هیدرولیز بر اساس نسبت پروتئین محلول در TCA به کل پروتئین نمونه محاسبه شد.

مهار رادیکال DPPH

بر اساس روش فرزان فر و همکاران (Farzanfar et al., 2025)، حجم‌های مساوی از محلول نمونه (۴۰ mg/mL) و محلول DPPH (0.1 mM)، تهیه‌شده در متانول با نسبت حجمی ۱:۱ مخلوط شدند. پس از اختلاط، نمونه‌ها به‌مدت ۶۰ دقیقه در تاریکی و دمای اتاق انکوبه شدند و سپس جذب آن‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (Jenway, England, ۷۶۱۵) اندازه‌گیری شد. درصد مهار رادیکال DPPH بر اساس اختلاف جذب نمونه و شاهد محاسبه گردید.

قدرت احیاکنندگی

بر اساس روش نوشی و همکاران (Nooshi Manjili, & Sadeghi Mahoonak, 2022)، مقدار معینی از نمونه با بافر فسفات (۰/۲ M، pH 6.6) و محلول ۱٪ فری‌سیانید پتاسیم مخلوط و به‌مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انکوبه شد. سپس محلول ۱۰٪ TCA افزوده و نمونه‌ها سانتریفیوژ شدند. مقدار مشخصی از فاز

ترکیب اسیدهای آمینه برقرار است، مشاهده می‌شود (Islam et al., 2022; Xu et al., 2023; Hwang et al., 2024a). این موضوع تأکید می‌کند که در هیدرولیز با آلکالاز، تنظیم هم‌زمان شدت و مدت واکنش برای دستیابی به پپتیدهای زیست‌فعال ضروری است و افزایش یک متغیر به‌تنهایی نمی‌تواند حداکثر فعالیت آنتی‌اکسیدانی را تضمین کند. این یافته با نتایج لاکولدیلوک و سرینکارین (Sarrinkarin, 2017 Laokuldilok, & Martinez et al., 2023) بر روی پروتئین سبوس برنج و مارتینز و همکاران (Martinez et al., 2023) بر روی پروتئین ریه گاو که هر دو با آلکالاز هیدرولیز شده بودند، همخوانی کامل دارد.

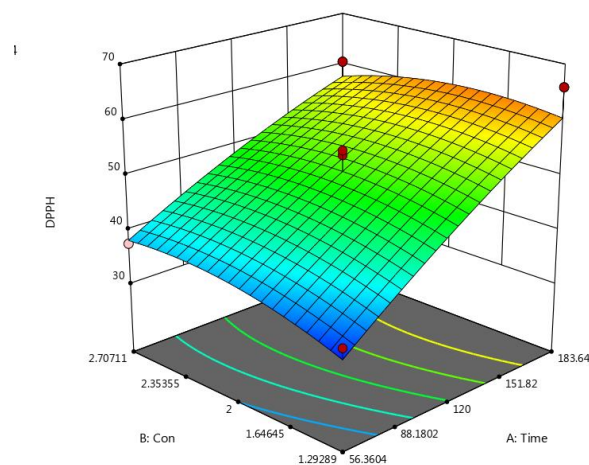
شکل ۲ نمودار سه بعدی درصد مهار رادیکال آزاد DPPH وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم تریپسین به سوبسترا (پروتئین هسته زیتون) بدست آمده از بررسی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل سطح پاسخ (RSM) نشان داد که زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوبسترا تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH) هیدرولیزات پروتئین هسته زیتون دارند. همان‌گونه که در نمودار سطح پاسخ و کانتور مشاهده می‌شود، فعالیت آنتی‌اکسیدانی با افزایش زمان هیدرولیز از مقادیر پایین به سمت مقادیر متوسط افزایش یافته و در ادامه، در زمان‌های طولانی‌تر، روند افزایشی کاهش یافته و به سمت یک مقدار بیشینه میل می‌کند. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک محدوده بهینه برای زمان هیدرولیز در فرآیند هیدرولیز آنزیمی است. اثر نسبت آنزیم به سوبسترا نیز روند افزایشی مشخصی را تا محدوده‌ای معین نشان داد، به‌طوری‌که افزایش نسبت آنزیم به سوبسترا موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد. با این حال، در مقادیر بالاتر این نسبت، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی محدود شده و شیب تغییرات کاهش می‌یابد. در نتیجه، افزایش بیش از حد شدت هیدرولیز می‌تواند منجر به تولید پپتیدهای بسیار کوتاه یا اسیدهای آمینه آزاد شود که فعالیت آنتی‌اکسیدانی کمتری نسبت به پپتیدهای کوتاه و ساختاریافته دارند. نمودار کانتور نسبتاً متقارن و شکل محدب سطح پاسخ نشان‌دهنده وجود اثر متقابل معنی‌دار بین زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوبسترا است، به‌گونه‌ای که بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در ناحیه‌ای حاصل شده است که هر دو متغیر در مقادیر متوسط تا بالا قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار آنزیم لزوماً منجر به بهبود فعالیت زیستی نمی‌شود و وجود یک نسبت بهینه ضروری است. همچنین انحناهای سطح پاسخ بیانگر وجود اثر متقابل معنی‌دار بین زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوبسترا است، به‌گونه‌ای که بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی تنها در شرایطی حاصل می‌شود که هر دو متغیر به‌طور هم‌زمان در محدوده بهینه قرار داشته باشند (Bartolomei et al., 2022).

متغیر مستقل غلظت آنزیم و زمان هیدرولیز در پنج سطح استفاده شد. پاسخ‌های مورد بررسی فعالیت مهار رادیکال DPPH، قدرت آنتی‌اکسیدانی کل و ظرفیت احیاءکنندگی آهن بود. به‌منظور آنالیز داده‌ها و بررسی اطلاعات حاصل از آزمایش از طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. جهت تعیین اختلاف بین میانگین داده‌ها پس از آنالیز واریانس (ANOVA)، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۹۵ درصد استفاده گردید. تجزیه و تحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید. تمامی آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد.

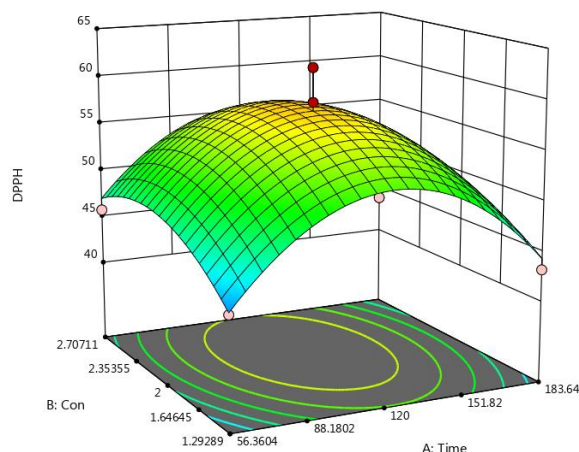
نتایج و بحث

فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH

شکل ۱ نمودار سه بعدی نتایج حاصل از تحلیل سطح پاسخ (RSM) نشان داد که زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوبسترا تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH) هیدرولیزات پروتئین هسته زیتون حاصل از هیدرولیز با آنزیم آلکالاز دارند. مطابق نمودار سه‌بعدی، افزایش زمان هیدرولیز از مقادیر پایین به سمت مقادیر بالاتر، منجر به افزایش قابل توجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد؛ با این حال، این روند افزایشی در زمان‌های طولانی‌تر به سمت حالت پایدار میل می‌کند. چنین رفتاری نشان می‌دهد که اگرچه افزایش زمان هیدرولیز باعث افزایش درجه هیدرولیز و آزادسازی پپتیدهای زیست‌فعال می‌شود، اما در شرایط شدیدتر و تجزیه پپتیدهای فعال به اسیدهای آمینه آزاد افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به توقف یا کاهش اثر آنتی‌اکسیدانی شود (Fathi et al., 2022). از سوی دیگر، افزایش نسبت آنزیم به سوبسترا تا محدوده‌ای مشخص باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی گردید که این موضوع را می‌توان به افزایش درجه هیدرولیز، افزایش تعداد پیوندهای پپتیدی شکسته‌شده و آزادسازی پپتیدهای زیست‌فعال با وزن مولکولی پایین‌تر نسبت داد. نتایج درجه هیدرولیز نیز نشان داد که با افزایش نسبت آنزیم به سوبسترا، میزان هیدرولیز تا رسیدن به شرایط بهینه افزایش یافت که این امر با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی همسو بود. با این حال، در نسبت‌های بالاتر آنزیم به سوبسترا، اگرچه درجه هیدرولیز همچنان افزایش یافت، اما فعالیت آنتی‌اکسیدانی روند افزایشی خود را از دست داد و به حالت تقریباً ثابت یا کاهشی رسید. این رفتار نشان می‌دهد که هیدرولیز بیش از حد می‌تواند منجر به تولید پپتیدهای بسیار کوتاه یا اسیدهای آمینه آزاد شود که توانایی کمتری در انتقال الکترون و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد نسبت به پپتیدهای با طول متوسط دارند؛ بنابراین، بیشینه فعالیت آنتی‌اکسیدانی الزاماً در بیشترین درجه هیدرولیز حاصل نمی‌شود، بلکه در یک درجه هیدرولیز بهینه که تعادل مناسبی بین اندازه پپتیدها و



شکل ۱- نمودار سه بعدی درصد مهار رادیکال آزاد DPPH وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم آلكالاز به سوپسترا
Fig. 1. Three-dimensional response surface plot of DPPH radical scavenging activity as a function of hydrolysis time and alcalase-to-substrate ratio



شکل ۲- نمودار سه بعدی درصد مهار رادیکال آزاد DPPH وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم تریپسین به سوپسترا
Fig. 2. Three-dimensional response surface plot of DPPH radical scavenging activity as a function of hydrolysis time and trypsin-to-substrate ratio

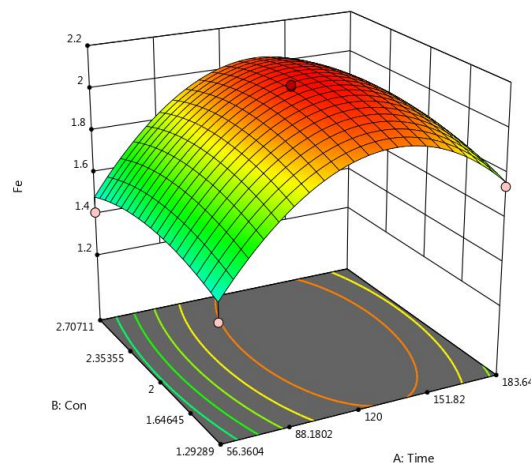
میزان احیا یون آهن

شکل ۳ نمودار سه بعدی میزان احیا یون آهن وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم آلكالاز به سوپسترا بدست آمده از بررسی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert را نشان می‌دهد. سطح سه‌بعدی رسم‌شده نشان داد که فعالیت احیاکنندگی آهن تابع درجه دوم از زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوپسترا است. با افزایش هم‌زمان زمان و نسبت آنزیم به سوپسترا از مقادیر کم به مقادیر میانی، مقدار قدرت احیا

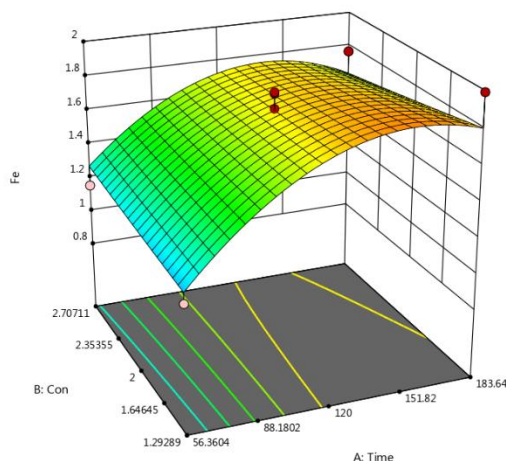
به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و سطح پاسخ به‌صورت یک گنبد با قله مشخص در ناحیه میانی ظاهر شد، در حالی که در زمان‌ها و غلظت‌های بالاتر، پاسخ کاهش پیدا کرد. در زمان‌های طولانی‌تر و غلظت‌های بالاتر، به‌علت شکسته شدن بیشتر زنجیره‌ها و تبدیل پپتیدهای فعال به قطعات بسیار کوتاه یا اسیدهای آمینه منفرد، فعالیت آنتی‌اکسیدانی کاهش می‌یابد و یک نقطه بهینه مشخص برای هر دو عامل شکل می‌گیرد (Bartolomei et al., 2022).

پاسخ خمیده و نسبتاً مسطح شد که می‌تواند ناظر بر رسیدن سیستم به درجه هیدرولیز بهینه برای تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدان باشد (Fathi *et al.*, 2022). از دیدگاه مکانیسمی، افزایش اولیه قدرت احیاکنندگی یون آهن با افزایش زمان و نسبت آنزیم را می‌توان به تولید تدریجی پپتیدهای کوتاه‌تر و غنی از اسیدهای آمینه آروماتیک و هیدروفوب نسبت داد که توان بالایی در اهدا الکترون و احیای یون Fe^{3+} به Fe^{2+} دارند (Mardani *et al.*, 2023). در مراحل پیشرفته‌تر هیدرولیز، اگرچه در نمودار حاضر کاهش واضحی در انتهای بازه دیده نمی‌شود، اما کاهش شیب سطح نشان می‌دهد که احتمالاً بخش عمده پیوندهای حساس شکسته شده و تجمع بیش از حد پپتیدهای بسیار کوتاه یا اسیدآمینه‌های آزاد می‌تواند از افزایش بیشتر فعالیت آنتی‌اکسیدانی جلوگیری کند. وجود سطح پاسخ کوادراتیک با ناحیه بهینه مشخص نشان می‌دهد که استفاده از روش سطح پاسخ، ابزار مناسبی برای پیش‌بینی و کنترل شرایط فرآیندی تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدان از هسته زیتون است، همان‌گونه که برای سایر منابع پروتئینی گیاهی گزارش شده است (Nooshi & Sadeghi Mahoonak, 2024).

شکل ۴ نمودار سه بعدی میزان احیا یون آهن وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم ترپسین به سوپسترا بدست آمده از بررسی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از طراحی آزمایش نشان داد که فعالیت احیاکنندگی آهن هیدرولیزات پروتئین هسته زیتون در اثر افزایش زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوپسترا به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. سطح سه‌بعدی ترسیم‌شده برای پاسخ، روندی کوادراتیک را نشان داد که در آن با افزایش زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوپسترا، مقدار قدرت احیاکنندگی آهن ابتدا با شیب نسبتاً زیاد افزایش یافته و سپس در ناحیه‌ای با زمان‌های بالاتر و سطوح متوسط تا بالای آنزیم به یک حالت پایدار نزدیک می‌شود. این الگو بیانگر آن است که در محدوده طراحی‌شده، با وجود افزایش عوامل فرآیندی، سیستم به نقطه یا ناحیه بهینه نزدیک شده و افزایش بیشتر زمان یا آنزیم، بهبود چشمگیری در پاسخ ایجاد نمی‌کند. در بخش‌هایی از سطح که زمان و غلظت آنزیم در سطوح پایین قرار داشتند، شیب سطح پاسخ تندتر بود که نشان‌دهنده حساسیت زیاد قدرت احیاکنندگی به تغییرات این دو عامل در ابتدای فرآیند است. در مقابل، در زمان‌های طولانی‌تر و مقادیر بالاتر نسبت آنزیم به سوپسترا، سطح



شکل ۳- نمودار سه بعدی میزان احیا یون آهن وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم آلكالاز به سوپسترا
Fig. 3. Three-dimensional response surface plot of ferric reducing power as a function of hydrolysis time and alcalase -to-substrate ratio



شکل ۴- نمودار سه بعدی میزان احیا یون آهن وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم تریپسین به سوبسترا
Fig. 4. Three-dimensional response surface plot of ferric reducing power as a function of hydrolysis time and trypsin-to-substrate ratio

هیدرولیز بهینه و اشباع تولید پپتیدهای فعال را تأیید می‌کند. از دیدگاه مکانیزمی، افزایش TAC به رهاسازی پپتیدهای کوتاه غنی از گروه‌های کاهنده (SH- از سیستمین، فنلی از تیروزین/تریپتوفان) نسبت داده می‌شود (Fathi et al., 2022).

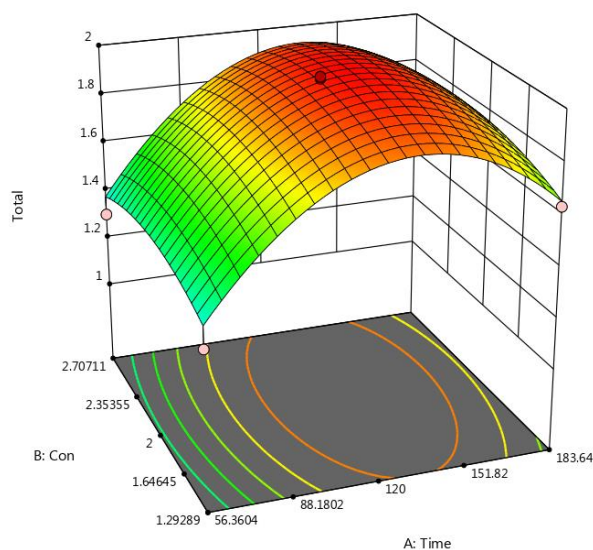
پاسخ‌های فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه بهینه تولید شده

نتایج نشان داد که هیدرولیز آنزیمی با استفاده از آنزیم‌های الکالاز و تریپسین، به‌طور معنی‌داری موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌های پروتئینی شد که این افزایش به‌شدت تحت تأثیر شرایط فرآیندی از جمله زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوبسترا قرار داشت. تحلیل سطح پاسخ (RSM) نشان داد اثر متغیرهای فرآیندی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی خطی نبوده و در تمامی آزمون‌ها، وجود یک محدوده بهینه برای زمان هیدرولیز و نسبت آنزیم به سوبسترا مشاهده شد. پاسخ‌های فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه بهینه تولید شده در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد تفاوت معنی‌داری بین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مدل بهینه و شرایط آزمایشگاهی وجود ندارد (جدول ۳). هیدرولیزات حاصل از الکالاز در تمامی شرایط، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به تریپسین نشان داد. طبق نتایج مقادیر بهینه برای آنزیم الکالاز زمان ۱۵۰ دقیقه و نسبت آنزیم به سوبسترا ۲٪ و برای آنزیم تریپسین زمان ۱۳۹ دقیقه و نسبت آنزیم به سوبسترا ۲٪ می‌باشد. انتخاب این شرایط بر مبنای حداکثرسازی پاسخ‌های مورد بررسی شامل فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل، قدرت احیاکنندگی آهن و مهار رادیکال آزاد DPPH و در عین حال حفظ مقادیر مطلوب سایر پاسخ‌ها انجام شد. به عبارت دیگر، شرایط بهینه در نقطه‌ای انتخاب شد که به طور هم‌زمان بیشترین مقدار مطلوبیت برای تمامی پاسخ‌ها حاصل گردید.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل

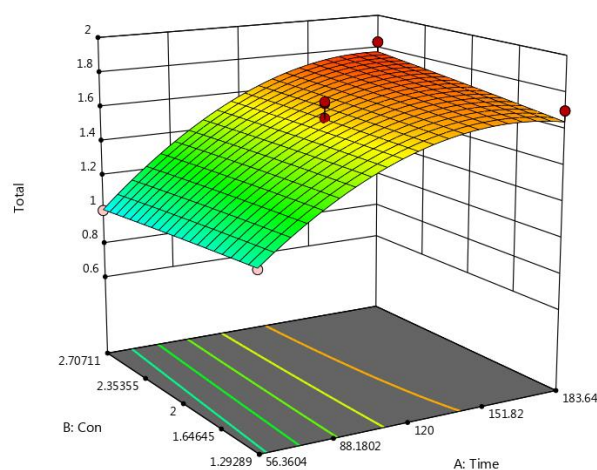
شکل ۵ نمودار سه بعدی فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم الکالاز به سوبسترا بدست آمده از بررسی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert را نشان می‌دهد. سطح سه‌بعدی به‌دست‌آمده الگویی کوادراتیک گنبدی‌شکل با قله مرکزی را نشان داد. در این سطح، با افزایش زمان هیدرولیز (A: 30-186 دقیقه) و نسبت آنزیم به سوبسترا (B: 1.6-2.9%) TAC از مقادیر پایین (۱.۰-۱.۳، رنگ‌های سرد) به قله‌ای برجسته (۱.۸-۲.۰، رنگ قرمز) در مرکز) در ناحیه میانی (۹۰-۱۲۰ دقیقه، B ~ 2.3%) رسید و سپس در حاشیه‌ها (زمان/غلظت بالا) به شدت افت کرد و به ~ ۱.۲ بازگشت. این مطالعه با پژوهش بارتولومئی و همکاران (Bartolomei et al., 2022) و استیو و همکاران (Esteve et al., 2015) مطابقت دارد.

شکل ۶ نمودار سه بعدی فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم تریپسین به سوبسترا بدست آمده از بررسی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design Expert را نشان می‌دهد. سطح سه‌بعدی به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ برای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل (TAC، آزمون احیای مولیبدات) هیدرولیزات پروتئین هسته زیتون با تریپسین، روندی کوادراتیک صعودی را نشان داد. در این سطح، افزایش هم‌زمان زمان هیدرولیز (از حدود ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه) و نسبت آنزیم به سوبسترا (E/S، از حدود ۱.۳ تا ۲.۷٪) موجب بهبود پاسخ از مقادیر پایین (۰.۸، رنگ‌های سرد) به مقادیر بالا (۱.۷-۱.۸، رنگ‌های گرم) شد و در ناحیه زمان‌های طولانی‌تر و سطوح متوسط تا بالای آنزیم به شبه‌پایداری رسید. شیب تند اولیه سطح، حساسیت بالای TAC به تغییرات عوامل در مراحل آغازین هیدرولیز را نشان می‌دهد، در حالی که خمیدگی و مسطح شدن در انتها، رسیدن به درجه



شکل ۵- نمودار سه بعدی فعالیت آنتی اکسیدانی کل وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم آلكالاز به سوبسترا

Fig. 5. Three-dimensional response surface plot of total antioxidant capacity (TAC) as a function of hydrolysis time and alcalase-to-substrate ratio



شکل ۶- نمودار سه بعدی فعالیت آنتی اکسیدانی کل وابسته به متغیرهای زمان و نسبت آنزیم تریپسین به سوبسترا

Fig. 6. Three-dimensional response surface plot of total antioxidant capacity (TAC) as a function of hydrolysis time and trypsin-to-substrate ratio

جدول ۲- پاسخ‌های فعالیت آنتی اکسیدانی نمونه بهینه تولید شده در شرایط آزمایشگاه

Table 2- Antioxidant activity responses of the optimal hydrolysate produced under laboratory conditions

آزمون‌ها Tests	درجه هیدرولیز Degree of hydrolysis	فعالیت آنتی اکسیدانی کل Total antioxidant capacity (Abs. 695nm)	میزان احیا یون آهن Ferric reducing power (Abs. 700nm)	DPPH درصد مهار رادیکال آزاد DPPH radical scavenging activity (%)
نمونه Sample				
هیدرولیز شده توسط آلکالاز (در آزمایشگاه) Alcalase hydrolysate (Experimental)	20.4±2.2	1.91±0.1a	2.01±0.1a	56.21±5.9a
هیدرولیز شده توسط آلکالاز (پیش بینی شده) Alcalase hydrolysate (Predicted)		1.96±0.2a	2.07±0.3a	56.96±6.2a
هیدرولیز شده توسط تریپسین (در آزمایشگاه) Trypsin hydrolysate (Experimental)	18.3±1.8	1.69±0.1a	1.75±0.2a	55.84±4.1a
هیدرولیز شده توسط تریپسین (پیش بینی شده) Trypsin hydrolysate (Predicted)		1.67±0.1a	1.79±0.4a	56.04±5.6a

*حروف متفاوت در هر ردیف نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار ($P < 0.05$) و حروف یکسان نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار هستند.

*Within each row, different superscript letters indicate a significant difference between the experimental and software-predicted values ($P < 0.05$), while the same letters indicate no significant difference.

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) و شاخص‌های برازش مدل درجه دوم برای پاسخ‌های حاصل از هیدرولیز پروتئین هسته زیتون با آنزیم‌های آلکالاز و تریپسین

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) and goodness-of-fit statistics of the quadratic models for response variables of olive pit protein hydrolysates produced using Alcalase and Trypsin

پاسخ Response	مدل منتخب Model	C.V%	Adjusted R ²	R ²	Lack of Fit	P- value	F- value
مهار رادیکال آزاد DPPH (آلکالاز) DPPH Radical Scavenging Activity (Alcalase)	Quadratic	8.8	0.831	0.9	Not significant	0.002	12.91
قدرت احیاکنندگی آهن (آلکالاز) Ferric Reducing Power (Alcalase)	Quadratic	3.86	0.948	0.97	Not significant	0.0001	45.32
فعالیت آنتی اکسیدانی کل (آلکالاز) Total Antioxidant Activity (Alcalase)	Quadratic	4.1	0.94	0.98	Not significant	0.0001	45.3
مهار رادیکال آزاد DPPH (تریپسین) DPPH Radical Scavenging Activity (Trypsin)	Quadratic	4.09	0.88	0.93	Not significant	0.0006	19.29
قدرت احیاکنندگی آهن (تریپسین) Ferric Reducing Power (Trypsin)	Quadratic	12.21	0.66	0.8	Not significant	0.021	5.66
فعالیت آنتی اکسیدانی کل (تریپسین) Total Antioxidant Activity (Trypsin)	Quadratic	9.0	0.84	0.9	Not significant	0.0017	13.76

بنیادین از تأثیر pH بر برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی بین باقی‌مانده‌های اسید آمینه باردار همسو است. در مقادیر پایین pH (۳ تا ۵)، غلظت بالای یون‌های H^+ موجب پروتونه شدن گروه‌های یونی موجود در زنجیره‌های جانبی اسیدهای آمینه شده و در نتیجه بار خالص پروتئین و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و پل‌های نمکی تغییر می‌کند. این تغییرات سبب افزایش فشرده‌گی ساختار یا کاهش بازشدگی پروتئین شده و دسترسی باقی‌مانده‌های فعال آنتی اکسیدانی به

پایداری هیدرولیزات در شرایط مختلف فرآیند (حرارت، انجماد و pH)

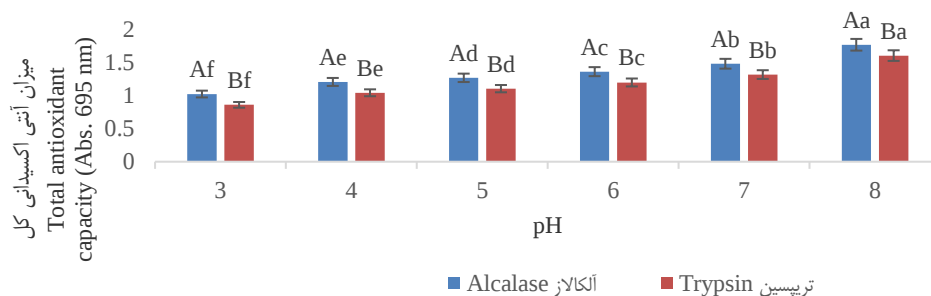
پایداری در محدوده pH = (3-8)

آنتی اکسیدانی کل

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ظرفیت آنتی اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده رفتار وابسته به pH را نشان داد و با افزایش pH از ۳ به ۸ به‌طور تدریجی افزایش یافت. این مشاهده با درک

زنجیره‌های اکسیداسیون را خاتمه دهند. علاوه بر این، قطعات پپتیدی کوچک‌تر تولید شده توسط آلکالاز تمایل به حلالیت و تحرک بیشتری دارند و برهمکنش آنها با گونه‌های فعال اکسیژن را تسهیل می‌کنند (Pérez-Gálvez et al., 2024). در مقابل، تریپسین که به‌طور اختصاصی در سمت کربوکسیل باقی‌مانده‌های لیزین و آرژنین برش می‌زند، پروفایل پپتیدی متفاوتی تولید می‌کند که ممکن است غنی از اسیدهای آمینه آبگریز و آروماتیک نباشد. در نتیجه، تفاوت در ترکیب پپتیدی و طول زنجیره بین هیدرولیزات‌های حاصل از آلکالاز و تریپسین به‌طور مستقیم بر پتانسیل آنتی‌اکسیدانی آنها تأثیر می‌گذارد (Pérez-Gálvez et al., 2024; Ahmadi, Kadivar, & Shahedi, 2007). افزایش مشاهده شده در ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل با افزایش pH (از ۳ به ۸) از نظر مکانیکی با بهبود حلالیت و انعطاف‌پذیری ساختاری هیدرولیزات‌های پروتئینی در شرایط قلیایی مرتبط است. در pH پایین، پروتئین شدن باقی‌مانده‌های اسید آمینه اسیدی (مانند گلوتامیک و آسپارتیک اسید) و بار خالص مثبت پپتیدها ممکن است تجمع بین مولکولی را از طریق جاذبه الکترواستاتیکی افزایش دهد و در نتیجه تعداد مکان‌های فعال برای خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد را کاهش دهد. برعکس، در شرایط قلیایی (pH=۸-۷)، دیپروتونه شدن گروه‌های تیول (SH-) و گروه‌های هیدروکسیل فنولی، همراه با افزایش بار خالص منفی، دافعه الکترواستاتیکی بین زنجیره‌های پپتیدی را افزایش داده، از تجمع جلوگیری کرده و دسترسی به زنجیره‌های جانبی فعال آنتی‌اکسیدانی را بهبود می‌بخشد (Liu et al., 2023). همکاران (Pérez-Gálvez et al., 2024) اثر نوع آنزیم و pH را بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی هیدرولیزات‌های پروتئین زیتون بررسی کردند. نتایج نشان داد هیدرولیز آنزیمی باعث تغییر توزیع وزن مولکولی پپتیدها و افزایش انعطاف‌پذیری ساختار پروتئین می‌شود و pH نیز نقش مهمی در عملکرد هیدرولیزات‌ها دارد. این تغییرات موجب بهبود خواص عملکردی و قابلیت استفاده از پروتئین‌های زیتون در فرمولاسیون مواد غذایی شد.

رادیکال‌های آزاد را محدود می‌کند. با افزایش pH به سمت شرایط خنثی و کمی قلیایی (۶ تا ۸)، دی‌پروتونه شدن گروه‌های اسیدی، افزایش دافعه الکترواستاتیکی بین گروه‌های هم‌بار و تغییر آرایش فضایی پروتئین، موجب بازتر شدن ساختار و افزایش در معرض قرار گرفتن باقی‌مانده‌های آروماتیک و آبگریز مانند تیروزین، تریپتوفان و فنیل‌آلنین می‌شود که نقش مهمی در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و انتقال الکترون دارند (Pérez-Gálvez et al., 2024). علاوه بر این، در دسترس بودن بیشتر گروه‌های اهداکننده پروتون (مانند OH و NH₂) در pH بالاتر، انتقال الکترون و اهدای هیدروژن را برای خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد تسهیل می‌کند. بنابراین، افزایش وابسته به pH در فعالیت آنتی‌اکسیدانی مشاهده شده به اثرات ترکیبی بازشدگی ساختاری، افزایش قرار گرفتن باقی‌مانده‌های فعال و بهبود ظرفیت اهدای الکترون در شرایط قلیایی نسبت داده می‌شود (Esteve et al., 2015). مقایسه بین دو آنزیم پروتئولیتیک آلکالاز و تریپسین مورد استفاده برای هیدرولیز پروتئین، تفاوت‌های آشکاری را در کارایی آنها در آزادسازی پپتیدهای آنتی‌اکسیدانی نشان داد. بر اساس منابع علمی، اگرچه تمام هیدرولیزات آنزیمی به‌طور کلی دارای خواص آنتی‌اکسیدانی هستند، اما آلکالاز به‌طور مداوم هیدرولیزاتی با بالاترین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در میان پروتئین‌های مختلف تولید می‌کند. این برتری به ویژگی بستر گسترده‌تر آلکالاز نسبت داده می‌شود، به‌ویژه تمایل آن به شکستن پیوندهای پپتیدی در مجاورت باقی‌مانده‌های اسید آمینه آبگریز مانند فنیل‌آلنین، تیروزین، تریپتوفان، لوسین و والین. این اسیدهای آمینه خاص، هنگامی که به‌صورت آزاد یا به‌عنوان بخشی از پپتیدهای زنجیره کوتاه آزاد می‌شوند، به‌دلیل فعالیت قوی خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کلات‌کنندگی فلزات به خوبی شناخته شده‌اند (Mardani et al., 2023). حلقه‌های آروماتیک و زنجیره‌های جانبی آبگریز این باقی‌مانده‌ها می‌توانند به‌طور مؤثر الکترون اهدا کرده و الکترون‌های جفت‌نشده رادیکال‌های آزاد را پایدار کنند و در نتیجه



شکل ۷- فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در محدوده pH ۳ تا ۸

*حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح (P < 0.05) است.

Fig. 7. Total antioxidant capacity of hydrolyzed olive seeds protein in the pH range of 3 to 8

*Different letters indicate differences at the level (P>0.05).

احیاکنندگی آهن

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، قدرت احیاکنندگی آهن پروتئین هیدرولیز شده رفتار وابسته به pH را نشان داد و با افزایش pH از ۳ به ۸ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این یافته با درک مکانیسم آزمون بر پایه احیای یون‌های فریک (Fe^{3+}) به یون‌های فرو (Fe^{2+}) توسط آنتی‌اکسیدان‌ها استوار می‌باشد، قابل توجیه است. در مقادیر پایین pH (۳ تا ۵)، غلظت بالای یون‌های H^+ می‌تواند باعث پروتونه شدن گروه‌های عاملی اهداکننده الکترون در زنجیره‌های جانبی اسیدهای آمینه (مانند گروه‌های هیدروکسیل تیروزین و گروه‌های تیول سیستئین) گردد و در نتیجه ظرفیت انتقال الکترون آن‌ها را کاهش دهد. همچنین، تحت شرایط اسیدی، ساختار پروتئین تمایل به حالت فشرده‌تر و تا خورده‌تری دارد که دسترسی به باقی‌مانده‌های اسید آمینه فعال آنتی‌اکسیدانی را محدود می‌سازد. با افزایش pH به سمت شرایط خنثی و قلیایی (۶ تا ۸)، دی‌پروتونه شدن گروه‌های هیدروکسیل فنولی و گروه‌های تیول رخ می‌دهد که این گروه‌ها به‌عنوان اهداکنندگان قوی الکترون عمل می‌کنند. علاوه بر این، در pH بالاتر، با تغییر آرایش فضایی پروتئین‌های هیدرولیز شده، باقی‌مانده‌های اسید آمینه آروماتیک و آبگریز بیشتری در معرض محیط قرار می‌گیرند. این باقی‌مانده‌ها، به‌ویژه تیروزین، تریپتوفان و سیستئین، به‌دلیل داشتن حلقه‌های آروماتیک غنی از الکترون، قابلیت بالایی در احیای یون‌های فریک و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد دارند (Mardani et al., 2023). بنابراین، افزایش مشاهده شده در قدرت احیاکنندگی آهن با افزایش pH، نتیجه‌ای از اثرات ترکیبی بهبود دسترسی به گروه‌های اهداکننده الکترون، بازشدگی ساختاری و افزایش ظرفیت انتقال الکترون در شرایط قلیایی می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده و گزارش‌های علمی موجود، هیدرولیزات حاصل از آنزیم آلکالاز عموماً قدرت احیاکنندگی آهن بالاتری نسبت به هیدرولیزات حاصل از تریپسین نشان می‌دهند. این تفاوت را می‌توان به ویژگی‌های زیرلایه‌ای متفاوت این دو آنزیم نسبت داد. آلکالاز، به‌عنوان یک آنزیم پروتئولیتیک با اختصاصیت بستر گسترده، تمایل بالایی به شکستن پیوندهای پپتیدی در مجاورت اسیدهای آمینه آبگریز مانند فنیل‌آلانین، تیروزین، تریپتوفان، لوسین و والین دارد. این اسیدهای آمینه، به‌دلیل داشتن حلقه‌های آروماتیک و زنجیره‌های جانبی آبگریز، نقش کلیدی در فرآیند احیای یون‌های فریک و انتقال الکترون ایفا می‌کنند. در مقابل، تریپسین به‌طور اختصاصی در سمت کربوکسیل باقی‌مانده‌های لیزین و آرژنین برش ایجاد می‌کند که این اسیدهای آمینه قلیایی، برخلاف اسیدهای آمینه آروماتیک، توانایی چندان در احیای یون‌های فلزی و اهدای الکترون ندارند (Habinshuti et al., 2023). همچنین، تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که پپتیدهای با وزن مولکولی بالاتر قدرت احیاکنندگی آهن

بالاتری از خود نشان می‌دهند، در حالی که پپتیدهای با وزن مولکولی پایین عمدتاً ظرفیت کلات‌کنندگی فلزات بالاتری دارند. هیدرولیز با آلکالاز پپتیدهای کوتاه‌تری تولید می‌کند که انتهای کربوکسیل و آمینوی آزاد بیشتری دارند و گروه‌های عاملی اهداکننده الکترون (مانند $-COOH$ و $-NH_2$) را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، افزایش pH به سمت مقادیر قلیایی، ضمن دی‌پروتونه کردن این گروه‌های عاملی، باعث بازشدگی ساختاری پپتیدها شده و باقی‌مانده‌های اسید آمینه آروماتیک و آبگریز را در معرض محیط قرار می‌دهد. هنگامی که هیدرولیز توسط آلکالاز انجام می‌شود، پپتیدهای حاصل به‌طور طبیعی غنی از اسیدهای آمینه آبگریز و آروماتیک هستند. بنابراین، در pH قلیایی، این پپتیدها نه تنها از نظر ترکیب آمینواسیدی مستعد احیای یون‌های فریک هستند، بلکه ساختار باز شده آن‌ها دسترسی بی‌واسطه این گروه‌های فعال را به سوبسترای واکنش (یون‌های Fe^{3+}) فراهم می‌کند. در مقابل، در نمونه‌های هیدرولیز شده با تریپسین که ترکیب آمینواسیدی متفاوتی دارند (غنی از اسیدهای آمینه قلیایی لیزین و آرژنین)، افزایش pH تأثیر کمتری بر قدرت احیاکنندگی دارد زیرا این اسیدهای آمینه فاقد حلقه‌های آروماتیک غنی از الکترون هستند که برای احیای یون‌های فریک ضروری می‌باشند (Hwang et al., 2024b). نتایج مشابهی توسط آشالو و همکاران (Ashaolu et al., 2023) گزارش شد که نشان دادند شرایط pH می‌تواند از طریق تغییر در یونیزاسیون گروه‌های عاملی، حالیت و دسترسی گروه‌های فعال پپتیدها، فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین ریورو پینو (Rivero-Pino, 2023) بیان کرد که پاسخ پپتیدهای زیست‌فعال به تغییرات pH به منبع پروتئین، ویژگی‌های ساختاری پپتیدها و شرایط فرآوری وابسته است؛ از این‌رو، اگرچه بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی در pH‌های خنثی یا کمی قلیایی در برخی هیدرولیزات‌ها مشاهده شده است، این رفتار را نمی‌توان به تمامی پپتیدهای حاصل از منابع غذایی یا آنزیم‌های پروتئولیتیک تعمیم داد.

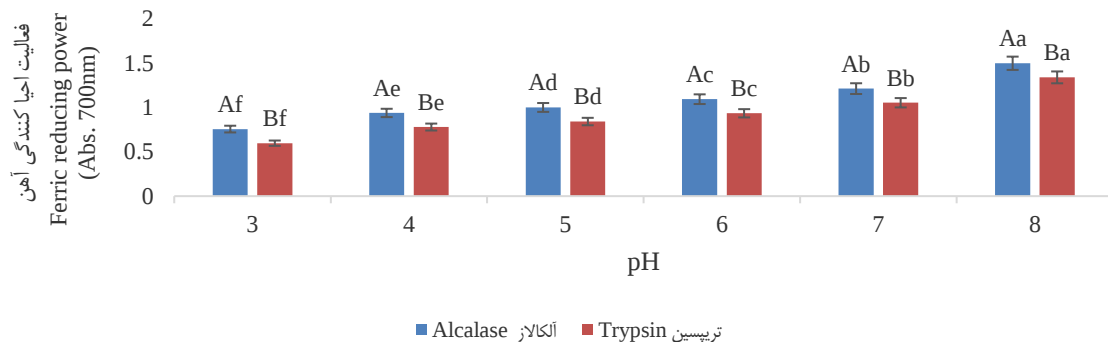
پایداری پروتئین هیدرولیز شده در دمای ۹۵ درجه

سانتی‌گراد

آنتی‌اکسیدانی کل

در این مطالعه، پایداری حرارتی هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون حاصل از دو آنزیم آلکالاز و تریپسین در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد و در بازه‌های زمانی ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۹). نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان حرارت‌دهی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل هر دو هیدرولیزات به‌طور تدریجی کاهش یافت. این یافته با گزارش‌های پیشین مبنی بر کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی پروتئین‌های هیدرولیز شده در اثر حرارت‌دهی

پروتئین عدس به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و همزمان، فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز کاهش چشمگیری نشان داد. در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه، به ترتیب ۲۷/۲ و ۲۹/۲ درصد کاهش در فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه مشاهده شد (Alizadeh Firozeh *et al.*, 2021). در مطالعه حاضر، دمای بالاتر (۹۵ درجه سانتی‌گراد) و زمان‌های طولانی‌تر (تا ۷۵ دقیقه) احتمالاً سبب تخریب گسترده‌تری در گروه‌های عاملی مسئول فعالیت آنتی‌اکسیدانی گردیده است.



شکل ۸- قدرت احیاکنندگی آهن پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در محدوده pH ۳ تا ۸
*حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

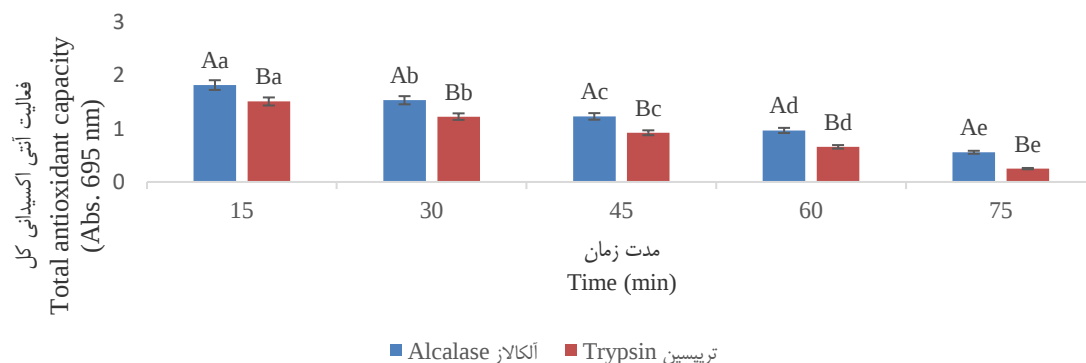
Fig. 8. Ferric reducing power of hydrolyzed olive seeds protein in the pH range of 3 to 8
*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

شکستن پیوندهای پپتیدی در مجاورت اسیدهای آمینه آبگریز (مانند فیل‌آلانین، تیروزین، تریپتوفان، لوسین و والین) دارد. این اسیدهای آمینه به‌دلیل داشتن حلقه‌های آروماتیک و زنجیره‌های جانبی آبگریز، نقش کلیدی در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد ایفا می‌کنند. در مقابل، تریپسین به‌طور اختصاصی در سمت کربوکسیل باقی‌مانده‌های لیزین و آرژنین برش ایجاد می‌کند که این اسیدهای آمینه قلیایی، توانایی کمتری در فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارند. از این رو، هیدرولیزات آلکالاز به دلیل ترکیب آمینواسیدی غنی از اسیدهای آمینه آروماتیک و آبگریز، حتی پس از حرارت‌دهی طولانی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی مطلوب‌تری را حفظ می‌کند. کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی با افزایش زمان حرارت‌دهی، الگویی وابسته به زمان را نشان داد. این یافته با گزارش علیزاده فیروزه و همکاران (Alizadeh Firozeh *et al.*, 2021) که نشان دادند با افزایش زمان حرارت‌دهی از ۱۵ به ۶۰ دقیقه، کاهش معنی‌دارتری در فعالیت آنتی‌اکسیدانی رخ می‌دهد، همخوانی کامل دارد. در مطالعه حاضر، دمای بالاتر (۹۵ درجه سانتی‌گراد) احتمالاً سینتیک تخریب را تسریع کرده است. در این دما، علاوه بر تخریب گروه‌های عاملی، امکان دناوره شدن و تجمع پپتیدها نیز افزایش می‌یابد که خود می‌تواند دسترسی به مکان‌های فعال آنتی‌اکسیدانی را محدود سازد.

طولانی‌مدت همسو می‌باشد (Rivero-Pino, 2023). کاهش وابسته به زمان فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر حرارت را می‌توان به چندین عامل نسبت داد. نخست، حرارت‌دهی طولانی‌مدت باعث کاهش محتوای گروه‌های آمینی آزاد در هیدرولیزات‌های پروتئینی می‌شود. علیزاده فیروزه و همکاران (Alizadeh Firozeh, Mirzaei, & Fadaei Noghani, 2021) گزارش کردند که با افزایش زمان حرارت‌دهی تا ۶۰ دقیقه، میزان گروه‌های آمینی آزاد در هیدرولیزات

دوم، حرارت‌دهی طولانی‌مدت می‌تواند باعث کاهش اسیدهای آمینه حاوی گوگرد (به‌ویژه سیستئین) در ترکیب هیدرولیزات شود. تحقیقات نشان داده است که پردازش حرارتی پروتئین‌ها می‌تواند میزان سیستئین را در هیدرولیزات‌های آنزیمی کاهش دهد و این کاهش با کاهش قدرت احیاکنندگی آهن و فعالیت خنثی‌سازی رادیکال سوپراکسید همبستگی مثبت دارد. سیستئین به‌دلیل داشتن گروه تیول آزاد ($-SH$)، نقشی کلیدی در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و اهدای الکترون ایفا می‌کند و تخریب آن در اثر حرارت، مستقیماً به کاهش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی منجر می‌شود (Mardani *et al.*, 2023).

در مطالعه حاضر، کاهش مداوم فعالیت آنتی‌اکسیدانی از ۱۵ تا ۷۵ دقیقه حاکی از آن است که تخریب حرارتی از همان ابتدا بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی غلبه داشته است. نتایج نشان داد که هیدرولیزات حاصل از آنزیم آلکالاز در تمام زمان‌های حرارت‌دهی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به هیدرولیزات حاصل از تریپسین داشت. این یافته با گزارش لین و همکاران (Lin, Liu, Liu, Kortensniemi, & Liu, 2022) همسو است که نشان دادند هیدرولیزات آب پنیر حاصل از آلکالاز در مقایسه با تریپسین، پپسین و فلورزایم، بالاترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی را در سه روش مختلف سنجش دارا بود. برتری آلکالاز به ویژگی بستر گسترده آن نسبت داده می‌شود؛ آلکالاز تمایلی بالایی به



شکل ۹- فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد طی مدت زمان ۱۵ تا ۷۵ دقیقه
*حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

Fig. 9. Total antioxidant capacity of olive seeds protein hydrolysate at 95°C for 15 to 75 minutes

*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

به هیدرولیزات حاصل از تریپسین داشت. این اسیدهای آمینه، به‌ویژه تیروزین و تریپتوفان، به‌دلیل داشتن حلقه‌های آروماتیک غنی از الکترون، نقش کلیدی در احیای یون‌های فریک و اهدای الکترون ایفا می‌کنند (Mardani et al., 2023). هیدرولیزات حاصل از آلکالاز به‌دلیل غنای بالای این اسیدهای آمینه، حتی در شرایط حرارتی شدید، جمعیت بیشتری از گروه‌های اهداکننده الکترون را حفظ می‌کند (Habinshtuti et al., 2023). در مقابل، تریپسین که به‌طور اختصاصی در سمت کربوکسیل باقی‌مانده‌های لیزین و آرژنین برش ایجاد می‌کند، پپتیدهایی با ترکیب آمینواسیدی متفاوت (غنی از اسیدهای آمینه قلیایی) تولید می‌کند که توانایی کمتری در احیای یون‌های فلزی و اهدای الکترون دارند. کاهش قدرت احیاکنندگی آهن با افزایش زمان حرارت‌دهی از ۱۵ تا ۷۵ دقیقه، الگویی وابسته به زمان را نشان دادند. این یافته با گزارش علیزاده فیروزه و همکاران (Alizadeh Firozeh et al., 2021) بر روی هیدرولیزات پروتئین عدس همخوانی دارد که نشان دادند با افزایش زمان حرارت‌دهی، کاهش معنی‌داری در فعالیت آنتی‌اکسیدانی (از جمله قدرت احیاکنندگی) رخ می‌دهد (Alizadeh et al., 2021). در مطالعه حاضر، دمای بالاتر (۹۵ درجه سانتی‌گراد) و زمان‌های طولانی‌تر (تا ۷۵ دقیقه) احتمالاً سینتیک تخریب گروه‌های اهداکننده الکترون و تجمع پپتیدها را تسریع کرده است. آزمون قدرت احیاکنندگی آهن مستقیماً به گروه‌های اهداکننده الکترون (به‌ویژه گروه‌های فنولی و تیولی) وابسته است که در برابر حرارت بسیار حساس بوده و به سرعت اکسید می‌شوند (Rivero-Pino, 2023). در مقابل، آزمون فسفومولیدین بر پایه احیای یون‌های مولیدین استوار است و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی با مکانیسم‌های مختلف (مانند خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد) نیز در آن مشارکت دارند که ممکن

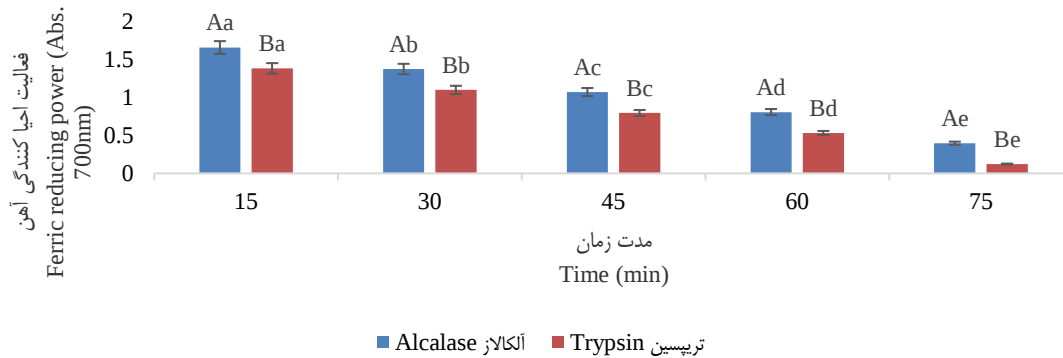
احیاکنندگی آهن

در این مطالعه، پایداری حرارتی بر مبنای قدرت احیاکنندگی آهن هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون حاصل از دو آنزیم آلکالاز و تریپسین در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد و در بازه‌های زمانی ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان حرارت‌دهی، قدرت احیاکنندگی آهن هر دو هیدرولیزات به‌طور تدریجی و وابسته به زمان کاهش یافت. این یافته با گزارش‌های پیشین مبنی بر کاهش قدرت احیاکنندگی آهن پروتئین‌های هیدرولیز شده در اثر حرارت‌دهی طولانی‌مدت همسو می‌باشد (Alizadeh Firozeh et al., 2021). حرارت‌دهی طولانی‌مدت در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند از چند طریق باعث کاهش قدرت احیاکنندگی آهن شود. نخست، حرارت بالا می‌تواند باعث اکسیداسیون گروه‌های تیول (SH-) در باقی‌مانده‌های سیستمین و همچنین اکسیداسیون حلقه‌های آروماتیک در اسیدهای آمینه تیروزین و تریپتوفان گردد. این گروه‌های عاملی به‌عنوان اهداکنندگان اصلی الکترون در واکنش احیاکنندگی آهن شناخته می‌شوند و تخریب آن‌ها مستقیماً به کاهش ظرفیت احیاکنندگی منجر می‌شود (Mardani et al., 2023; Liu et al., 2023). دوم، حرارت‌دهی طولانی‌مدت می‌تواند باعث ایجاد تجمعات پروتئینی از طریق برهمکنش‌های هیدروفوبیک و تشکیل پیوندهای دی‌سولفیدی جدید شود. این تجمعات، دسترسی به مکان‌های فعال آنتی‌اکسیدانی را محدود کرده و کارایی انتقال الکترون را کاهش می‌دهد (Habinshtuti et al., 2023; Rivero-Pino, 2023).

نتایج این مطالعه نشان داد که هیدرولیزات حاصل از آنزیم آلکالاز در تمام زمان‌های حرارت‌دهی، قدرت احیاکنندگی آهن بالاتری نسبت

احیاکنندگی آهن هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد دچار کاهش وابسته به زمان می‌شود، اما هیدرولیزات حاصل از آلكالاز در مقایسه با تریپسین از پایداری حرارتی بهتری برخوردار است.

است در برابر حرارت مقاومت بیشتری نشان دهند (Liu et al., 2023). این مشاهدات تأکید می‌کند که ارزیابی پایداری حرارتی آنتی‌اکسیدان‌ها با استفاده از چندین روش سنجش با مکانیسم‌های مختلف ضروری است و نمی‌توان صرفاً بر اساس یک روش به نتیجه‌گیری کلی دست یافت. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه قدرت



شکل ۱۰- قدرت احیاکنندگی آهن پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد طی مدت زمان ۱۵ تا ۷۵ دقیقه *حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

Fig. 10. Ferric reducing power of olive seeds protein hydrolysate at 95°C for 15 to 75 minutes

*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

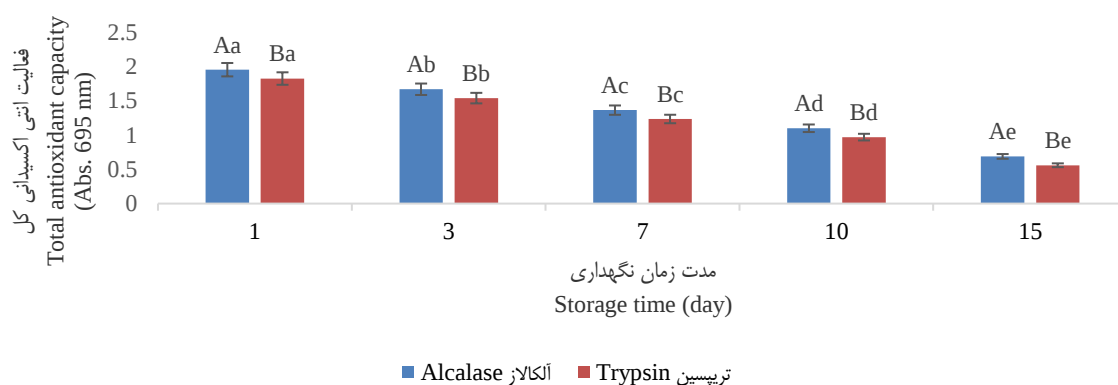
تجمعات پروتئینی طی نگهداری رخ می‌دهد. در طول نگهداری، پپتیدها می‌توانند از طریق برهمکنش‌های هیدروفوبیک و تشکیل پیوندهای دی‌سولفیدی جدید به یکدیگر متصل شده و تجمعات بزرگ‌تری تشکیل دهند (Liu et al., 2023; Mardani et al., 2023). این تجمعات، دسترسی به مکان‌های فعال آنتی‌اکسیدانی را محدود کرده و کارایی خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد را کاهش می‌دهد. در نهایت، تخریب میکروبی اگرچه در دمای یخچال به‌طور قابل توجهی مهار می‌شود، اما در صورت عدم رعایت شرایط کاملاً استریل، رشد میکروارگانیسم‌های سایکروفیل می‌تواند به تخریب آنزیمی پپتیدها و کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی منجر گردد. نتایج این مطالعه نشان داد که هیدرولیزات حاصل از آنزیم آلكالاز در تمام روزهای نگهداری، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به هیدرولیزات حاصل از تریپسین داشت و همچنین کاهش فعالیت آن در طول زمان با شیب ملایم‌تری همراه بود. این برتری را می‌توان به ویژگی‌های ساختاری پپتیدهای تولید شده توسط هر آنزیم نسبت داد. آنزیم آلكالاز به‌دلیل ویژگی بستر گسترده، تمایل بالایی به شکستن پیوندهای پپتیدی در مجاورت اسیدهای آمینه آبگریز مانند فنیل‌آلانین، تیروزین، تریپتوفان، لوسین و والین دارد (Lin et al., 2022). در نتیجه، هیدرولیزات حاصل از آلكالاز غنی از پپتیدهای کوتاه با انتهای آبگریز است که این پپتیدها به‌طور طبیعی فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری دارند و همچنین به‌دلیل ساختار فشرده‌تر، در

پایداری پروتئین هیدرولیز شده در دمای یخچال آنتی‌اکسیدانی کل

در این مطالعه، پایداری فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون حاصل از دو آنزیم آلكالاز و تریپسین طی ۱۵ روز نگهداری در دمای یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد) در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ روز مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱۱). نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان نگهداری در یخچال، فعالیت آنتی‌اکسیدانی هر دو هیدرولیزات به‌طور تدریجی و وابسته به زمان کاهش یافت. این یافته با گزارش‌های پیشین مبنی بر کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌های پروتئینی طی نگهداری در دمای یخچال همسو می‌باشد (Rivero-Pino, 2023; Habinshuti et al., 2023). کاهش تدریجی فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌های پروتئینی طی نگهداری در دمای یخچال را می‌توان به چندین مکانیسم اصلی نسبت داد. نخست، اکسیداسیون خود به خودی اسیدهای آمینه حساس به اکسیداسیون رخ می‌دهد. اسیدهای آمینه آروماتیک (تیروزین، تریپتوفان، فنیل‌آلانین) و اسیدهای آمینه حاوی گوگرد (سیستئین، متیونین) به‌دلیل داشتن گروه‌های عاملی مستعد اکسیداسیون، در طول نگهداری طولانی‌مدت حتی در دمای یخچال دچار تخریب اکسیداتیو می‌شوند (Habinshuti et al., 2023). این تخریب باعث کاهش تعداد مکان‌های فعال آنتی‌اکسیدانی در ساختار پپتیدها می‌گردد. دوم، تشکیل

عوامل اصلی کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در طول نگهداری هستند. بر اساس این نتایج، برای نگهداری طولانی‌تر (بیش از ۱۵ روز)، ممکن است نیاز به استفاده از روش‌های نگهداری تکمیلی (مانند بسته‌بندی تحت خلأ، افزودن آنتی‌اکسیدان‌های ثانویه، یا خشک‌کردن) باشد. علاوه بر این، توصیه می‌شود که هیدرولیزات‌های پروتئینی در دمای یخچال و در بسته‌بندی‌های مقاوم در برابر نفوذ اکسیژن نگهداری شوند تا از کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در طول زمان جلوگیری گردد (Rivero-Pino, 2023; Habinshuti *et al.*, 2023).

برابر اکسیداسیون طی نگهداری مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. در مقابل، تریپسین که به‌طور اختصاصی در سمت کربوکسیل باقی‌مانده‌های لیزین و آرژنین برش ایجاد می‌کند، پپتیدهایی با ترکیب آمینواسیدی متفاوت (غنی از اسیدهای آمینه قلیایی) تولید می‌کند که فعالیت آنتی‌اکسیدانی ذاتی کمتری دارند و همچنین در طول نگهداری، به‌دلیل ماهیت آبدوست بیشتر، احتمال تخریب در آن‌ها بیشتر است (Mardani *et al.*, 2023; Rivero-Pino, 2023). که تخریب اکسیداتیو اسیدهای آمینه آروماتیک و تشکیل تجمعات پروتئینی از



شکل ۱۱- فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در دمای یخچال طی مدت ۱۵ روز نگهداری

*حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

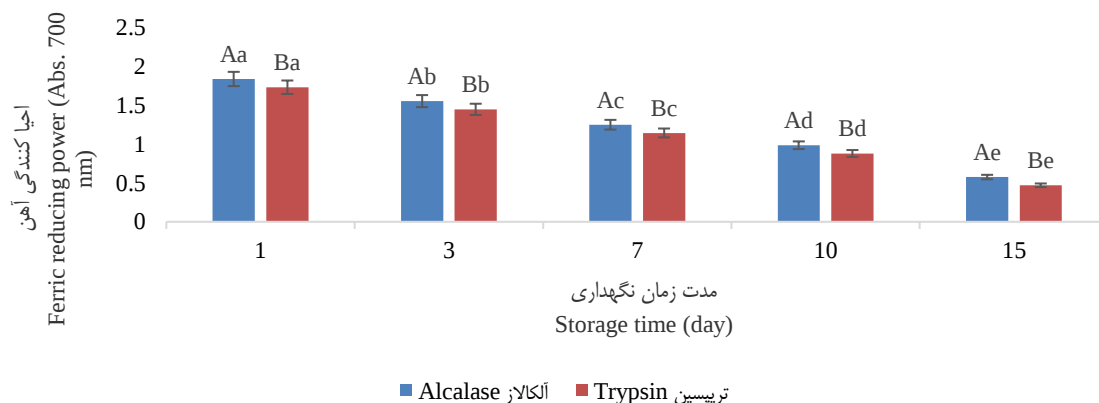
Fig. 11. Total antioxidant capacity of olive seeds protein hydrolysates during 15 days of storage at refrigerated temperature (4°C)

*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

را حفظ می‌کنند. در مقابل، هیدرولیزات تریپسین که عمدتاً حاوی پپتیدهای غنی از لیزین و آرژنین است، توانایی ذاتی کمتری در احیای یون‌های فلزی داشته و در طول نگهداری سریع‌تر دچار افت فعالیت می‌شود (Lin *et al.*, 2022). در پژوهشی، پروتئین ایزوله سویا با پنج آنزیم مختلف شامل آلکالاز، تریپسین، پاپائین، بروملین و پپسین هیدرولیز شد و ویژگی‌های ساختاری و زیست‌فعالیت هیدرولیزات‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد هیدرولیزات حاصل از آلکالاز بیشترین مقدار اسیدهای آمینه آبریز و آروماتیک را دارا بود و بالاترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ظرفیت کلات‌کنندگی فلز و فعالیت ضدیابنی را نشان داد. همچنین هیدرولیز آنزیمی موجب باز شدن ساختار پروتئین و کاهش اندازه ذرات شد که دسترسی به پپتیدهای زیست‌فعال را افزایش داد. پژوهشگران نتیجه گرفتند که نوع آنزیم نقش تعیین‌کننده‌ای در ویژگی‌های ساختاری و عملکردی هیدرولیزات‌های پروتئینی دارد (Xu *et al.*, 2023).

احیاکنندگی آهن

نتایج ارزیابی قدرت احیاکنندگی آهن هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون طی ۱۵ روز نگهداری در دمای یخچال (4°C) درجه سانتی‌گراد نشان داد که با افزایش زمان نگهداری، ظرفیت احیای یون‌های فریک (Fe^{3+}) به فرو (Fe^{2+}) در هر دو هیدرولیزات حاصل از آلکالاز و تریپسین به‌طور تدریجی کاهش یافت (شکل ۱۲). مکانیسم اصلی این افت، اکسیداسیون تدریجی گروه‌های تیول (SH-) باقی‌مانده‌های سیستئین و حلقه‌های آروماتیک تیروزین و تریپتوفان در طول نگهداری است؛ زیرا این گروه‌ها مسئول اصلی اهدای الکترون در واکنش احیاکنندگی آهن می‌باشند. در مقایسه دو آنزیم، هیدرولیزات حاصل از آلکالاز در تمام روزهای نگهداری قدرت احیاکنندگی بالاتری نسبت به تریپسین داشت. این برتری به‌دلیل تولید پپتیدهای غنی از اسیدهای آمینه آبریز و آروماتیک توسط آلکالاز است که حتی پس از ذخیره‌سازی طولانی، جمعیت بیشتری از گروه‌های اهداکننده الکترون



شکل ۱۲- قدرت احیاکنندگی آهن پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در دمای یخچال طی مدت ۱۵ روز نگهداری

*حروف غیر مشابه نشان دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

Fig. 12. Ferric reducing power of olive seeds protein hydrolysate during 15 days of storage at refrigerated temperature (4°C)

*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

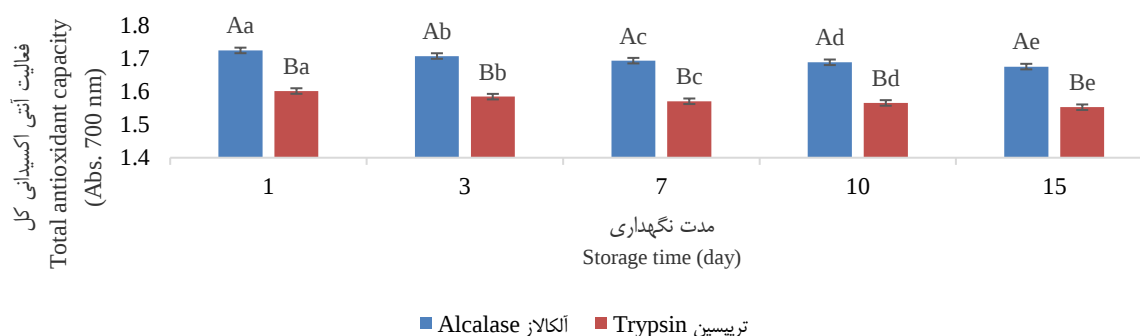
تخریب عمدتاً ناشی از اکسیداسیون خود به خودی و آهسته است، در سیکل‌های انجماد-رفع انجماد، تخریب به صورت جهشی و با هر بار تکرار سیکل رخ می‌دهد. در مقایسه دو آنزیم، هیدرولیزات حاصل از آلکالاز در تمام روزهای نگهداری، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به تریپسین داشت و کاهش آن با شیب ملایم‌تری همراه بود. این برتری را می‌توان به تولید پپتیدهای کوتاه‌تر و غنی از اسیدهای آمینه آبگریز توسط آلکالاز نسبت داد که به دلیل ساختار فشرده‌تر و وزن مولکولی پایین‌تر، در برابر استرس ناشی از انجماد و رفع انجماد مقاومت بیشتری نشان می‌دهند (Jogi, Mathew, & Mamatha, 2024). علاوه بر این، پپتیدهای حاصل از آلکالاز به دلیل ماهیت آمفی‌فیلیک (داشتن نواحی آبگریز و آبدوست) می‌توانند با سطح بلورهای یخ برهمکنش کرده و از رشد آن‌ها جلوگیری کنند (Chen, Wu, Cai, & Wang, 2021). به عبارت دیگر، این پروتئین‌های هیدرولیز شده با دارا بودن هم‌زمان نواحی آبدوست و آب‌گریز، می‌توانند بر سطح بلورهای یخ جذب شوند و با اشغال جایگاه‌های رشد بلور، از الحاق مولکول‌های بیشتر آب و نو بلوری شدن یخ جلوگیری کنند. در نتیجه، اندازه بلورهای یخ در طی چرخه‌های انجماد-ذوب محدود شده و تغییرات ساختاری و کاهش فعالیت زیستی پروتئین‌های هیدرولیز شده به حداقل می‌رسد (Davies et al., 2014).

پایداری پروتئین هیدرولیز شده در اثر انجماد و رفع

انجماد

آنتی‌اکسیدانی کل

نتایج ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون طی ۱۵ روز نگهداری در شرایط انجماد (با سیکل‌های انجماد و رفع انجماد) نشان داد فعالیت آنتی‌اکسیدانی هر دو هیدرولیزات حاصل از آلکالاز و تریپسین به طور تدریجی کاهش یافت (شکل ۱۳). این پدیده عمدتاً ناشی از آسیب‌های مکانیکی و اکسیداتیو ناشی از تشکیل و رشد بلورهای یخ در طی انجماد است که به ساختار پپتیدها آسیب رسانده و گروه‌های عاملی مسئول فعالیت آنتی‌اکسیدانی را تخریب می‌کند (Yu et al., 2023). در طی انجماد، آب موجود در نمونه به بلورهای یخ تبدیل می‌شود و این بلورها با ایجاد تنش مکانیکی و برش در سطح مشترک یخ-آب، باعث بازشدگی ساختاری و دنا توره شدن پپتیدها می‌گردند. در مرحله ذوب، بلورهای یخ ذوب شده و حفره‌هایی ایجاد می‌کنند که زمینه را برای واکنش‌های اکسیداتیو و تجمع مولکول‌های پپتیدی فراهم می‌سازد (Bao, Ertbjerg, Estévez, Yuan, & Gao, 2021). بر خلاف فرآیندهای حرارتی که عمدتاً تخریب شیمیایی مستقیم گروه‌های عاملی را به دنبال دارند، در انجماد، تخریب عمدتاً ناشی از استرس اکسیداتیو ناشی از غلیظشدگی مواد اکسیدان در فاز مایع باقیمانده و آسیب فیزیکی ناشی از رشد بلورهای یخ است. از سوی دیگر، بر خلاف نگهداری در یخچال که



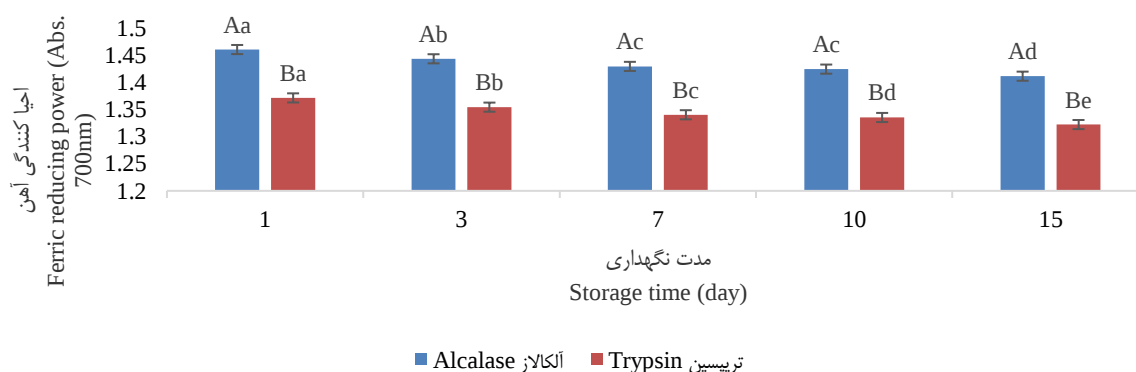
شکل ۱۳- فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در اثر انجماد و رفع انجماد طی مدت ۱۵ روز نگهداری
*حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح ($P > 0.05$) است.

Fig. 13. Total antioxidant capacity of olive seeds protein hydrolysate during 15 days of storage under freeze-thaw cycles
*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

تنش مکانیکی ناشی از رشد بلورهای یخ منجر به بازشدگی ساختار پپتیدها و در معرض قرار گرفتن گروه‌های حساس می‌گردد که در مرحله ذوب، این گروه‌ها به سرعت اکسید شده و قابلیت اهدای الکترون خود را از دست می‌دهند. نکته حائز اهمیت آنکه قدرت احیاکنندگی آهن در مقایسه با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل، حساسیت بیشتری به سیکل‌های انجماد نشان داد، زیرا گروه‌های تیول و فنول (که نقش اصلی را در قدرت احیاکنندگی آهن ایفا می‌کنند) نسبت به استرس اکسیداتیو ناشی از افزایش غلظت مواد اکسیدان در فاز مایع آسیب‌پذیرتر هستند. در مقایسه دو آنزیم، هیدرولیزات حاصل از آلکالاز به دلیل تولید پپتیدهای کوتاه‌تر و غنی از اسیدهای آمینه آبگریز (مانند تیروزین و تریپتوفان) که گروه‌های اهداکننده الکترون پایدارتری دارند، کاهش قدرت احیاکنندگی آهن کمتری نسبت به تریپسین نشان داد (Hwang et al., 2024a).

احیاکنندگی آهن

ارزیابی قدرت احیاکنندگی آهن هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون طی ۱۵ روز نگهداری در شرایط انجماد و رفع انجماد نشان داد که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-آب‌شدگی، ظرفیت احیای یون‌های فریک (Fe^{3+}) به فرو (Fe^{2+}) در هر دو نمونه حاصل از آلکالاز و تریپسین کاهش یافت. مکانیسم اصلی این کاهش، متفاوت از تخریب حرارتی یا اکسیداسیون خودبه‌خودی در یخچال است (شکل ۱۴). در طی انجماد، تشکیل بلورهای یخ باعث افزایش غلظت موضعی گونه‌های واکنش‌دهنده (مانند اکسیژن محلول و یون‌های فلزی) در فاز مایع باقیمانده می‌شود که اکسیداسیون گروه‌های تیول ($SH-$) و حلقه‌های آروماتیک را تسریع می‌کند (Bao et al., 2021). همچنین،



شکل ۱۴- قدرت احیاکنندگی آهن پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در اثر انجماد و رفع انجماد طی مدت ۱۵ روز نگهداری
*حروف غیر مشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

Fig. 14. Ferric reducing power of olive seeds protein hydrolysate during 15 days of storage under freeze-thaw cycles
*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

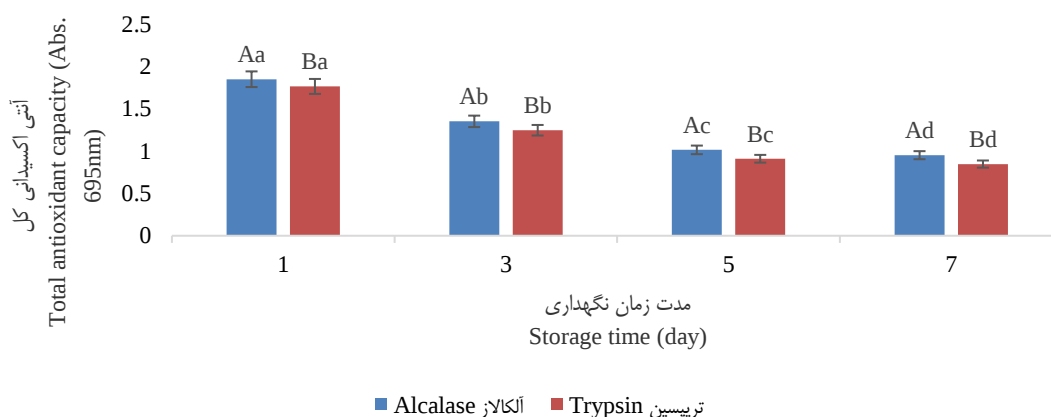
پایداری پروتئین هیدرولیز شده در دمای محیط آنتی اکسیدانی کل

نتایج ارزیابی فعالیت آنتی اکسیدانی کل هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون طی ۷ روز نگهداری در دمای محیط نشان داد که با افزایش زمان نگهداری، فعالیت آنتی اکسیدانی هر دو هیدرولیزات حاصل از آنزیم‌های آلكالاز و تریپسین به تدریج کاهش یافت (شکل ۱۵). این روند را می‌توان به افزایش سرعت واکنش‌های اکسیداسیون در دمای محیط نسبت داد؛ به گونه‌ای که افزایش انرژی جنبشی مولکول‌ها، احتمال برخورد گونه‌های فعال اکسیژن با گروه‌های عاملی حساس موجود در پپتیدها، از جمله گروه‌های تیول و باقی‌مانده‌های اسیدهای آمینه آروماتیک، را افزایش داده و در نتیجه ظرفیت انتقال الکترون و فعالیت آنتی اکسیدانی آن‌ها کاهش می‌یابد. (Bao et al., 2021) در مقایسه با نگهداری در دمای یخچال، که سرعت واکنش‌های اکسیداسیون کاهش می‌یابد، نگهداری در دمای محیط معمولاً افت سریع‌تر فعالیت آنتی اکسیدانی را به دنبال دارد؛ زیرا دمای بالاتر موجب تسریع اکسیداسیون پروتئین‌ها و تغییرات ساختاری پپتیدهای زیست‌فعال می‌شود (Pereira et al., 2022).

مطالعه پیرا و همکاران (Pereira et al., 2022) بر روی هیدرولیزات پروتئینی حاصل از ضایعات میگوی فراوری شده نیز نشان داد که شرایط نگهداری بر پایداری ترکیبات زیست‌فعال و فعالیت آنتی اکسیدانی هیدرولیزات‌ها تأثیر معنی‌داری دارد و کنترل دما نقش

مهمی در حفظ کیفیت آن‌ها ایفا می‌کند (Pereira et al., 2022). همچنین کلیکایای و همکاران (Kleekayai et al., 2022) گزارش کردند که ویژگی‌های ساختاری هیدرولیزات‌های پروتئینی و ظرفیت آنتی اکسیدانی آن‌ها به شرایط فراوری و نگهداری وابسته بوده و در اثر اکسیداسیون تدریجی، فعالیت آنتی اکسیدانی کاهش می‌یابد.

در مقایسه دو آنزیم، هیدرولیزات حاصل از آلكالاز در تمام روزهای نگهداری فعالیت آنتی اکسیدانی بالاتری نسبت به هیدرولیزات حاصل از تریپسین نشان داد. این برتری را می‌توان به تفاوت در اختصاصیت آنزیمی و پروفایل پپتیدی حاصل از هیدرولیز نسبت داد. آلكالاز به دلیل اختصاصیت بستر گسترده، پپتیدهای غنی‌تری از اسیدهای آمینه آبگریز و آروماتیک تولید می‌کند که معمولاً توانایی بیشتری در انتقال الکترون و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن دارند؛ در نتیجه، فعالیت آنتی اکسیدانی اولیه و پایداری نسبی آن‌ها طی دوره نگهداری بیشتر است (Islam et al., 2022). پرادوس و همکاران (Prados et al., 2020) پپتیدهای زیست‌فعال حاصل از هیدرولیز پروتئین هسته زیتون را شناسایی و ارتباط آن‌ها را با اثرات کاهنده چربی خون بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از طیف‌سنجی جرمی، چندین پپتید با فعالیت زیستی بالا را شناسایی کردند که در مهار متابولیسم کلسترول نقش داشتند. نتایج نشان داد هسته زیتون منبع ارزشمندی برای تولید پپتیدهای آنتی اکسیدانی است. پژوهشگران بیان کردند که انتخاب آنزیم مناسب نقش کلیدی در تولید پپتیدهای هدفمند دارد.



شکل ۱۵- فعالیت آنتی اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در دمای محیط طی مدت ۷ روز نگهداری

*حروف غیر مشابه نشان دهنده وجود اختلاف در سطح (P < 0.05) است.

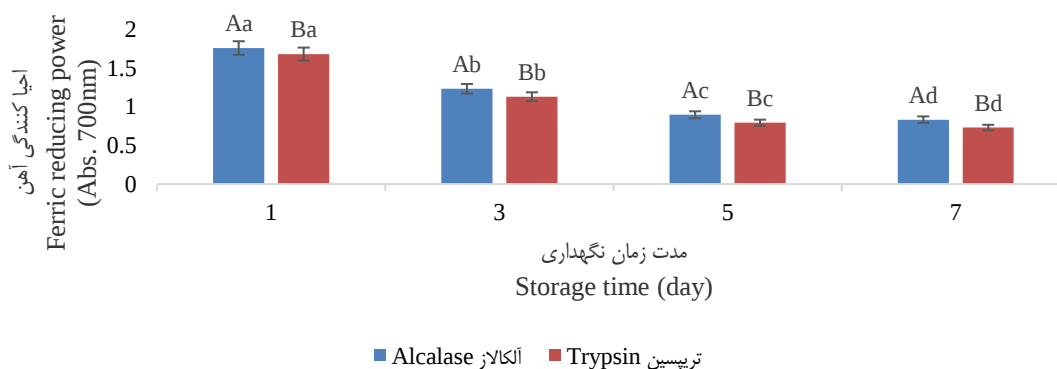
Fig. 15. Total antioxidant capacity of olive seeds protein hydrolysate during 7 days of storage at ambient temperature (25°C)

*Different letters indicate differences at the level (P>0.05).

احیا کنندگی آهن

ارزیابی قدرت احیا کنندگی آهن هیدرولیزات‌های پروتئین هسته زیتون طی ۷ روز نگهداری در دمای محیط نشان داد که ظرفیت احیای یون‌های فریک (Fe^{3+}) به فرو (Fe^{2+}) در هر دو هیدرولیزات حاصل از آلکالاز و تریپسین با افزایش زمان نگهداری کاهش یافت. در دمای محیط (۲۵-۲۷ درجه سانتی‌گراد)، تخریب عمدتاً از نوع اکسیداسیون تدریجی گروه‌های عاملی و تشکیل رادیکال‌های آزاد در اثر تماس با اکسیژن محیط است که سرعت آن در مقایسه با دمای یخچال بیشتر و در مقایسه با حرارت (۹۵ درجه سانتی‌گراد) کمتر می‌باشد (Habinshtuti et al., 2023). محصولاتی که در دمای محیط نگهداری می‌شوند، نیازمند محافظت بیشتری در برابر اکسیداسیون هستند. در مقایسه دو آنزیم، هیدرولیزات حاصل از آلکالاز در تمام روزهای نگهداری، قدرت احیا کنندگی بالاتری نسبت به تریپسین داشت که به دلیل تولید پپتیدهای غنی از اسیدهای آمینه آبریز و آروماتیک توسط آلکالاز است (Liu et al., 2023; Mardani et al., 2023). همچنین، تحقیقات نشان داده است که هیدرولیزات حاصل از آلکالاز

به دلیل تنوع بیشتر پپتیدی و ساختار فشرده‌تر، در برابر اکسیداسیون ناشی از دمای محیط مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که نگهداری طولانی‌مدت در دمای اتاق می‌تواند فعالیت آنتی‌اکسیدانی پپتیدها را کاهش دهد. در مقایسه آنزیم‌های مختلف پروتئولیتیک، آلکالاز به عنوان آنزیمی کارآمد در تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدان شناخته شده است. در مطالعه‌ای بر فرآورده‌های فرعی گوشت خوک انجام شد، گزارش گردید آلکالاز کارایی هیدرولیز بالاتری نسبت به تریپسین داشته و هیدرولیزهای حاصل فعالیت مهار رادیکال‌های آزاد برتری نسبت به مواد اولیه خام نشان دادند (Hwang et al., 2024). استیو و همکاران (Esteve et al., 2015) پروتئین‌های حاصل از ضایعات زیتون را به وسیله هیدرولیز آنزیمی به پپتیدهای زیست‌فعال تبدیل کردند و فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که نوع آنزیم مورد استفاده تأثیر معنی‌داری بر ترکیب پپتیدی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات‌ها دارد. همچنین هیدرولیزات‌های تولیدشده پتانسیل مناسبی برای استفاده به عنوان ترکیبات عملکردی در صنایع غذایی داشتند.



شکل ۱۶- قدرت احیا کنندگی آهن پروتئین هیدرولیز شده هسته زیتون در دمای محیط طی مدت ۷ روز نگهداری

*حروف غیر مشابه نشان دهنده وجود اختلاف در سطح ($P < 0.05$) است.

Fig. 16. Ferric reducing power of olive seeds protein hydrolysate during 7 days of storage at ambient temperature (25°C)

*Different letters indicate differences at the level ($P > 0.05$).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، هیدرولیز آنزیمی پروتئین هسته زیتون با دو آنزیم آلکالاز و تریپسین با موفقیت بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی شرایط بهینه و درک اثرات متقابل زمان و نسبت آنزیم به سوبسترا است. هیدرولیزات حاصل از آلکالاز در تمام آزمون‌های آنتی‌اکسیدانی برتری معنی‌داری نسبت به تریپسین داشت که به ویژگی بستر گسترده آلکالاز و آزادسازی پپتیدهای غنی از اسیدهای آمینه آروماتیک و آبریز نسبت داده می‌شود.

ارزیابی پایداری نشان داد که فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیزات در شرایط مختلف (pH، حرارت، نگهداری در یخچال، انجماد-ذوب و دمای محیط) به طور تدریجی کاهش می‌یابد، اما هیدرولیز آلکالاز همواره پایداری بالاتری داشت. بیشترین پایداری در pH خنثی و کمترین در pH اسیدی شدید مشاهده شد. حرارت طولانی‌مدت (به ویژه بالای ۴۵ دقیقه) بیشترین تخریب را به همراه داشتند. به طور کلی، هسته زیتون منبعی ارزشمند برای تولید پپتیدهای آنتی‌اکسیدان است و هیدرولیز با آلکالاز در شرایط بهینه می‌تواند محصولی با فعالیت

هیدرولیزات‌ها در سامانه‌های غذایی و شرایط in vivo به مطالعات تکمیلی نیاز است.

منابع تأمین مالی

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

میزان مشارکت نویسندگان

رنجبر: تحقیق، بررسی و نگارش پیش نویس اصلی. **صادقی**

ماهونک: نظارت، مدیریت داده‌ها، اعتبارسنجی، ویرایش و بررسی

مقاله. **قربانی:** مشاور و ناظر پژوهش.

آنتی‌اکسیدانی بالا و پایداری مناسب برای کاربردهای صنعتی فراهم آورد. در مطالعات آینده، شناسایی و تعیین توالی پپتیدهای مسئول فعالیت آنتی‌اکسیدانی و بررسی رابطه ساختار-فعالیت آن‌ها می‌تواند به درک بهتر مکانیسم‌های عملکردی این ترکیبات کمک کند. همچنین، ارزیابی فراهمی زیستی و کارایی این پپتیدها در مدل‌های سلولی، حیوانی و سامانه‌های واقعی غذایی، گام مهمی در توسعه کاربردهای صنعتی و فراسودمند آن‌ها خواهد بود. همچنین از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به عدم شناسایی و تعیین توالی پپتیدهای زیست‌فعال با روش‌های پیشرفته‌ای مانند LC-MS/MS و محدود شدن ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی به آزمون‌های شیمیایی اشاره کرد. همچنین، نتایج در مقیاس آزمایشگاهی به‌دست آمده است و برای تأیید کارایی

References

1. Adjonu, R., Doran, G., Torley, P., & Agboola, S. (2023). Stability of whey protein bioactive peptide-stabilised nanoemulsions: effect of pH, ions, heating and freeze-thawing. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(4), 1234-1245. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16292>
2. Ahmadi, F., Kadivar, M., & Shahedi, M. (2007). Antioxidant activity of *Kelussia odoratissima* Mozaff. in model and food systems. *Food Chemistry*, 105(1), 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.056>
3. Alizadeh Firozeh, R., Mirzaei, M., & Fadaei Noghani, V. (2021). Antioxidant activity stability of lentil protein hydrolysate against heat and pH treatments. *Iranian Journal of Food Science and Technology Research*, 17(5), 849-861. <https://doi.org/10.22067/ijstrj.v18i1.87854>
4. AOAC. (1990). Official Methods of Analysis (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists.
5. Ashaolu, T.J., Le, T.D., & Suttikhana, I. (2023). Stability and bioactivity of peptides in food matrices based on processing conditions. *Food Research International*, 168, 112786. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112786>
6. Bao, Y., Erthjerg, P., Estévez, M., Yuan, L., & Gao, R. (2021). Freezing of meat and aquatic food: Underlying mechanisms and implications on protein oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5548-5569. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12841>
7. Bartolomei, M., Bollati, C., Bellumori, M., Cecchi, L., Mulinacci, N., Lammi, C., & Arnoldi, A. (2022). Exploitation of olive (*Olea europaea* L.) seed proteins as upgraded source of bioactive peptides with multifunctional properties: Focus on antioxidant and dipeptidyl-dipeptidase-IV inhibitory activities, and glucagon-like peptide 1 improved modulation. *Antioxidants*, 11(9), 1730. <https://doi.org/10.3390/antiox11091730>
8. Chen, X., Wu, J., Cai, X., & Wang, S. (2021). Production, structure-function relationships, mechanisms, and applications of antifreeze peptides. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 542-562. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12655>
9. Dahdouh, A., Khay, I., Le Brech, Y., El Maakoul, A., & Bakhouya, M. (2023). Olive oil industry: A review of waste stream composition, environmental impacts, and energy valorization paths. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 45473-45497. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25867-z>
10. Davies, P.L. (2014). Ice-binding proteins: a remarkable diversity of structures for stopping and starting ice growth. *Trends in Biochemical Sciences*, 39(11), 548-555. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2014.09.005>
11. Esteve, C., Marina, M.L., & García, M.C. (2015). Novel strategy for the revalorization of olive (*Olea europaea*) residues based on the extraction of bioactive peptides. *Food Chemistry*, 167, 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.090>
12. Farzanfar, F., Mahoonak, A.S., Ghorbani, M., Ghaboos, S.H.H., & Kaveh, S. (2025). Encapsulation of ultrasound-assisted flaxseed meal protein hydrolysate in nanoliposomal systems by new formulation: Physicochemical properties, release behavior under simulated gastrointestinal conditions. *Food Chemistry: X*, 27, 102389. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102389>
13. Fathi, M., Hosseini, F. S., Ramezani, R., & Rashidi, L. (2022). Optimized enzymatic hydrolysis of olive pomace proteins using response surface methodology. *Applied Food Biotechnology*, 9(2), 79-90. <https://doi.org/10.22037/afb.v9i2.36192>
14. Habinshuti, I., Nsengumuremyi, D., Muhoza, B., Ebenezer, F., Aregbe, A.Y., & Ndisanze, M.A. (2023). Recent and novel processing technologies coupled with enzymatic hydrolysis to enhance the production of antioxidant

- peptides from food proteins: A review. *Food Chemistry*, 423, 136313. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136313>
15. He, F. (2011). Bradford protein assay. *Bio-Protocol*, e45-e45. <https://doi.org/10.21769/bioprotoc.45>
16. Hernández-Corroto, E., Marina, M.L., & García, M.C. (2020). Identification of peptides potentially responsible for in vivo hypolipidemic activity of a hydrolysate from olive seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(14), 4237–4246. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01280>
17. Hwang, J., Lee, S., Kim, H., Park, J., Choi, Y., & Jung, S. (2024a). Comparative exploration of antioxidant properties of Alcalase- and trypsin-hydrolyzed porcine by-products and their classification for industrial use. *Applied Sciences*, 15(1), 47. <https://doi.org/10.3390/app15010047>
18. Hwang, J., Son, W.Y., Jeong, E.J., Kim, K.S., Shin, E.C., Song, D.H., & Kim, H.W. (2024b). Comparative exploration of antioxidant properties of Alcalase-and Trypsin-hydrolyzed porcine by-products and their classification for industrial Use. *Applied Sciences*, 15(1), 47. <https://doi.org/10.3390/app15010047>
19. Islam, M., Huang, Y., Islam, S., Fan, B., Tong, L., & Wang, F. (2022). Influence of the degree of hydrolysis on functional properties and antioxidant activity of enzymatic soybean protein hydrolysates. *Molecules*, 27(18), 6110. <https://doi.org/10.3390/molecules27186110>
20. Jogi, N., Mathew, A., & Mamatha, B.S. (2024). Modification of bioactive properties in food protein hydrolysates by alcalase and trypsin. *Journal of Health and Allied Sciences NU*, 14(S 01), S26-S34. <https://doi.org/10.1055/s-0044-1782643>
21. Kleekayai, T., O'Neill, A., Clarke, S., Holmes, N., O'Sullivan, B., & FitzGerald, R.J. (2022). Contribution of hydrolysis and drying conditions to whey protein hydrolysate characteristics and in vitro antioxidative properties. *Antioxidants*, 11(2), 399. <https://doi.org/10.3390/antiox11020399>
22. Li, Z., Paulson, A.T., & Gill, T.A. (2015). Encapsulation of bioactive salmon protein hydrolysates with chitosan-coated liposomes. *Journal of Functional Foods*, 19, 733-743. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.09.058>
23. Lin, Y., Liu, Y., Liu, S., Kortessniemi, M., & Liu, J. (2022). Optimization of enzymatic hydrolysis of Perilla meal protein for hydrolysate with high hydrolysis degree and antioxidant activity. *Molecules*, 27(3), 1079. <https://doi.org/10.3390/molecules27031079>
24. Liu, D., Guo, Y., & Ma, H. (2023). Production, bioactivities and bioavailability of bioactive peptides derived from walnut origin by-products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(26), 8032-8047. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2054933>
25. Maestri, D., Barrionuevo, D., Bodoira, R., Zafra, A., Jiménez-López, J., & Alché, J.D.D. (2019). Nutritional profile and nutraceutical components of olive (*Olea europaea* L.) seeds. *Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4359-4370. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03904-5>
26. Mardani, M., Badakné, K., Farmani, J., & Aluko, R.E. (2023). Antioxidant peptides: Overview of production, properties, and applications in food systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(1), 46-106. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13061>
27. Martinez, F.G., Ambrosi, V., Rocha, G., Sancho, A.M., & Szerman, N. (2023). Enzymatic hydrolysis as a valorization strategy of bovine lungs: Optimization of process variables and study of antioxidant capacity. *Repositorios Digitales MINCyT, Argentina*. <https://doi.org/10.1002/jsf2.110>
28. Mohammad, S.S., da Silva Ferreira, M.V., Jacintho Barbosa, M.I., & Barbosa Junior, J.L. (2023). Characteristics of enzymatic hydrolysis of protein from different food sources and potential separation techniques. *Current Nutrition & Food Science*, 19(6), 590-601. <https://doi.org/10.2174/1573401318666221003104005>
29. Nooshi Manjili, Z., & Sadeghi Mahoonak, A. (2024). Effects of microwave pretreatment on enzymatic hydrolysis of pumpkin seed protein (*Cucurbita maxima* L.) using trypsin and investigation of the protein antioxidant activity using response surface methodology. *Nutrition and Food Sciences Research*, 11(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29669>
30. Pereira, N.D.L.Á., Fangio, M.F., Rodriguez, Y.E., Bonadero, M.C., Harán, N.S., & Fernández-Gimenez, A.V. (2022). Characterization of liquid protein hydrolysates shrimp industry waste: Analysis of antioxidant and microbiological activity, and shelf life of final product. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8), e15526. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15526>
31. Pérez-Gálvez, R., Maldonado-Valderrama, J., Jones, N.C., Hoffmann, S.V., Guadix, E., & Garcia-Moreno, P.J. (2024). Influence of the enzymatic treatment and pH on the interfacial and emulsifying properties of sunflower and olive protein hydrolysates. *Food Hydrocolloids*, 154, 110135. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110135>
32. Prados, I.M., Dominguez-Vega, E., Marina, M.L., & Garcia, M.C. (2023). Maximizing hypocholesterolemic peptides from an olive byproduct by enzymatic hydrolysis. *Lwt*, 187, 115371. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115371>

33. Rivero-Pino, F. (2023). Bioactive food-derived peptides for functional nutrition: Effect of fortification, processing and storage on peptide stability and bioactivity within food matrices. *Food Chemistry*, 406, 135046. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135046>
34. Roy, M., Ullah, S., Alam, M., & Islam, M.A. (2021). Evaluation of quality parameters and antioxidant properties of protein concentrates and hydrolysates of hyacinth bean (*Lablab purpureus*). *Legume Science*, 3(4), e128. <https://doi.org/10.1002/leg3.128>
35. Sarringkarin, W., & Laokuldilok, T. (2017). Optimization of the production conditions of glutinous rice bran protein hydrolysate with antioxidative properties. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 16(1), 1–14. <https://doi.org/10.12982/cmujns.2017.0001>
36. Sripokar, P., Panya, A., & Sriwattana, S. (2022). Optimization of enzymatic hydrolysis by alcalase and flavourzyme to enhance the antioxidant properties of jasmine rice bran protein hydrolysate. *Scientific Reports*, 12, 12582. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16821-z>
37. Udenigwe, C.C., & Aluko, R.E. (2012). Food protein-derived bioactive peptides: production, processing, and potential health benefits. *Journal of Food Science*, 77(1), R11-R24. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02455.x>
38. Wang, K., Luo, Y., & Sun, Y. (2021). Novel antioxidant and ACE inhibitory peptide identified from *Arthrospira platensis* protein and stability against thermal/pH treatments and simulated gastrointestinal digestion. *Food Research International*, 139, 109908. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109908>
39. Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Duan, Y., & Ma, H. (2020). Plant protein-derived antioxidant peptides: Isolation, identification, mechanism of action and application in food systems: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.019>
40. Xu, Y., Yang, Y., Ma, C.M., Bian, X., Liu, X.F., Wang, Y., & Zhang, N. (2023). Characterization of the structure, antioxidant activity and hypoglycemic activity of soy (*Glycine max* L.) protein hydrolysates. *Food Research International*, 173, 113473. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113473>
41. Yang, J., Huang, Y., Dong, X., & Wang, Z. (2023). Optimization of walnut protein hydrolysed as an antioxidant candidate. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17, 5465–5476. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02067-0>
42. Yu, P., Yan, J., Kong, L., Yu, J., Zhao, X., & Peng, X. (2023). Whey protein hydrolysate improved the structure and function of myofibrillar protein in ground pork during repeated freeze–thaw cycles. *Foods*, 12(16), 3135. <https://doi.org/10.3390/foods12163135>

Short Research Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 389-403

Effect of Cysteine and Modified Atmosphere Packaging on Maintaining the Quality and Storage Time of Green Basil

N. Norouzi Jajarm¹, N. Sedaghat^{1*}, M. Taghizadeh¹

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: sedaghat@um.ac.ir)

Received: 31.12.2025

Revised: 27.06.2026

Accepted: 04.07.2026

Available Online: 12.07.2026

How to cite this article:

Norouzi Jajarm, N., Sedaghat, N., & Taghizadeh, M. (2026). Effect of cysteine and modified atmosphere packaging on maintaining the quality and storage time of green basil. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 389-403. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97200.1542>

Introduction

Fresh leafy vegetables contain vital macronutrients and micronutrients such as carbohydrates, fiber, minerals, and vitamins that are essential for body health. People are now consuming less vegetables in their diet because their preparation is time-consuming. These nutrients play a critical role in keeping physiological functions stable, boosting immune responses, and preventing chronic diseases such as cardiovascular disorders or some kinds of cancer. Therefore, the market for packaged ready to eat fresh leafy vegetables has grown worldwide. This has created a new opportunity to bridge the gap between traditional and modern lifestyles, increase fresh product consumption, expand convenience foods, and promote well-documented health benefits. Although many vegetables are not available in high-quality packs, basil is a popular leafy vegetable in Iranian food preparation and consumption. This vegetable has a key flavor that is used as a garnish, in salads, stews, or traditional dishes, and gives cultural and culinary significance beyond its nutritional value. Basil (*Ocimum basilicum*) is one of the most sensitive plants, with a very short shelf life and a unique aroma and flavor, which has made it an integral part of Mediterranean cuisine, too. Its sensory profile is attributed to its essential oil composition, mainly containing linalool, eugenol, and methyl chavicol, which are highly volatile and susceptible to degradation during postharvest handling. It has a soft and thin texture that makes it more sensitive to mechanical damage and environmental stresses. Therefore, even the smallest changes in the storage conditions can cause quick quality loss. Various negative quality effects that are reported during the storage time of fresh basil leaves include weight loss, chlorophyll degradation, leaf rot, browning, and loss of sensory properties, which lead to increased waste and reduced shelf life of this leafy vegetable. Weight loss primarily results from respiration and causes wilting and limpness, while chlorophyll breakdown increases yellow carotenoid pigments, giving leaves an undesired appearance that is a sign of aging and reduced freshness. Many parameters have been studied to reduce the spoilage rate of basil leaves, including changes in temperature, humidity, packaging materials and types; however, these methods could not successfully manage the negative quality effects to optimize the shelf life of fresh, cleaned basil leaves. For instance, using Ethylene producing inhibitors is a common way to maintain basil leaf quality; however, the most important challenge in storing this vegetable is its high sensitivity to low temperatures, and the absence of ethylene in the atmosphere makes the inhibitors useless. Also, using the inhibitors alone can cause moisture loss and wilting of the vegetable. Applying controlled temperature and moisture could limit browning and sensory degradation, but the loss of freshness and aroma remains a key unsolved challenge caused by essential metabolism in the leaf's cells. Moreover, using ionized or salt-based coatings caused off-flavors and limited the edibility of basil leaves. Inorganic coatings are effective moisture barriers in some cases, but often interact with the leaf surface in ways that alter the natural flavor profile, leading to bitterness or metallic notes that are unacceptable to consumers. Accordingly, it is not possible to scale up the production of packed clean basil leaves, and an essential need has been sensed in this area. Therefore, investigating appropriate methods to maintain the quality



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.2026.97200.1542>

characteristics of basil during storage is a determinant research. The first accessible, facilitated method is leaf coating with controlled process parameters that decrease mechanical and physical damage to leaves on one hand and increase the stability of fresh quality on the other hand. Therefore, protective, insensitive amino acids might be a logical option to manage the chemical degradation processes. The amino acids are safe and low-cost, which makes them a useful choice for industrial applications. They can be used both as a foliar spray and as a dip or spray on the leaves. Amino acids not only coat the leaves but also inhibit some vital processes like oxidation, cellular respiration, and ethylene production, which helps keep cell and membrane integrity. However, not all amino acids are desired for this application and do not have the same result on a specific leafy vegetable. Therefore, the present study aimed to investigate the appropriateness of cysteine as a coating formed by the dip method on the quality parameters of basil leaves and the interaction effect of that with the application of modified atmosphere packaging to increase the shelf life and freshness of the leaves. Cysteine was especially chosen in this study due to its thiol group, which can confer strong antioxidant activity and has high potential to chelate metal ions that might be catalyzed in oxidative reactions, making it a promising candidate for fresh basil leaf preservation and maintaining its biochemical balance.

Materials and Methods

In this study, basil leaves with edible cysteine coating at three levels (0, 0.1, 0.5%), packaging type (normal air packaging and passive modified atmosphere packaging) and storage time (0, 5, 12, 9 days) at 4°C, were prepared and the concentrations of oxygen and carbon dioxide gases inside the package, pH, weight loss percentage, color parameters (a^* , b^* , L^*), browning rate and sensory properties were determined.

Results and Discussion

The findings showed that the use of passive modified atmosphere packaging had a significant effect on reducing the amount of oxygen and carbon dioxide gases, along with reducing the respiration rate and increasing the storage time of basil leaves. The samples with normal air packaging showed the highest weight loss (3.07%) and the modified atmosphere packaging showed the lowest weight loss (1.88%). Increasing the concentration of cysteine in basil resulted in a reduction in weight loss and inhibition of the browning reaction compared to control ($p < 0.05$).

Conclusion

Using a concentration of 0.1% cysteine in the coating was able to maintain the sensory properties of basil samples. Accordingly, the combined use of edible cysteine coating and modified atmosphere packaging has proved to preserve the quality of packaged basil samples and increased the storage time by up to 12 days.

Keywords: Basil, Cysteine, Modified atmosphere, Storage time

مقاله کوتاه پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۳۸۹-۴۰۳

بررسی اثر سیستمین و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده در حفظ کیفیت و زمان نگهداری ریحان

سبز

ناهید نوروزی جاجرم^۱ - ناصر صداقت^{۱*} - مسعود تقی زاده^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

چکیده

ریحان یک سبزی حاوی مواد مغذی حیاتی از قبیل کربوهیدرات‌ها، فیبر، املاح و ویتامین‌ها بوده و عمر پس از برداشت بسیار کوتاهی دارد. اثرات کیفی منفی نظیر کاهش وزن، تخریب کلروفیل، پوسیدگی برگ‌ها، قهوه‌ای شدن، افت ویژگی‌های حسی در طول نگهداری منجر به افزایش ضایعات و کاهش زمان نگهداری این محصول می‌شود که این امر خود نشان‌دهنده‌ی نیاز آن به روش‌های مناسب برای حفظ خصوصیات کیفی ریحان در زمان نگهداری است. در این مطالعه، اثر سیستمین و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده در حفظ خصوصیات فیزیکیوشیمیایی و افزایش زمان نگهداری ریحان سبز مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق سبزی ریحان با سیستمین در سه سطح (غلظت صفر، ۰/۱، ۰/۵ درصد)، نوع بسته‌بندی (بسته‌بندی با هوای معمولی و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال) و زمان نگهداری (صفر، ۵، ۹، ۱۲ روز) در بسته‌های سه لایه پلی‌اتیلن/پلی‌آمید/پلی‌اتیلن آماده و نمونه‌های تولیدی در دمای ۴°C نگهداری شدند. بر روی کلیه نمونه‌ها آزمون‌های تعیین غلظت گازهای اکسیژن و دی‌اکسید کربن درون بسته، pH، درصد کاهش وزن، پارامترهای رنگی (a^* , b^* , L^*)، میزان قهوه‌ای شدن و خصوصیات حسی مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که استفاده از بسته‌بندی‌های با اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال اثر معنی‌داری در کاهش مقدار گاز اکسیژن و دی‌اکسید کربن همراه با کاهش نرخ تنفس و افزایش زمان نگهداری برگ‌های ریحان داشت. نمونه‌های با بسته‌بندی هوای معمولی بیشترین افت وزن (۳/۰۷ درصد) و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده کمترین افت وزن (۱/۸۸ درصد) را نشان دادند. افزایش غلظت سیستمین به ۰/۱٪ در سبزی ریحان منجر به کاهش افت وزن به ۱/۶۷٪ و شاخص قهوه‌ای شدن به ۰/۲۵ و ایجاد اختلاف معنی‌دار نسبت به نمونه‌ی شاهد (به ترتیب ۳/۲۹ و ۰/۲۶ درصد) شد. استفاده از غلظت ۰/۱ درصد سیستمین در هر دو نوع بسته‌بندی توانست خصوصیات حسی نمونه‌های ریحان را بهتر حفظ کند ($P < ۰/۰۵$). نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده توأم از سیستمین و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده باعث حفظ کیفیت نمونه‌های ریحان بسته‌بندی‌شده و افزایش زمان نگهداری تا ۱۲ روز شده‌است.

واژه‌های کلیدی: اتمسفر اصلاح‌شده، ریحان، زمان نگهداری، سیستمین

مقدمه

غنی از ترکیبات فنلی و سایر ترکیبات طبیعی ازجمله فلاونوئید، پلی‌فنول‌ها و آنتوسیانین‌ها می‌باشد (Phippen & Simon, 1998). همچنین ریحان دارای خواص ضد میکروبی، ضد التهابی، آنتی‌اکسیدانی و محرک سیستم ایمنی می‌باشد (Danso-Boateng, 2013; Hassan, Ali, Mostafa, & Mazrou, 2021). عوامل مختلفی می‌توانند بر کیفیت برگ‌های ریحان پس از برداشت مؤثر بوده و منجر

سبزی‌های تازه منبع غنی از مواد مغذی حیاتی برای سلامتی و پیشگیری از بیماری‌ها هستند (Ahmadi-Roshan et al., 2022). ریحان سبز (*Ocimum basilicum* L.) ازجمله سبزی‌های برگ‌ی است که معمولاً مصرف تازه‌خوری دارد. این سبزی منبعی غنی از کربوهیدرات، ویتامین، پروتئین، فیبر و مواد معدنی بوده و اسانس آن

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

(*)- نویسنده مسئول: (Email: sedaghat@um.ac.ir)

واکنش مستقیم سیستین با آنزیم پلی فنل اکسیداز و تشکیل کمپلکس پایدار با مس، اگرچه در این مورد نیز سیستین با واکنش دادن با محصولات کینون، ترکیبات مزدوج بی رنگ ایجاد می کند (Faraji, Farahnaki, Badii, & Hoseini, 2014).

یک روش مناسب برای افزایش زمان نگهداری محصولات استفاده از بسته بندی با اتمسفر اصلاح شده است (Caleb, Mahajan, Al-Said, & Opara, 2013). در این روش از گازها با ترکیبی متفاوت از هوای معمولی درون بسته بندی به کار گرفته می شود (Parry, 2012). استفاده از این تکنیک در مواد غذایی بسته بندی شده، باعث کاهش فعالیت های فیزیولوژیکی و فساد و افزایش زمان انبارداری می شود (Manolopoulou, Xanthopoulos, Douros, & Lambrinos, 2010) و همچنین سبب کاهش سرعت تنفس محصول شده و فرآیندهایی مانند رسیدن، پیری، آسیب های بافتی و واکنش های قهوه ای شدن را به تأخیر می انداخته و از رشد میکروارگانیسم های عامل فساد، کاهش رنگ و تخریب سلولی جلوگیری می کند (Oliveira et al., 2015).

میوه ها و سبزیجات به دلیل داشتن انواع میکرونتزین ها و تأمین انرژی اهمیت فراوانی در رژیم غذایی پیدا کرده اند و همین امر منجر به افزایش تقاضا برای دسترسی به سبزیجات تازه شده است. وجود درصد بالای رطوبت در این ترکیبات باعث افزایش حساسیت آنها به شرایط محیطی و کاهش زمان ماندگاری شده است که خود نشان دهنده نیاز ضروری به توسعه روش هایی برای کاهش افت پس از برداشت، افزایش زمان ماندگاری و تثبیت خصوصیات فیزیوشیمیایی و حسی برای بازه زمانی طولانی تر است (Pulamte, 2008). استفاده از ترکیبات تثبیت کننده رنگ محصولات به روش غوطه وری به معنی استفاده از ترکیبات مشخص در سطح ماده غذایی برای حفاظت از آن ماده می باشد که می تواند محصولات غذایی را از آسیب های مکانیکی، حساسیت به نور، رسیدگی بیش از حد، آلودگی و فساد میکروبی و تغییر رنگ، محافظت نماید (Pham, Nguyen, Dam, & Baranyai, 2023). از جمله ترکیبات استفاده شده به عنوان پوشش خوراکی در سبزیجات و میوه ها می توان به استفاده از کیتوزان (Shiekh, Malik, Al-Thabaiti, & Shiekh, 2013)، آلوه ورا (Misir, 2014)، صمغ عربی (Ali, Maqbool, Ramachandran, & Alderson, 2010)، روغن اسانس لیمو نانومولسیون شده (Sessa, Ferrari, & Donsi, 2015)، نشاسته و انواع پلی ساکاریدها (Kocira et al., 2021)، پروتئین سویا و سیستین (Ghidelli, Mateos, Rojas-Argudo, & Pérez-Gago, 2014) اشاره نمود.

به کاهش کیفیت و زمان نگهداری آن شوند که از جمله آنها می توان به عوامل ساختاری و مرتبط با ویژگی های ذاتی برگ ریحان (کلایماتریک بودن، فعالیت آبی بالا) و عوامل محیطی (رطوبت، دما، ترکیب اتمسفر بسته بندی) اشاره نمود (Berry, Sargent, & Huber, 2010). این عوامل باید به اندازه کافی پس از برداشت کنترل شوند تا از کاهش وزن، تخریب کلروفیل، پروتئین و پوسیدگی برگ ها که منجر به کاهش کیفیت این سبزی می شود جلوگیری کرد (Hassan & Mahfouz, 2010). یکی از مشکلات بزرگ در طی نگهداری این گیاه، قهوه ای شدن آن است که ممکن است به دلیل فعالیت آنزیم های پر اکسیداز باشد (Imaizumi, Jitareerat, Laohakunjit, & Kaisangsri, 2021). این فرآیند، در نتیجه اکسیداسیون ترکیبات فنی به وسیله آنزیم پلی فنل اکسیداز^۱ در حضور اکسیژن می باشد (Moon, Kwon, Lee, & Kim, 2020).

برای حفظ کیفیت و افزایش زمان نگهداری این سبزی می توان از روش های مختلف نگهداری استفاده کرد، از جمله مهارکننده های تولید اتیلن، دماهای پایین، پوشش دهی و بسته بندی اتمسفر اصلاح شده (Patiño, Castellanos, & Herrera, 2018). پوشش های خوراکی لایه های نازکی از مواد زیست تخریب پذیر هستند که با قرار گرفتن در سطح محصول، از تغییر خصوصیات فیزیکی ماده که ناشی از پدیده های انتقال (نفوذ و انتقال رطوبت، ترکیبات گازی و تغییر غلظت مواد معدنی) است جلوگیری نموده و با کنترل تنفس گیاه منجر به افزایش زمان نگهداری آن می شوند (Dhall, 2013; Teodosio et al., 2021). سیستین یک ترکیب یک آلفا آمینو اسید دارای زنجیره جانبی با گروه عاملی SH- است و به دلیل وجود پیوند تکی می تواند پس از اکسید شدن دو مرکز فعال S برای مهار واکنش های مختلف را ایجاد نماید (Yan et al., 2023). سیستین حاوی ترکیبات تیول می باشد که اثر مهارکنندگی بر فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز دارد. این ماده دارای سه مرکز واکنش پذیر است: اسید کربوکسیلیک، گروه آمینه و مرکز گوگرددار (Altunkaya & Gökmen, 2008).

مکانیسم های سیستین برای مهار فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز شامل موارد زیر می باشد:

الف) این ماده با ترکیبات فنی به دلیل داشتن هسته سولفور و واکنش داده و تشکیل ترکیبی بی رنگ می دهند (Salemi, Sedaghat, Varidi, Mousavi, & Tabatabaei Yazdi, 2021).

ب) سیستین در طی اکسیداسیون آنزیمی، اوکینون^۲ را با تشکیل ترکیبات افزایشی به دام می اندازد. ترکیبات افزایشی سیستین-کینون مهارکننده های رقابتی آنزیم پلی فنل اکسیداز هستند و فل در این ترکیبات بدون تشکیل رنگ تجزیه می شود (Altunkaya & Gökmen, 2008).

تعیین درصد کاهش وزن

افت وزن نمونه‌های ریحان به معنی کاهش وزن سبزی‌های بسته‌بندی‌شده در طی زمان نگهداری است که بر اساس اختلاف وزن اولیه و وزن نهایی نمونه‌ها، برابر با مقدار آب ازدست‌رفته از طریق تعریق و تبخیر و ماده خشک ازدست‌رفته در اثر تنفس با وزن کردن گیاه تازه در طول دوره‌ی نگهداری محاسبه می‌شود (T.F.A.El-Moghazy, 2021). فرمول (۱) نحوه‌ی محاسبه این پارامتر را نشان می‌دهد:

$$100 \times \text{وزن اولیه} / (\text{وزن در زمان معین نگهداری} - \text{وزن اولیه}) = \text{درصد افت وزنی} \quad (1)$$

اندازه‌گیری pH

برای اندازه‌گیری pH، ابتدا ۱۰ گرم سبزی ریحان به همراه ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر با مخلوط‌کن همگن شد. دستگاه pH متر مدل Winlab را با محلول‌های بافر با ۴ و ۷ کالیبره نموده سپس pH نمونه‌ها پس از رسیدن به مقدار ثابت در دمای اتاق pH گزارش شد (Hosseinienezhad, Nader, Ramezani, Niakousari, & Mazloomi, 2023).

تعیین پارامترهای رنگی نمونه‌های ریحان

در این پژوهش برای بررسی مؤلفه‌های رنگی سبزی ریحان از تکنیک پردازش تصویر و شرایط اندازه‌گیری (CIE LAB) برای محاسبه سه پارامتر a^* ، L^* و b^* استفاده شد. این مدل برای توصیف تمام‌رنگ‌های قابل‌مشاهده با چشم انسان کاربردی است که با سه فاکتور (L^* روشنی و تیرگی)، (a^* قرمزی و سبزی)، (b^* زردی و آبی) سنجش می‌شود. شاخص L^* بین صفر (سیاه) تا صد (سفید) متغیر است. در شاخص a^* ، مقادیر منفی توصیف‌کننده رنگ سبز و مقادیر مثبت توصیف‌کننده رنگ قرمز می‌باشد. شاخص b^* نیز با مقادیر منفی رنگ آبی و با مقادیر مثبت رنگ زرد را نشان می‌دهد. برای تعیین پارامترهای رنگی ابتدا تصویرگیری از نمونه‌های ریحان در محفظه‌ای مشکی‌رنگ با استفاده از دوربین دیجیتال (Canon) انجام شد تصاویر گرفته‌شده با استفاده از نرم‌افزار Image processing مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تغییرات رنگ مربوط به هر نمونه بر اساس اختلاف رنگی ایجاد شده در برگ‌های ریحان تازه شاهد نسبت به نمونه‌های مورد آزمون طبق فرمول (۲) زیر محاسبه شد (Rohani & Sedaghat, 2019):

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

تعیین شاخص‌های قهوه‌ای شدن

بر این اساس هدف از پژوهش حاضر بررسی پتانسیل آمینو اسید سیستمین در کنترل واکنش‌های شیمیایی فساد و افزایش زمان نگهداری برگ ریحان‌های تازه بوده است. ارزیابی آثار استفاده از سیستمین به تنهایی و یا همراه با بسته‌بندی مپ می‌تواند به طراحی هدفمندتر بسته‌بندی و متناسب با ویژگی‌های هر یک از سبزیجات و میوه‌ها کمک نماید.

مواد و روش‌ها

ریحان‌های تازه و ساقه‌دار از باغ‌های کشت سبزی اطراف مشهد خریداری شد. نمونه‌های ریحان خریداری شده ابتدا ضایعات، برگ‌ها و ساقه‌های آسیب‌دیده و موارد نامرغوب از برگ‌های تازه و سالم ریحان دارای ساقه با طول ۵ سانتی‌متر جدا شدند. سپس برگ‌های ریحان پاک شده ابتدا با استفاده از آب معمولی، محلول ضدعفونی‌کننده (۱۰ میلی‌لیتر هیپوکلریت سدیم مارک کنز تولید ایران در ۴ لیتر آب) و آبکشی با آب معمولی شسته شدند. پس از آبگیری و خشک شدن سطحی، سبزی‌ها به ترتیب ابتدا تحت تیمار سیستمین با غلظت‌های صفر (شاهد)، ۰/۱ و ۰/۵ درصد سیستمین قرار گرفتند. سپس نمونه سبزی‌های تیمار شده با سیستمین تحت تیمار بسته‌بندی شامل بسته‌بندی در شرایط اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال هوای معمولی (شامل ۲۱ درصد اکسیژن و ۰/۴ درصد کربن دی‌اکسید در بسته‌های فاقد منفذ) و بسته‌های منفذدار (۲۱ درصد اکسیژن و ۰/۴ درصد کربن دی‌اکسید) با منافذ به تعداد ۱۸ منفذ با قطر ۰/۸ میلی‌متر در هر بسته بسته‌بندی شدند. برای بسته‌بندی نمونه‌ها از کیسه‌های پلاستیکی سه لایه (PE/PA/PE) با ضخامت ۸۰ میکرون استفاده شد. کلیه نمونه‌ها با سه تکرار آماده شدند برای دوخت نمونه‌ها از دستگاه بسته‌بندی هنکلمن (Henkelman Vaccum Packaging 200A model, Netherland) استفاده گردید. نمونه‌های بسته‌بندی‌شده به مدت ۱۲ روز در دمای یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. هر بسته حاوی ۱۰۰ گرم سبزی ریحان با ساقه بود (Bakmohammadpour, Peyghambaroust, & Alirezalou, 2021; Moansouri, Kazemi, Bahreini, & Aroiee, 2020). بر روی نمونه‌ها در روزهای صفر، ۵، ۹ و ۱۲ آزمون‌های زیر انجام گردید.

آزمون‌ها

تعیین درصد گاز موجود در بسته بندی

برای تعیین ترکیب اتمسفر درون (غلظت گازهای اکسیژن و کربن دی‌اکسید) بسته‌های ریحان در روزهای صفر، ۵، ۹، ۱۲ از دستگاه گاز آنالایزر (WITT, GmbH & Co KG D-38454, Germany) استفاده شد.

نتایج و بحث

تعیین درصد گازها

اندازه‌گیری درصد ترکیبات گازی (اکسیژن و کربن دی‌اکسید) می‌تواند نرخ تنفس محصولات را مشخص نماید (Nicola, Tibaldi, & Pignata, 2018). بر اساس نتایج آنالیز واریانس هر سه عامل غلظت سیستمین، نوع بسته‌بندی و زمان نگهداری اختلاف معنی‌داری در محتوای گازهای کربن دی‌اکسید و اکسیژن در نمونه‌های بسته‌بندی شده ایجاد کرده است ($p < 0.05$). افزایش غلظت سیستمین از صفر به ۰/۵ درصد منجر به افزایش معنی‌دار غلظت گازهای موجود در بسته شده است. استفاده از بسته‌بندی‌های با اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال در کاهش مقدار گاز اکسیژن و کربن دی‌اکسید اثر معنی‌داری داشت که می‌تواند با کاهش شدت تنفس و افزایش زمان نگهداری سبزی‌های ریحان همراه باشد. علاوه بر این، در طی زمان نگهداری غلظت هر دو گاز کاهش یافت. دلیل احتمالی افزایش جزئی گاز اکسیژن در طی زمان نگهداری، وجود نشتی بسیار ریز در محل دوخت بسته یا نفوذپذیری دیواره‌ی بسته‌بندی‌های تهیه‌شده بوده است (جدول ۱). ترکیب گازهای اکسیژن و دی‌اکسید کربن موجود در بسته‌بندی با افزایش زمان نگهداری کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان افزایش عملکرد آنزیم‌های اکسیداتیو و تشدید فعالیت‌های متابولیکی در سبزی‌های ریحان بسته‌بندی‌شده دانست که منجر به خارج شدن گازهای موجود از بسته‌بندی‌های محتوی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال شده است. در بسته‌بندی‌های حاوی هوای معمولی نیز، عدم خروج گاز و افزایش یافتن سرعت واکنش‌ها، باعث تداوم یافتن شدت تنفس و واکنش‌های تخریب‌کننده و در نتیجه تعریق بیشتر سبزی‌های ریحان و افزایش یافتن مقدار بخار آب درون بسته‌بندی شده است.

میزان قهوه‌ای شدن نمونه‌های ریحان از فرمول (۳) و برای محاسبه‌ی متغیر x در آن از فرمول (۴) استفاده شد (Rohani & Sedaghat, 2019):

$$BI = 100 \frac{(x - 0.31)}{0.172} \quad (3)$$

$$x = \frac{(a* + 1.75I*)}{(5.645I* + a* - 3.02b*)} \quad (4)$$

ارزیابی حسی

ارزیابی ویژگی‌های حسی شامل بافت، عطر، طعم، رنگ ظاهری و پذیرش کلی سبزی ریحان به روش آزمون هدونیک ۵ نقطه‌ای (۱- غیرقابل قبول، ۲- کیفیت پایین، ۳- متوسط، ۴- خوب و ۵- خیلی خوب) در روزهای صفر، ۵، ۹ و ۱۲ بررسی شد. در این ارزیابی از ۲۰ نفر پانلیست آموزش‌دیده از دانشجویان صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد با سنی بین ۲۰ تا ۳۰ استفاده شد (Hosseinienezhad et al., 2023). آموزش ارزیاب‌ها در یک جلسه یک ساعته و با توضیح خصوصیات ظاهری و طعمی مطلوب ریحان تازه، نحوه تشخیص پارامترهای حسی مورد ارزیابی و تعیین موارد غیر قابل مصرف یا نامطلوب انجام گرفت.

آنالیز آماری

این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شده است. فاکتور اول غلظت سیستمین در سه سطح صفر، ۰/۱ و ۰/۵ درصد و فاکتور دوم نوع بسته‌بندی (بسته‌بندی با هوای معمولی و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال) و فاکتور سوم زمان نگهداری روزهای صفر، ۵، ۹ و ۱۲ بوده است. آنالیز واریانس نتایج حاصله از اندازه‌گیری‌های فیزیکی شیمیایی و حسی نمونه‌ها با کمک نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. مقایسه‌ی میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) گزارش شده است برای ترسیم گراف‌های مورد نظر از نرم‌افزار اکسل استفاده گردید.

جدول ۱- اثر تیمارهای غلظت سیستمین، نوع بسته‌بندی و زمان نگهداری بر میانگین تغییرات ترکیبات گازی اکسیژن و دی‌اکسید کربن نمونه

ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Table 1- The effect of cysteine concentration treatments, packaging type, and storage time on the average changes in oxygen and carbon dioxide gas compositions of fresh basil samples stored at refrigerator temperature

متغیر Variabel	سطح / نوع Level/type	گاز اکسیژن O ₂ %	گاز کربن دی‌اکسید Co ₂ %
غلظت سیستمین Cystein concentration (%)	0	3.19 ± 0.03 ^a	3.24 ± 0.02 ^a
	0.1	3.78 ± 0.03 ^b	3.74 ± 0.02 ^b
	0.5	3.57 ± 0.03 ^c	3.65 ± 0.02 ^c
نوع اتمسفر بسته‌بندی Type of atmosphere	Air	4.12 ± 0.02 ^a	4.06 ± 0.02 ^a
	Modified	2.91 ± 0.02 ^b	3.03 ± 0.02 ^b
زمان نگهداری Storage time (Day)	0	5.00 ± 0.03 ^a	5.00 ± 0.03 ^a
	5	3.20 ± 0.03 ^c	4.12 ± 0.03 ^b
	9	1.91 ± 0.03 ^d	3.14 ± 0.03 ^c
	12	4.12 ± 0.02 ^b	1.91 ± 0.03 ^d

*اعداد میانگین حاصل از سه تکرار بوده و مقایسه میانگین‌ها با حرف یکسان اختلاف معنی‌داری نداشته‌اند.

*The average number the result of three repetitions and the comparison of the averages with the same letters has no significant difference ($P < 0.05$).

ریحان ایجاد کرده است ($p < 0.05$). افزودن سیستمین به سبزی‌های ریحان تازه در غلظت ۰/۱ درصد باعث کاهش معنی‌دار افت وزنی نمونه از ۵/۷۹٪ در نمونه شاهد به ۱/۷۸٪ در نمونه‌های نگهداری شده با بسته‌بندی اتمسفر اصلاح شده پس از ۱۲ روز شده است. همچنین با گذشت زمان نگهداری سبزی‌های ریحان در دمای ثابت ۴ درجه سانتی‌گراد از روز صفر تا روز ۱۲ پارامتر افت وزن افزایش معنی‌دار داشت. اثر متقابل زمان نگهداری و نوع بسته‌بندی نیز بر پارامتر افت وزن نمونه‌ها معنی‌دار بودند ($p < 0.05$). در تمام بازه نگهداری سبزی‌های ریحان، استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده باعث کاهش درصد افت وزن نمونه شد ($p < 0.05$). این امر می‌تواند به دلیل کنترل شدت تنفس سبزی‌های ریحان، حفظ خصوصیات کیفی و کاهش یافتن میزان تخریب ساختار کلروفیلی در اثر کمبود غلظت ترکیب گازی لازم برای انجام تنفس باشد (جدول ۲). اثر متقابل نوع بسته‌بندی و غلظت سیستمین نیز معنی‌دار بودند ($p < 0.05$) و مقایسه میانگین‌ها در مطالعات انجام‌شده در خصوص پوشش‌دهی نمونه‌های ریحان تازه با پوشش خوراکی کیتوزان در غلظت‌های متفاوت نتایج مشابهی به همراه داشت و منجر به کاهش معنی‌دار افت وزن و افزایش زمان نگهداری ریحان شد (Hassan et al., 2021).

پژوهش‌های انجام شده مشابه نشان‌دهنده وجود تأثیر معنی‌دار نوع بسته‌بندی و افزودنی‌های مختلف در کنترل تنفس و ترکیبات گازی تولید شده است. استفاده از کلسیم لاکتات و بسته‌های اتمسفر اصلاح شده باعث کاهش معنی‌دار ترکیبات گازی تولید شده در بسته‌های سالاد مخلوط سبزیجات و حفظ کیفیت آن برای زمان طولانی‌تر شده است (Rouhani, 2018). بر این اساس میزان حساسیت سبزی‌های مختلف نسبت به شرایط محیطی متفاوت بوده و کاهش تولید اتیلن و بروز واکنش‌های آنزیمی در بسته‌های اتمسفر اصلاح شده متناسب با شرایط و زمان نگهداری می‌تواند بهینه شود (Manjunatha & Anurag, 2014).

اندازه‌گیری درصد کاهش وزن

کاهش وزن درون بسته در اثر فرآیندهای فیزیولوژی مانند تنفس می‌تواند منجر به کاهش کیفیت، تردی، سفتی بافت و پژمردگی سبزی‌ها شود (Rouhani, 2018). نتایج به‌دست‌آمده نشان داد افزایش غلظت سیستمین، استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده و افزایش زمان نگهداری اختلاف آماری معنی‌داری در کاهش وزن سبزی‌های

جدول ۲- اثر متقابل زمان نگهداری و نوع بسته‌بندی بر افت وزنی ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Table 2- The interaction effect of storage time and packaging type on weight loss of fresh basil stored at refrigerated temperature

زمان نگهداری Storage time (Day)	نوع بسته‌بندی Type of packagin	افت وزن نمونه Weight loss (%)
روز صفر (Day 0)	Air	0.00 ± 0.00 ^a
	Modified	0.00 ± 0.00 ^a
روز پنجم (Day 5)	Air	3.02 ± 0.23 ^c
	Modified	2.14 ± 0.23 ^b
روز نهم (Day 9)	Air	3.10 ± 0.23 ^c
	Modified	2.37 ± 0.23 ^b
روز دوازدهم (Day 12)	Air	5.79 ± 0.22 ^d
	Modified	3.02 ± 0.25 ^c

*اعداد میانگین حاصل از سه تکرار بوده و مقایسه میانگین‌ها با حرف یکسان اختلاف معنی‌داری نداشته‌اند.

*The average number the result of three repetitions and the comparison of the averages with the same letters has no significant difference ($P < 0.05$).

PPO و لیپوکسیژناز (LOX) نسبت دادند. این مکانیسم‌ها شباهت زیادی به اثر محافظتی سیستمین در پژوهش حاضر دارد. علاوه بر این، یک پتنت ثبت‌شده توسط دانشگاه کشاورزی پکن (۲۰۲۲) نیز کارایی روش MAP را در ترکیب با پیش‌تیمار با باکتریوسین تأیید کرده و نشان داده است که این روش می‌تواند نرخ کاهش وزن ریحان را به تأخیر انداخته و ماندگاری آن را از ۴ به ۷ روز افزایش دهد (Chen et al., 2022).

بر اساس گزارش منتشر شده توسط حسن و همکاران (Hassan et al., 2021) تیمار با کیتوزان و نانوذرات کیتوزان، به‌ویژه نوع بارگذاری شده با اسانس آویشن (TVO-CSNPs)، به‌طور قابل‌توجهی باعث افزایش ماندگاری (تا ۲/۴ برابر شاهد) و کاهش افت وزن برگ‌های ریحان شد. آن‌ها این اثر را به کاهش پراکسیداسیون لیپیدها (کاهش مالون‌دی‌آلدئید) و حفظ عملکرد غشاهای سلولی از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز (CAT) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاهش فعالیت آنزیم‌های مضر مانند

تعیین pH

نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان داد که اثر نوع بسته‌بندی و افزایش زمان نگهداری اختلاف آماری معنی‌دار میان pH نمونه‌های ریحان دارد ($p < 0.05$). ولی افزودن غلظت‌های بیش‌تر سیستمین اثر معنی‌داری در پارامتر pH نمونه‌ها ایجاد نکرد. استفاده از اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال منجر به کاهش pH شد. احتمال می‌رود علت این امر افزایش یافتن اسیدهای آلی غالب در سبزی ریحان در اثر شدت یافتن فرآیند تنفس سلولی و تجزیه‌ی بخش کلروفیلی آن در بسته‌بندی‌های حاوی اتمسفر اصلاح‌شده باشد که باعث تجمع یافتن بخش اسیدی شده است (A, Sheikhloie, & A.R, 2016).

pH نمونه‌های ریحان پس از ۱۲ روز نگهداری نسبت به روز صفر افزایش معنی‌داری داشته است. تغییرات این پارامتر در طی زمان نگهداری در روزهای پنجم و دوازدهم افزایشی و در روز نهم کاهش نسبت به روز صفر بوده است ($p < 0.05$). احتمال می‌رود علت اصلی این تغییر روند، تجمع دمرحله‌ای اسید در ساختار برگ‌ها بوده باشد. به این صورت که پس از ۵ روز نگهداری، فرآیندهای زیستی گیاه به خاطر عملکرد اتمسفر بسته‌بندی و وجود سیستمین، کاهش یافته است. در حالی که با افزایش زمان نگهداری به ۹ روز، روند افزایشی تخریب ساختاری صورت گرفته و منجر به تجمع ترکیبات اسیدی شده است و این روند در روز ۱۲ ام به خاطر رها شدن بیش‌تر آنزیم‌های موجود در برگ و اختلال در عملکرد غشای سلولی، دچار نوسان و کاهش اسیدیته شده است. این نوسان را می‌توان به‌عنوان یک پاسخ پویای فیزیولوژیک گیاه به تنش‌های تجمعی تفسیر کرد. به نظر می‌رسد در روز پنجم، گیاه با بهره‌گیری از سیستم‌های دفاعی خود (مانند آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان) و به دلیل وجود سیستمین، توانسته است هموستاز نسبی خود را حفظ کرده و حتی با کاهش اسیدیته (افزایش pH) مواجه شود. اما با گذشت زمان تا روز نهم، تجمع ترکیبات اسیدی حاصل از تخریب تدریجی ساختارهای سلولی (مانند کلروفیل و غشاها) به اوج خود رسیده و pH را کاهش داده است. در روز دوازدهم، با از هم پاشیدن گسترده غشاهای سلولی و آزاد شدن محتویات واکوئلی و آنزیم‌های هیدرولیزکننده، ممکن است ترکیبات اسیدی رقیق شده یا تحت تأثیر واکنش‌های ثانویه دیگر قرار گرفته باشند و بدین‌ترتیب شاهد کاهش اسیدیته (افزایش دوباره pH) باشیم. این الگوی نوسانی، تأییدی بر پیچیدگی فرآیندهای بیوشیمیایی دخیل در پیری و تخریب پس از برداشت است (Towanabut).

اثر متقابل مدت‌زمان نگهداری و بسته‌بندی بر پارامتر pH معنی‌دار بود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال در بازه‌ی طولانی‌تر نگهداری سبزی ریحان می‌تواند به ثبات pH نمونه‌ها کمک کند. همچنین اثر متقابل نوع بسته‌بندی و غلظت

سیستمین نیز معنی‌دار بود. استفاده از بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال همراه با افزایش یافتن غلظت سیستمین تأثیر معنی‌داری بر این پارامتر داشت. نتایج این پژوهش با بررسی‌های آیهان و همکاران (Ayhan, Eştürk, & Taş, 2008) در زمینه کاهش pH در طی زمان نگهداری و اثر دو پارامتر زمان نگهداری و نوع بسته‌بندی هویج هم‌راستا بود. همچنین مجیدی و همکاران (Majidi, Minaei, Almassi, & Mostofi, 2014) اعلام کردند بهره‌گیری از اتمسفر اصلاح‌شده در نگهداری گوجه‌فرنگی علاوه بر حفظ خصوصیات ظاهری و کیفیت، روند کاهش اسیدیته و تغییر pH را به‌صورت معنی‌داری کاهش می‌دهد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت.

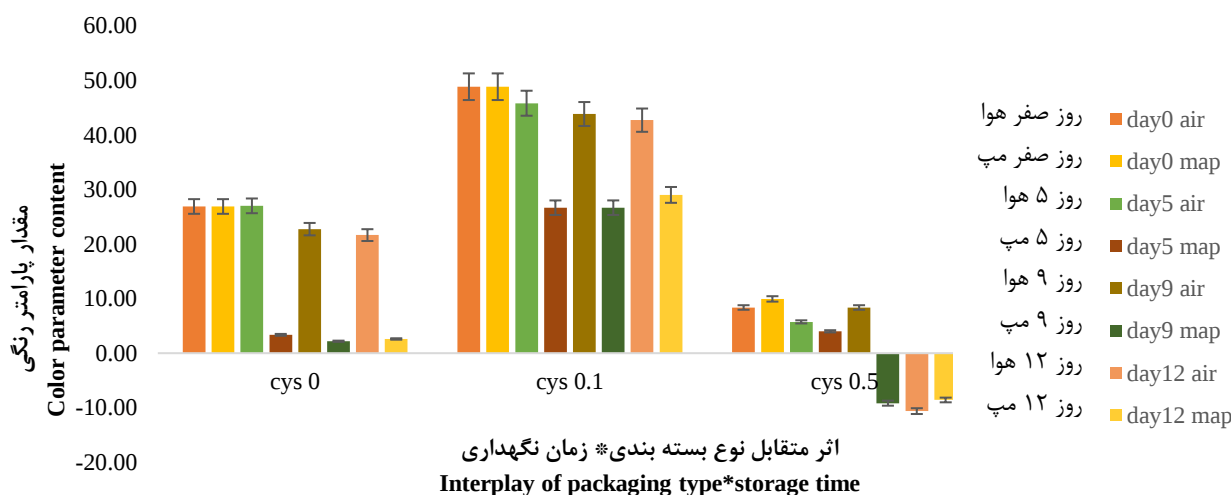
تعیین پارامترهای رنگی نمونه‌های ریحان

مؤلفه‌های رنگی به‌عنوان فاکتورهایی برای بررسی کیفیت برگ‌های سبز هستند که تازگی و مطلوبیت حسی محصولات را نشان دهند (Patiño et al., 2018). غلظت سیستمین، زمان نگهداری و نوع بسته‌بندی اثر معنی‌داری بر خصوصیات رنگی سبزی‌های ریحان داشتند ($p < 0.05$). با افزایش زمان نگهداری سبزی‌های ریحان، افزایش معنی‌داری در پارامتر رنگی L^* به وجود آمد ($p < 0.05$). فاکتور a^* پس از ۱۲ روز نگهداری، در غلظت ۰/۵ درصد سیستمین، در بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت. کمتر شدن ارقام منفی در این پارامتر به خاطر کاهش یافتن سبزیگی و افزایش قرمزی در برگ‌های ریحان نگهداری شده است. این نتایج با بررسی‌های آیتا رامی و همکاران (Anita Rami, louie, & Yousefi, 2016) در خصوص بررسی پارامترهای رنگی اسفناج هم‌راستا بود. این تخریب رنگ‌دانه‌ها را می‌توان به تبدیل کلروفیل به فتوفیتین نسبت داد، فرآیندی که در اثر تنش‌های پس از برداشت و افزایش اسیدیته سلولی تسریع می‌شود. پژوهش دیگری بر روی ریحان نشان داد که تخریب کلروفیل‌های a و b در شرایط تنش (مانند دماهای بالا) به سرعت رخ می‌دهد و منجر به تغییر رنگ برگ‌ها از سبز به قهوه‌ای مایل به زرد می‌شود. هرچند مطالعه مذکور عمدتاً بر خشک‌کردن متمرکز بود، اما مکانیسم زمینه‌ای تخریب کلروفیل در اثر تنش‌های محیطی با یافته‌های پژوهش حاضر در مورد اثر زمان نگهداری بر کاهش سبزیگی (افزایش a^*) قابل مقایسه است (Rocha, Marty-Audouin, & Lebert, 1993).

اثر متقابل دو فاکتور زمان نگهداری و نوع بسته‌بندی بر پارامتر رنگی L^* ، b^* و a^* ریحان سبز معنی‌دار بودند. در این مطالعه با افزایش زمان نگهداری، مقدار هر سه پارامتر L^* ، a^* و b^* در نمونه‌های بسته‌بندی‌شده با اتمسفر اصلاح‌شده نسبت به بسته‌بندی‌های حاوی هوای معمولی کمتر بوده است. به بیان دیگر، افزایش زمان

نسبت داد که باعث باقی ماندن رنگ‌دانه‌های تیره در برگ و بروز رنگ‌های قرمز، قهوه‌ای و سیاه در برگ‌های سبز ریحان می‌شود (Patiño *et al.*, 2018). این نتایج با مطالعات بونیاکیات و بونپراسوم (Boonyakiat & Boonprasom, 2009) در تمامی پارامترهای رنگی و در پارامتر رنگی b^* هم‌خوانی دارد (Üner Öztürk & Koyuncu, 2021) (شکل ۱).

نگهداری باعث افزایش سیاهی برگ‌های ریحان (کاهش پارامتر L^*) و کاهش سبزیگی (مثبت‌تر شدن پارامتر a^*) و افزایش شدت رنگ آبی (منفی شدن پارامتر b^*) شده است که می‌تواند به دلیل افزایش فرآیند تنفس برگ‌های ریحان و تخریب بیشتر رنگ‌دانه‌های گیاهی و ساختار کلروفیلی باشد. تغییرات ایجادشده در پارامترهای رنگی سبزی ریحان را می‌توان به واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی ناشی از اکسیداسیون ترکیبات فنولی موجود در برگ ریحان توسط آنزیم پلی‌فنل اکسیداز



شکل ۱- اثر متقابل متغیرهای نوع بسته‌بندی و زمان نگهداری بر تغییرات پارامترهای رنگی نمونه‌های ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Fig. 1. The interaction effect of packaging type and storage time variables on changes in color parameters of fresh basil samples stored at refrigerator temperature

علاوه بر این، کوستا و همکاران (Costa, Montano, Carrión, 2013) نشان دادند که استفاده از پالس‌های نوری با شدت کم در دمای محیط می‌تواند روند پیری پس از برداشت برگ‌های ریحان را به تأخیر اندازد. آن‌ها گزارش کردند که نگهداری در تاریکی منجر به کاهش کلروفیل و پروتئین و بروز علائم ظاهری پیری (تیره شدن) شد، در حالی که قرارگیری روزانه در معرض پالس‌های نوری شدت این علائم را کاهش داد. این یافته تأکید می‌کند که علاوه بر بسته‌بندی و ترکیبات مورد استفاده به عنوان پوشش خوراکی، تعیین شرایط محیطی و بسیاری از فاکتورهای جزئی دیگر می‌تواند بر روند پیری، تخریب کلروفیلی و تغییر پارامترهای رنگی مؤثر باشد (Costa *et al.*, 2013).

درصد آسیب سطحی می‌بیند. در مراحل انتهایی و تخریب کامل برگ، ابتدا یک پنجم برگ سبز دچار آسیب شده و این فرآیند قهوه‌ای شدن در تمام برگ گیاه گسترده می‌شود (Aharoni *et al.*, 2010). اثر متقابل زمان نگهداری و نوع بسته‌بندی اختلاف آماری معنی‌داری در پارامتر قهوه‌ای شدن ایجاد کرده است ($p < 0.05$). فرآیند قهوه‌ای شدن برگ‌های ریحان پس از ۱۲ روز نگهداری در بسته بندی‌های حاوی اتمسفر اصلاح‌شده نسبت به هوای معمولی افزایش یافته است که دلیل این امر می‌تواند ناشی از تخریب بیشتر برگ‌های ریحان و در نتیجه از بین رفتن تعادل ترکیب گازی شود که منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز و سایر آنزیم‌های اکسیداتیو و تشدید این فرآیند شود. مکانیسم مهار سیستمین بر قهوه‌ای شدن آنزیمی را می‌توان به تعامل این اسید آمینه با آنزیم پلی‌فنل اکسیداز (PPO) نسبت داد. دوغان و همکاران (Dogan, 2007) در مطالعه‌ای بر روی آنزیم PPO استخراج‌شده از ریحان نشان دادند که ال-سیستئین یک مهارکننده قوی برای این آنزیم محسوب می‌شود و مدل مهار آن به

علاوه بر این، کوستا و همکاران (Costa, Montano, Carrión, 2013) نشان دادند که استفاده از پالس‌های نوری با شدت کم در دمای محیط می‌تواند روند پیری پس از برداشت برگ‌های ریحان را به تأخیر اندازد. آن‌ها گزارش کردند که نگهداری در تاریکی منجر به کاهش کلروفیل و پروتئین و بروز علائم ظاهری پیری (تیره شدن) شد، در حالی که قرارگیری روزانه در معرض پالس‌های نوری شدت این علائم را کاهش داد. این یافته تأکید می‌کند که علاوه بر بسته‌بندی و ترکیبات مورد استفاده به عنوان پوشش خوراکی، تعیین شرایط محیطی و بسیاری از فاکتورهای جزئی دیگر می‌تواند بر روند پیری، تخریب کلروفیلی و تغییر پارامترهای رنگی مؤثر باشد (Costa *et al.*, 2013).

تعیین شاخص‌های قهوه‌ای شدن

قهوه‌ای شدن فرآیندی پنج مرحله‌ای است که در طی این فرآیند برگ‌های سبز گیاه به صورت تدریجی دچار تغییر رنگ می‌شوند. در ابتدا برگ‌ها کاملاً سبز و عاری از تیرگی هستند؛ سپس بافت برگ حدود ۵

معمولی کمتر بوده است ($p < 0.05$). مطالعات دیگر حاکی از آن است که در صورت بهینه‌سازی ترکیب گازی، MAP می‌تواند نقش مؤثری در کنترل قهوه‌ای شدن ایفا کند. بر اساس گزارش برودی و همکاران (Brody, Zhuang, & Han, 2010)، تنظیم دقیق غلظت اکسیژن و دی‌اکسیدکربن در بسته‌بندی محصولات تازه‌برش‌خورده می‌تواند با کاهش شدت تنفس و کاهش تولید اتیلن، از فعال‌شدن آنزیم‌های اکسیداتیو مانند PPO جلوگیری کرده و روند قهوه‌ای شدن را به تأخیر اندازد. به نظر می‌رسد در پژوهش حاضر، غلظت گازهای درون بسته در پایان دوره نگهداری به حدی رسیده که تعادل لازم برای مهار تنفس را از دست داده و در نتیجه باعث تشدید قهوه‌ای شدن شده است (Brody et al., 2010).

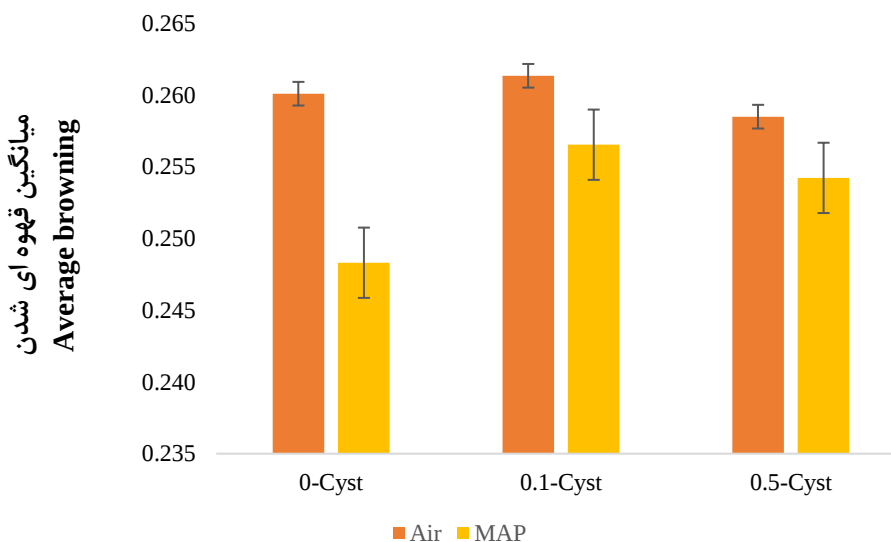
ارزیابی حسی

افزایش دوره نگهداری و غلظت پوشش سیستئین اختلاف آماری معنی‌داری در هر سه پارامتر حسی بو، بافت و طعم ایجاد کرده است ($p < 0.05$). اثر متقابل نوع بسته‌بندی و غلظت سیستئین در پارامترهای حسی معنی‌دار بوده است ($p < 0.05$). استفاده از پوشش باعث ایجاد یک‌لایه‌ی نازک نیمه‌تراوا در محصول شده که باعث کنترل افت وزن، شدت تنفس و واکنش‌های زیستی برگ‌های سبز می‌شود (Mansouri, 2016).

صورت رقابتی (competitive inhibition) است. این یافته تأیید می‌کند که سیستئین با اتصال به جایگاه فعال آنزیم، از اتصال سوبستراهای فنولی جلوگیری کرده و در نتیجه از تشکیل ترکیبات رنگی تیره ممانعت به عمل می‌آورد (Dogan et al., 2007).

همچنین اثر متقابل نوع بسته‌بندی و غلظت سیستئین معنی‌دار بوده است ($p < 0.05$). اثر ترکیبی پوشش خوراکی و بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده در مهار قهوه‌ای شدن، پیش‌تر در سایر محصولات نیز تأیید شده است. زینگ و همکاران (Xing et al., 2010) در مطالعه‌ای روی ریشه نیلوفر تازه‌برش‌خورده نشان دادند که تیمار ترکیبی پوشش کیتوزان حاوی عوامل ضدقهوه‌ای شدن همراه با بسته‌بندی MAP، به‌طور معنی‌داری فعالیت آنزیم PPO و محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) را کاهش داده و بالاترین امتیاز کیفیت ظاهری را در پایان دوره نگهداری به همراه داشت. آن‌ها گزارش کردند که مقدار L^* در نمونه‌های تیمار ترکیبی پس از ۸ روز نگهداری، $68/8$ بود؛ در حالی که این مقدار برای نمونه شاهد به $48/9$ کاهش یافت که نشان‌دهنده حفظ روشنایی و جلوگیری از تیره‌شدن است. این نتایج تأیید کننده یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص اثر هم‌افزایی سیستئین و بسته‌بندی MAP در کاهش قهوه‌ای شدن ریحان است (Xing et al., 2010).

با توجه به شکل ۲ و جدول ۳ افزایش غلظت سیستئین اثر قابل‌توجهی در کاهش قهوه‌ای شدن داشته که در بسته‌بندی‌های اتمسفر اصلاح‌شده‌ی غیرفعال نسبت به بسته‌بندی‌های حاوی هوای



شکل ۲- اثر متقابل متغیرهای غلظت سیستئین و نوع بسته‌بندی بر تغییرات میزان قهوه‌ای شدن نمونه‌های ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Fig. 2. The interaction effect of cysteine concentration variables and packaging type on changes in the browning rate of fresh basil samples stored at refrigerated temperature

جدول ۳- اثر متقابل متغیرهای غلظت سیستئین، نوع بسته‌بندی و زمان نگهداری بر تغییرات قهوه‌ای شدن نمونه‌های ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Table 3- The interaction effect of cysteine concentration, packaging type and storage time variables on changes in browning scores of fresh basil samples stored at refrigerated temperature

زمان نگهداری Storage time	نوع بسته‌بندی Package type	غلظت سیستئین Cysteine concentration	میزان قهوه‌ای شدن Browning content
روز صفر Day 0	هوای معمولی Air	0.00%	0.26 ± 0.00 ^{aA}
		0.1%	0.26 ± 0.00 ^{aB}
		0.5%	0.26 ± 0.00 ^{aAB}
	اتمسفر اصلاح شده MAP	0.00%	0.26 ± 0.00 ^{aA}
		0.1%	0.26 ± 0.00 ^{aB}
		0.5%	0.26 ± 0.00 ^{aAB}
روز پنجم Day 5	هوای معمولی Air	0.00%	0.26 ± 0.00 ^{bA}
		0.1%	0.26 ± 0.00 ^{bB}
		0.5%	0.25 ± 0.0 ^{bAB}
	اتمسفر اصلاح شده MAP	0.00%	0.23 ± 0.00 ^{bA}
		0.1%	0.25 ± 0.00 ^{bB}
		0.5%	0.24 ± 0.00 ^{bAB}
روز نهم Day 9	هوای معمولی Air	0.00%	0.26 ± 0.00 ^{bA}
		0.1%	0.25 ± 0.00 ^{bB}
		0.5%	0.25 ± 0.0 ^{bAB}
	اتمسفر اصلاح شده MAP	0.00%	0.23 ± 0.01 ^{bA}
		0.1%	0.24 ± 0.00 ^{bB}
		0.5%	0.25 ± 0.0 ^{bAB}
روز دوازدهم Day 12	هوای معمولی Air	0.00%	0.24 ± 0.01 ^{bA}
		0.1%	0.25 ± 0.00 ^{bB}
		0.5%	0.25 ± 0.0 ^{bAB}
	اتمسفر اصلاح شده MAP	0.00%	0.26 ± 0.00 ^{bA}
		0.1%	0.25 ± 0.00 ^{bB}
		0.5%	0.25 ± 0.0 ^{bAB}

*اعداد میانگین حاصل از سه تکرار بوده و مقایسه میانگین‌ها با حرف یکسان اختلاف معنی‌داری نداشته‌اند.

*The average number of the results of three repetitions and the comparison of the averages with the same letters have no significant difference ($P < 0.05$).

سیستئین در بسته‌بندی، در روزهای نگهداری مشابه، منجر به افزایش پایداری پارامترهای حسی شده است (شکل ۳ و جدول ۴). نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های علیرضالو و همکاران (Alirezalou, Tavakolian, & Jafarpour, 2018) بر پوشش‌دهی توت‌فرنگی با کیتوزان و عصاره چای سبز مطابقت داشت و در کم‌ترین غلظت مورد استفاده در پوشش‌دهی، خصوصیات حسی در پایان روز نگهداری مطلوب‌تر از نمونه‌ی شاهد بود. بررسی‌های منصوری (Mansouri, 2016) نیز بر روی سبزی ریحان با پژوهش حاضر هم‌خوانی داشت.

نتیجه‌گیری

امروزه به دلیل تغییر سبک زندگی و نیاز به صرفه‌جویی بیشتر در زمان، افراد به دنبال محصولات آماده مصرف هستند. هدف از این پژوهش ارائه‌ی راهکار مناسب برای حفظ کیفیت، ارزش غذایی و افزایش عمر نگهداری این محصول، به عنوان سبزی پرمصرف و محبوب به صورت تازه‌خوری بود؛ در حال حاضر کوتاه بودن زمان نگهداری سبزی ریحان و افزایش ضایعات و از دست رفتن ارزش غذایی بالای این محصول از چالش‌های استفاده آن می‌باشد.

افزایش غلظت سیستئین به ۰/۱ درصد سبب افزایش قابل‌توجهی در امتیازات حسی شده است؛ در حالی که با تغییر غلظت سیستئین به ۰/۵ درصد امتیازات خصوصیات حسی کاهش پیدا کرد؛ بنابراین استفاده از غلظت‌های پایین‌تر پوشش سیستئین می‌تواند پارامترهای حسی برگ‌های ریحان را بهتر حفظ کند. استفاده از بسته‌بندی‌های اتمسفر اصلاح‌شده هم‌زمان با افزایش غلظت سیستئین، اثر مشابهی داشت. در غلظت‌های ثابت از سیستئین، استفاده از اتمسفر اصلاح‌شده منجر به تضعیف خصوصیات حسی برگ‌های ریحان تحت نگهداری شده است. علت این امر را می‌توان غیرفعال بودن بسته‌ی حاوی اتمسفر اصلاح‌شده و نشت ترکیبات معطر موجود در برگ‌های ریحان دانست. اثر متقابل نوع بسته‌بندی و زمان نگهداری و همچنین اثر متقابل زمان نگهداری و غلظت سیستئین نیز بر این پارامترها معنی‌دار بوده است ($p < 0.05$). نتایج نشان داد با افزایش دوره نگهداری، پارامترهای حسی کاهش پیدا کردند و پس از ۱۲ روز نگهداری نمونه‌ها غیرقابل مصرف بوده‌اند که دلیل آن ایجاد بوی نامطبوع در طی اکسیداسیون اکسیداسیون ترکیباتی مانند اسید فنولی روزمارینیک اسید، کوئرتستین و اسید کلروژنیک و تخریب ساختار ریحان بوده است (Suh & Park, 2010) و تخریب ساختار ریحان بوده است. در حالی که استفاده از غلظت‌های یکسان

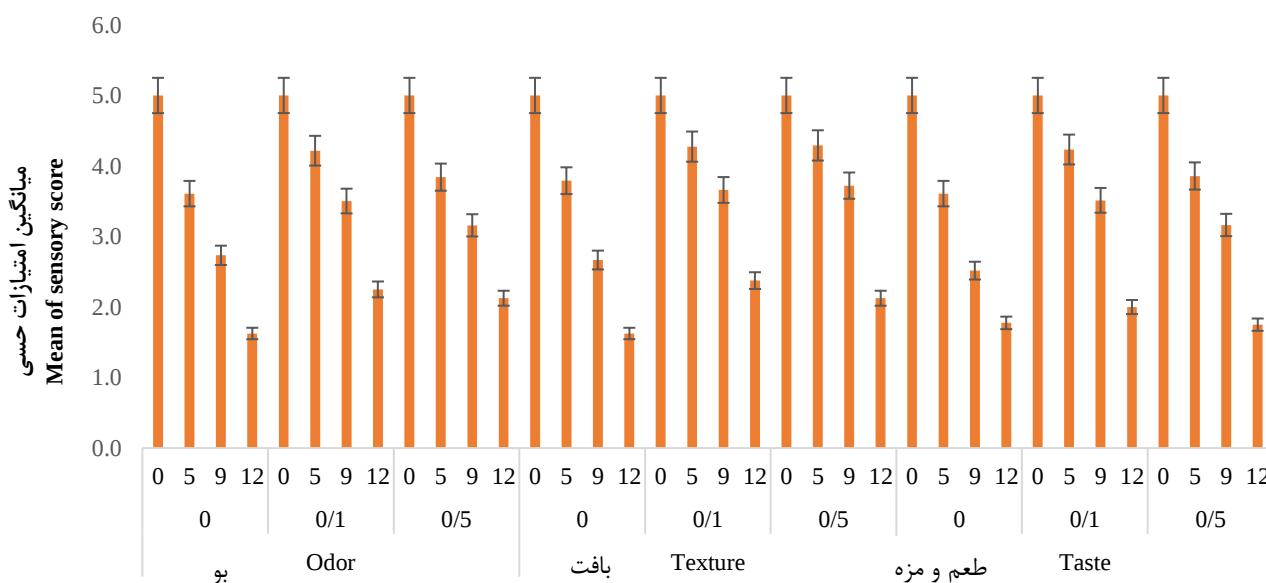
جدول ۴- اثر متقابل متغیرهای غلظت سیستئین و نوع بسته‌بندی بر تغییرات امتیازات حسی نمونه‌های ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Table 4- The interaction effect of cysteine concentration and packaging type variables on changes in sensory scores of fresh basil samples stored at refrigerated temperature

پارامتر حسی Sensory parameter	غلظت سیستئین Cystein concentration(%)	نوع بسته‌بندی Type of packaging	میانگین $\pm$ خطای استاندارد Standard error $\pm$ Mean
بو (Smell)	0	Air	3.79 $\pm$ 0.01
		MAP	2.69 $\pm$ 0.01
	1.0	Air	4.48 $\pm$ 0.01
		MAP	3.00 $\pm$ 0.01
	0.5	Air	4.24 $\pm$ 0.01
		MAP	2.81 $\pm$ 0.01
بافت (Teture)	0	Air	3.75 $\pm$ 0.03
		MAP	2.79 $\pm$ 0.03
	0.1	Air	4.54 $\pm$ 0.03
		MAP	3.11 $\pm$ 0.03
	0.5	Air	4.33 $\pm$ 0.03
		MAP	3.23 $\pm$ 0.03
طعم و مزه (Taste)	0	Air	3.73 $\pm$ 0.01
		MAP	2.71 $\pm$ 0.01
	0.1	Air	4.34 $\pm$ 0.01
		MAP	3.03 $\pm$ 0.01
	0.5	Air	4.05 $\pm$ 0.01
		MAP	2.82 $\pm$ 0.01

*اعداد میانگین حاصل از سه تکرار بوده و مقایسه میانگین‌ها با حرف یکسان اختلاف معنی‌داری نداشته‌اند.

*The average number of the results of three repetitions and the comparison of the averages with the same letters have no significant difference ($P < 0.05$).



اثر متقابل غلظت سیستئین* زمان نگهداری

Interplay effect of cysteine concentration*storage time

شکل ۳- اثر متقابل متغیرهای غلظت سیستئین و زمان نگهداری بر تغییرات امتیازات حسی نمونه‌های ریحان تازه نگهداری شده در دمای یخچال

Fig. 3. The interaction effect of cysteine concentration and storage time variables on changes in sensory scores of fresh basil samples stored at refrigerator temperature

نگهداری توصیه می‌شود. این امر می‌تواند به کاهش ضایعات بخش کشاورزی و زنجیره تأمین سبزی ریحان که کشت و حفظ تازگی آن مشکلات فراوانی را به همراه دارد، مورد استفاده قرار گرفته و منجر به افزایش مصرف سبزی‌های بسته‌بندی به‌عنوان محصول تازه‌خوری و آماده شود.

منابع تأمین مالی

این پروژه تحقیقاتی توسط دانشگاه فردوسی مشهد طی طرح پژوهشی به شماره ۵۹۵۴۲ حمایت مالی شده است.

میزان مشارکت نویسندگان

نوروزی جاجرم: مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، انجام آزمون‌ها، نوشتن - پیش‌نویس اصلی. **صداقت:** تأمین مالی، مدیریت پروژه، نظارت، بررسی و ویرایش. **تقی زاده:** نظارت، بررسی و ویرایش.

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان داد که استفاده از سیستمین به همراه بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال می‌تواند در حفظ ویژگی‌های فیزیکی‌وشیمیایی، حسی و افزایش زمان نگهداری سبزی ریحان مؤثر باشد. کاربرد هم‌زمان سیستمین و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده باعث کنترل و کاهش سرعت واکنش‌های متابولیکی در سبزی ریحان تازه شد که در نتیجه آن از تغییرات نامطلوب بیشتر در افت وزن نمونه‌ها، قهوه‌ای شدن و خصوصیات حسی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد جلوگیری شد. در آزمون حسی که توسط پنلیست‌های آموزش دیده انجام گردید نتایج نشان داد که استفاده از غلظت پایین‌تر سیستمین، خصوصیات حسی ریحان را بهتر حفظ کرد. در نهایت، با توجه به کاهش یافتن هزینه‌های تولید سبزی ریحان بسته‌بندی شده به روش مذکور و اثرگذاری مطلوب آن در نگهداری برگ‌های ریحان بدون ایجاد آسیب‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و شیمیایی نسبت به سایر روش‌های نوین بسته‌بندی همچون استفاده از فیلم‌های بسته‌بندی گران‌تر، استفاده از سیستمین در غلظت ۰/۱ درصد و بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده غیرفعال برای سبزی ریحان تازه به‌منظور حفظ کیفیت و افزایش زمان

References

1. A, R., Sheikhloie, H., & A.R, Y. (2016). The effect of modified atmosphere packaging and propolis on some characteristics of spinach cultivar "Varamin 88" during storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 13, 2015. (In Persian)
2. Aharoni, N., Kenigsbuch, D., Chalupowicz, D., Faura-Mlinski, M., Aharon, Z., Maurer, D., & Lers, A. (2010). Reducing chilling injury and decay in stored sweet basil. *Israel Journal of Plant Sciences*, 58(3-4), 167–181. <https://doi.org/10.1560/IJPS.58.3-4.167>
3. Ahmadi-Roshan, M., Berenji Ardestani, S., Ghotbi Kohan, K., Rafiee, R., Saeedi, F., Bathaie, M., & Zarrin, E. (2022). Gamma radiation processing under modified atmosphere packaging effects on microbial quality and antioxidant activity of fresh leafy vegetables during storage. *Journal of Nuclear Research and Applications*, 2(2), 41–46. <https://doi.org/10.24200/jon.2022.1019>
4. Ali, A., Maqbool, M., Ramachandran, S., & Alderson, P.G. (2010). Gum arabic as a novel edible coating for enhancing shelf-life and improving postharvest quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 58(1), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.05.005>
5. Alirezalou, K., Tavakolian, R., & Jafarpour, P. (2018). The effect of postharvest application of chitosan coating containing green tea extract on the quality characteristics and shelf life of Selva strawberry fruit. <https://sid.ir/paper/363683/en>
6. Altunkaya, A., & Gökmen, V. (2008). Effect of various inhibitors on enzymatic browning, antioxidant activity and total phenol content of fresh lettuce (*Lactuca sativa*). *Food Chemistry*, 107(3), 1173–1179. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.09.046>
7. Anita Rami, louie, H.S., & Yousefi, A. (2016). The effect of modified atmosphere packaging (MAP) and propolis on some characteristics of spinach cultivar "Varamin 88" during storage. *Quarterly Journal of Food Science and Technology*, 13(61). (In Persian)
8. Ayhan, Z., Eştürk, O., & Taş, E. (2008). Effect of modified atmosphere packaging on the quality and shelf life of minimally processed carrots. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(1), 57–64. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol32/iss1/7>
9. Bakmohammadpour, M., Peyghambaroust, S.H., & Alirezalou, K. (2021). Processing basil with long shelf life using a new disinfection method. (In Persian)
10. Berry, A.D., Sargent, S.A., & Huber, D.J. (2010). Effect of postharvest application of 1-MCP on basil shoot quality during storage at chilling temperature. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:99934133>

11. Boonyakiat, D., & Boonprasom, P. (2009). *Effect of vacuum cooling and packaging on physico-chemical properties of Red'holy basil*. Paper presented at the VI International Postharvest Symposium 877. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.54>
12. Brody, A.L., Zhuang, H., & Han, J.H. (2010). *Modified atmosphere packaging for fresh-cut fruits and vegetables*: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470959145>
13. Caleb, O.J., Mahajan, P.V., Al-Said, F.A.-J., & Opara, U.L. (2013). Modified atmosphere packaging technology of fresh and fresh-cut produce and the microbial consequences—a review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(2), 303–329. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0932-4>
14. Chen, X., Liu, H., Zhou, J., Zhang, X., Xu, L., & Ding, K. (2022). China Patent No.
15. Costa, L., Montano, Y.M., Carrión, C., Rolny, N., & Guiamet, J.J. (2013). Application of low intensity light pulses to delay postharvest senescence of *Ocimum basilicum* leaves. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.017>
16. Danso-Boateng, E. (2013). Effect of drying methods on nutrient quality of basil (*Ocimum viride*) leaves cultivated in Ghana. *International Food Research Journal*, 20(4).
17. Dhall, R. (2013). Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(5), 435–450. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.541568>
18. Dogan, S., Turan, P., Dogan, M., Alkan, M., & Arslan, O. (2007). Inhibition kinetic of *Ocimum basilicum* L. polyphenol oxidase. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/S00217-006-0383-0>
19. Faraji, N.M., Farahnaki, A., Badii, F., & Hoseini, E. (2014). Study the of different treatments in control of browning in estahban intermediate moisture fig (cv.Sabz). *Food Science and Industry*, 12(47). <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-1559-en.htm>
20. Forget, F.R., Goupy, P., & Nicolas, J. (1992). Cysteine as an inhibitor of enzymatic browning. 2. Kinetic studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*(40), 2108–2113. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb14937.x>
21. Ghidelli, C., Mateos, M., Rojas-Argudo, C., & Pérez-Gago, M.B. (2014). Extending the shelf life of fresh-cut eggplant with a soy protein–cysteine based edible coating and modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, 95, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.04.007>
22. Hassan, F., Ali, E., Mostafa, N., & Mazrou, R. (2021). Shelf-life extension of sweet basil leaves by edible coating with thyme volatile oil encapsulated chitosan nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 517–525. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.159>
23. Hassan, F., & Mahfouz, S. (2010). Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on sweet basil leaf senescence and ethylene production during shelf-life. *Postharvest Biology and Technology*, 55(1), 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.07.008>
24. Hosseini-zhad, B., Nader, M., Ramezani, A., Niakousari, M., & Mazloomi, S.M. (2023). A combination of modified atmosphere packaging and two chemical disinfectants: Effects on microbial, sensory, and physicochemical properties of raw ready-to-eat leek. *Food Science & Nutrition*, 11(1), 148–156. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3047>
25. Imaizumi, T., Jitareerat, P., Laohakunjit, N., & Kaisangsri, N. (2021). Effect of microwave drying on drying characteristics, volatile compounds and color of holy basil (*Ocimum tenuiflorum* L.). *Agriculture and Natural Resources*, 55(1), 1–6. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/249283>
26. Kocira, A., Kozłowicz, K., Panasiewicz, K., Staniak, M., Szpunar-Krok, E., & Horthyńska, P. (2021). Polysaccharides as edible films and coatings: Characteristics and influence on fruit and vegetable quality—A Review. *Agronomy*, 11(5), 813. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/5/813>
27. Majidi, H., Minaei, S., Almassi, M., & Mostofi, Y. (2014). Tomato quality in controlled atmosphere storage, modified atmosphere packaging and cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2155–2161. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0721-0>
28. Manjunatha, M., & Anurag, R.K. (2014). Effect of modified atmosphere packaging and storage conditions on quality characteristics of cucumber. *Journal Food Science Technology*, 51(11), 3470–3475. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0840-7>
29. Manolopoulou, H., Xanthopoulos, G., Douros, N., & Lambrinos, G. (2010). Modified atmosphere packaging storage of green bell peppers: Quality criteria. *Biosystems Engineering*, 106(4), 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.06.003>
30. Mansouri, N. (2016). *Studying the effect of different plant extracts and packaging type on microbial load and post-harvest life of basil* (Master Research-based). Ferdowsi University, Mashhad. (In Persian)
31. Misir, J. (2014). *Aloe vera* gel as a novel edible coating for fresh fruits: A review. *American Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.12691/ajfst-2-3-3>

32. Moansouri, N., Kazemi, F., Bahreini, M., & Aroiee, H. (2020). Effect of extracts and packaging on microbial quality and antioxidant activity of basil. *Journal of Food Microbiology*, 6(4), 8–23. <https://sid.ir/paper/250752/en>
33. Moon, K.M., Kwon, E.-B., Lee, B., & Kim, C.Y. (2020). Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. *Molecules*, 25(12), 2754. <https://doi.org/10.3390/molecules25122754>
34. Nicola, S., Tibaldi, G., & Pignata, G. (2018). Potentiality of mint leaves as a ready-to-use product: Postharvest evaluation. *Acta Horticulturae*, 1209, 109–114. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1209.16>
35. Oliveira, M., Abadias, M., Usall, J., Torres, R., Teixidó, N., & Viñas, I. (2015). Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.017>
36. Parry, R. (2012). *Principles and applications of modified atmosphere packaging of foods*: Springer Science & Business Media. ISBN: 9781461521372
37. Patiño, L.S., Castellanos, D.A., & Herrera, A.O. (2018). Influence of 1-MCP and modified atmosphere packaging in the quality and preservation of fresh basil. *Postharvest Biology and Technology*, 136, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.10.010>
38. Pham, T.T., Nguyen, L.L.P., Dam, M.S., & Baranyai, L. (2023). Application of edible coating in extension of fruit shelf life: Review. *AgriEngineering*, 5(1), 520–536. <https://www.mdpi.com/2624-7402/5/1/34>
39. Phippen, W.B., & Simon, J.E. (1998). Anthocyanins in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(5), 1734–1738. <https://doi.org/10.1021/jf970887r>
40. Pulamte, L. (2008). Key issues in post harvest management of fruits and vegetables in India. *India Science and Technology: 2008: S&T for Rural India and Inclusive Growth*.
41. Rocha, T., Marty-Audouin, C., & Lebert, A. (1993). Effect of drying temperature and blanching on the degradation of chlorophyll a and b in mint (*Mentha spicata* Huds.) and basil (*Ocimum basilicum*): Analysis by high performance liquid chromatography with photodiode array detection. *Chromatographia*, 36(1), 152–156. <https://doi.org/10.1007/BF02263853>
42. Rohani, M., & Sedaghat, N. (2019). The effect of active modified atmosphere packaging and coating of lactate calcium on the quality of vegetable Salad. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286675.1398.10.40.4.4>
43. Rouhani, M. (2018). *The effect of activated modified atmosphere and calcium lactate coating on the quality of mixed vegetable salad*. (Master Research-base). Ferdowsi University, Mashhad. (In Persian)
44. Salemi, B., Sedaghat, N., Varidi, M.J., Mousavi, S.M., & Tabatabaei Yazdi, F. (2021). The combined impact of calcium lactate with cysteine pretreatment and perforation-mediated modified atmosphere packaging on quality preservation of fresh-cut 'Romaine' lettuce. *Journal of Food Science*, 86(3), 715–723. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15619>
45. Sessa, M., Ferrari, G., & Donsi, F. (2015). Novel edible coating containing essential oil nanoemulsions to prolong the shelf life of vegetable products. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 55–60. <https://doi.org/10.3303/CET1543010>
46. Shiekh, R.A., Malik, M.A., Al-Thabaiti, S.A., & Shiekh, M.A. (2013). Chitosan as a novel edible coating for fresh fruits. *Food Science and Technology Research*, 19(2), 139–155. <https://doi.org/10.3136/fstr.19.139>
47. Suh, B.-S., & Park, M.-H. (2010). Measurement of antioxidation substances in basil. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 20(1), 54–59.
48. T.F.A. El-Moghazy. (2021). Effect of packaging and cold storage on the quality of sweet basil Herb. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 11(03), 11. <https://doi.org/10.36632/mejas/2021.11.3.50>
49. Teodosio, A.E.M.M., Araújo, R.H.C.R., Santos, B.G.F.L., Linné, J.A., da Silva Medeiros, M.L., Onias, E.A., . . . de Lima, J.F. (2021). Effects of edible coatings of *Chlorella* sp. containing pomegranate seed oil on quality of *Spondias tuberosa* fruit during cold storage. *Food Chemistry*, 338, 127916. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127916>
50. Towanabut, M.A. Extending the shelf life of thai sacred basil (*Ocimum sanctum* Linn.) in fresh and dried forms.
51. Üner Öztürk, K., & Koyuncu, M.A. (2021). Effects of ozone and salicylic acid on post-harvest quality of parsley during storage. *Biological Agriculture & Horticulture*, 37(3), 183–196. <https://doi.org/10.1080/01448765.2021.1937316>
52. Xing, Y., Li, X., Xu, Q., Jiang, Y., Yun, J., & Li, W. (2010). Effects of chitosan-based coating and modified atmosphere packaging (MAP) on browning and shelf life of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaerth). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 684–689. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.07.006>
53. Yan, D., Liu, X., Chen, Z., Wang, Y., Zhang, M., Zhang, T., & Wang, J. (2023). A double-layered self-healing coating system based on the synergistic strategy of cysteine and iron polyacrylate for corrosion protection. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138995. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138995>

Review Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 405-430

A Review on Edible Raw Materials that Can Be Used in Food 3D Printers

H. Lashkari^{1*}, Sh. Esmailzadeh^{2,3}

1- Department of Food Science and Technology, Zard.C., Islamic Azad University, Zarindasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: Hannan.lashkari@iau.ac.ir)

2- Department of Chemistry, Dar.C., Islamic Azad University, Darab, Iran

3- Sadra Additive Manufacturing Laboratory, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 07.02.2026

Revised: 15.06.2026

Accepted: 27.06.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Lashkari, H., & Esmailzadeh, Sh. (2026). A review on edible raw materials that can be used in food 3D printers. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 405-430. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97516.1546>

Introduction

The Food and Agriculture Organization (FAO) estimates that by 2050, food production must increase by 70% to feed the world's projected 9.9 billion people. Consequently, the development of novel and innovative solutions to address existing challenges and improve food sustainability has become crucial. Three D food printing (3DFP) is an emerging technology in the food industry, categorized as an additive manufacturing method, which serves as an innovative alternative to conventional production technologies. This technology offers freedom in customized production and greater flexibility in product design based on consumer demand. 3D food printing holds the potential to produce highly customized foods in terms of shape, texture, flavor, structure, and nutritional value, while enabling the creation of unique formulations and edible alternatives. Given its advantages over traditional methods, 3DFP is increasingly attracting the attention of academia and industry; it is plausible that it may replace current food production methods in the near future. These printers operate via various mechanisms, most notably extrusion, powder bed fusion, binder jetting, and inkjet printing. This study discusses the raw materials suitable for food 3D printers.

Methods

A standard search methodology was employed across several databases, including ScienceDirect, Scopus, PubMed, Google Scholar, and ISC. The selection criteria focused on articles published between 2009 and 2025 concerning food applications of additive manufacturing technology. Ultimately, 64 articles were selected and reviewed.

Results and Discussion

The results indicate that raw materials for 3DFP are generally categorized into three groups: natively printable, non-printable, and alternative materials.

Natively printable materials can be further classified into three sub-groups: sugars and confectionery products, dough-based foods and pastes, and food gels. Hydrogels, oleogels, pastry cream, cheese, hummus, ice cream, chocolate, powdered sugars, and starch-based ingredients belong to this category. The composition of these materials—specifically the ratio of carbohydrates, lipids, proteins, and fibers—is critical in determining the printability and final quality of the edible structures, often requiring minimal pre-processing.

The second category includes materials that are not naturally printable and thus require specific pre-processing, such as the addition of food additives or blending with suitable printable materials, to achieve printability. Traditional foods, such as vegetables and fruits (rich in fiber), meat products (protein sources), 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.2026.97516.1546>

items with high moisture content, can be challenging to print because they often contain lower amounts of structural components like carbohydrates, proteins, and fats. However, these foods are valuable sources of fiber, antioxidants, vitamins, and minerals essential for human health. By incorporating hydrocolloids into non-printable materials and adjusting their rheological properties—such as viscosity, concentration, and flowability—these materials can be rendered printable. Hydrocolloids are hydrophilic polymers containing hydroxyl groups that typically possess polysaccharide or protein structures and may originate from plants, seaweed, animals, or microorganisms. Furthermore, the use of additives such as egg yolk, egg white, starch, and rice, wheat, or millet flours can enhance the printability of non-printable materials.

The third category includes alternative materials such as insects, algae, mushrooms, and lupin seeds, which are rich in nutrients but are generally considered unconventional food sources. Additionally, waste streams and by-products from food processing lines—such as fruit and vegetable peels, meat scraps, and fish parts—can be effectively utilized as raw materials for 3D printing. Constructing 3D structures from these alternative sources can significantly reduce carbon dioxide emissions and serve as a promising solution to global hunger, particularly regarding malnutrition among infants and adolescents. Furthermore, food printing enables value creation from food waste, contributing to a greener circular economy.

In the long term, 3D printing is expected to transform food production by integrating multiple processing stages into a single unit and simplifying the supply chain. This study comprehensively addresses the printability and classification of food raw materials used in 3D printing.

Keywords: Alternative materials, Natively printable foods, Non-printable, Printability

مقاله مروری

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۴۳۰-۴۰۵

مروری بر مواد اولیه خوراکی قابل استفاده در دستگاه‌های چاپگر سه‌بعدی غذایی

حنان لشکری^{۱*} - شیدا اسمعیل زاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

چکیده

چاپ سه‌بعدی یک فناوری نوین در صنعت غذاست که در دسته روش‌های ساخت افزایشی قرار می‌گیرد. این فناوری با استفاده از طراحی دیجیتال و بهره‌گیری از مواد اولیه خوراکی (جوهرهای خوراکی)، ساختارهای پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که تولید آن‌ها با قالب‌ها و روش‌های معمول ممکن نیست. چاپگرهای سه‌بعدی روش‌های عملیاتی متفاوتی دارند که از میان آن‌ها، چاپگرهای مبتنی بر اکستروژن، تفجوشی انتخابی با لیزر، تزریق چسب و جوهرافشان، کاربرد بیشتری در صنعت غذا دارند. ماهیت و ترکیبات تشکیل دهنده مواد اولیه، معیاری اساسی برای سنجش توانایی ذاتی «قابلیت چاپ» و تعیین کیفیت نهایی سازه‌های خوراکی محسوب می‌شود؛ در این میان، کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، پروتئین‌ها و فیبرها نقش پررنگ‌تری بر قابلیت چاپ دارند. مواد اولیه برای چاپ به سه دسته تقسیم می‌شوند: مواد قابل چاپ، مواد غیرقابل چاپ و مواد جایگزین. مواد قابل چاپ، مانند: شکلات، پنیر، خامه قنادی و هیدروژل‌ها، به تنهایی قابلیت چاپ دارند و در هنگام فرآیند، به پیش‌پردازش کمتری نیاز دارند. دسته دوم موادی هستند که به خودی خود قابل چاپ نیستند و برای تبدیل شدن به فرم قابل چاپ، به پیش‌پردازش‌های خاصی (مانند اضافه کردن افزودنی‌های غذایی یا ترکیب با مواد قابل چاپ) نیاز دارند. دسته سوم، مواد جایگزین هستند که شامل منابع غذایی غیرمعمول مانند حشرات، جلبک‌ها، قارچ‌ها، دانه‌های لوبی و ضایعات کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی می‌شوند. این مطالعه مروری است بر قابلیت چاپ مواد اولیه، نقش ترکیبات در این فرآیند و طبقه‌بندی مواد اولیه مصرفی در چاپ سه‌بعدی.

واژه‌های کلیدی: قابلیت چاپ، غذاهای قابل چاپ، غذاهای غیرقابل چاپ، مواد جایگزین

مقدمه

غذا جزء ضروری زندگی است که از درشت‌مغذی‌ها و ریزمغذی‌های مختلف تشکیل شده است. ترکیب یک رژیم غذایی، نقش مهمی در تأمین نیازهای بدن و انرژی مورد نیاز روزانه ایفا می‌کند. درشت‌مغذی‌ها شامل کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و فیبرهای غذایی هستند؛ از سوی دیگر، ویتامین‌ها و مواد معدنی نیز در دسته ریزمغذی‌ها قرار می‌گیرند. امروزه با توجه به سبک زندگی پرمشغله‌ای که داریم،

الگوهای غذایی در حال تغییر هستند (Phan & Stodolska, 2019). تدوین یک رژیم غذایی مناسب، بدون به خطر انداختن نیازهای تغذیه‌ای فرد، از ضرورت‌های روزمره است. چاپ سه‌بعدی غذا، فناوری جدیدی در صنعت غذا است که در دسته روش‌های ساخت افزایشی^۵ قرار می‌گیرد و جایگزینی نوآورانه برای فناوری‌های مرسوم در تولید مواد غذایی محسوب می‌شود.

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد زرین‌دشت، دانشگاه آزاد اسلامی، زرین‌دشت، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: Hannan.lashkari@iau.ac.ir

۲- گروه شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران

۳- آزمایشگاه ساخت افزایشی صدرا، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

محققان دستورالعمل‌های چاپ را به دو دسته طبقه‌بندی کرده‌اند: دسته اول بر اساس میزان هر یک از اجزای غذا و دسته دوم بر اساس دستورالعمل‌های سنتی موجود. دستورالعمل‌های مبتنی بر اجزاء، بر اساس مجموعه‌ای از مواد و فرمولاسیون‌های استاندارد از پیش تعیین‌شده هستند که فرآورده بر پایه آن‌ها تولید می‌شود. پژوهشگران مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)، آزمایش‌هایی را بر روی دستورالعمل‌های چاپ مبتنی بر اجزاء با استفاده از سه نوع چاپگر^۶ انجام داده‌اند. در دسته دوم، هدف از تولید غذای سفارشی، اصلاح دستورالعمل‌های چاپ موجود است؛ نمونه‌هایی از این دسته شامل ساخت شکلات‌های سفارشی و مجسمه‌های قندی است (Anandharamakrishnan, Moses, & Anukiruthika, 2022).

تمایل مصرف‌کننده به استفاده از دستورالعمل‌های جدید، تحت تأثیر پنج عامل کلیدی قرار دارد که عبارت‌اند از: قیمت تمام‌شده، راحتی و در دسترس بودن، طعم و مزه مطلوب، تجربه و سابقه مصرف‌کننده، و ارزش تغذیه‌ای. یک نظرسنجی آمریکایی در مورد عادات غذایی نشان داد که ۴۷ درصد از مصرف‌کنندگان به سالم بودن غذا حساس‌اند، ۳۵ درصد به مواد تشکیل‌دهنده غذا توجه دارند، و سایر افراد نسبت به این موضوعات بی‌تفاوت‌اند (Sun, Zhou, Huang, & Yan, 2018a). الگوهای غذایی نامناسب، محدودیت‌های مالی و زمانی و در دسترس بودن غذا موجب شده است که بسیاری از مصرف‌کنندگان جوان به گزینه‌های سریع و کم‌مغذی موجود در فروشگاه‌ها روی آورند. به‌منظور ارائه غذای سالم و مغذی، می‌توان از چاپ سه‌بعدی برای تهیه برنامه‌های غذایی فردی، متناسب با سن، شغل و انتخاب شخصی، استفاده کرد. از سوی دیگر، غذاهای آماده یا سفارشی در دسترس، مقادیر قابل‌توجهی از مواد مغذی مورد نیاز را تأمین نمی‌کنند. از این‌رو، نسل‌های کنونی و آینده به جایگزین‌های غذایی سالم نیاز دارند؛ زیرا به‌دلیل مصرف مواد آلرژی‌زا یا عادات غذایی غیرقابل پیش‌بینی، بسیاری از جوانان، به‌ویژه افراد ۱۸ تا ۳۰ ساله، به‌طور فزاینده‌ای از سوءتغذیه، چاقی و بیماری‌های مرتبط مانند دیابت رنج می‌برند. این فناوری از طریق فرمولاسیون شخصی می‌تواند برای تولید برنامه‌های غذایی و وعده‌های غذایی ویژه افراد با رژیم‌های خاص، با عنوان «غذاهای سالم آینده»، مورد استفاده قرار گیرد (Sundarsingh, Zhang, Mujumdar, & Li, 2024).

علاوه بر این، این فناوری قادر است ذائقه مصرف‌کننده را تغییر داده و با تولید غذاهایی با محتوای کمتر از چربی، قند و نمک، به کاهش

ساخت افزایشی را بر اساس اصول عملیاتی و نوع مواد مورد استفاده، به هفت روش تقسیم‌بندی می‌کنند که عبارتند از: فتوپلیمریزاسیون مخزنی (VPP)^۱، اکستروژن مواد (ME)^۲، تفجوشی بستر پودری (PBF)^۳، تزریق چسب (BJ)^۴، تزریق مواد یا چاپ جوهرافشان (IJP)^۵، رسوب مستقیم انرژی (DED)^۶ و ساخت ورقه‌ای (SL)^۷. هر یک از این روش‌ها دارای فناوری‌های گوناگون هستند که کاربران، براساس نیاز خود می‌توانند فناوری مناسب و برتر را انتخاب کنند (Esmailzadeh, 2023). رایج‌ترین روش‌ها در صنعت غذا شامل روش‌های مبتنی بر اکستروژن، روش تفجوشی بستر پودری، چاپ جوهرافشان و تزریق چسب می‌باشد که در میان آن‌ها، فرآیند چاپ مبتنی بر اکستروژن، کاربرد بیشتری دارد (Shah, Shah, Shrestha, & Mitra, 2024). فناوری اکستروژن یک فرآیند عملی پیچیده، کامل و بسیار انعطاف‌پذیر است و در این فرآیند یک ماده خام درون یک محفظه تحت یک یا چند نوع شرایط اختلاط؛ دما، فشار و برش قرار گرفته و در نهایت فرآورده از دستگاه خارج می‌شود (Lashkari, 2025a). چاپ مواد غذایی شامل سه مرحله است: ایجاد مدل سه‌بعدی، چاپ محصولات و انجام فرآیندهای پس از چاپ؛ مانند افزودن طعم و مزه، سرخ کردن، پختن و جوشاندن (Agunbiade et al., 2022).

چاپگرهای سه‌بعدی دارای انواع پیکربندی‌های دکارتی، دلتا، قطبی و اسکارا هستند که از این میان، پیکربندی‌های دکارتی، دلتا و تعداد محدودی از انواع قطبی در صنعت غذا کاربرد دارند (Lashkari & Esmailzadeh, 2025c). این فناوری مزایای متعددی را ارائه می‌دهد؛ از جمله انعطاف‌پذیری فوق‌العاده در ساخت، کاهش ریسک تولید محصولات نوآورانه، آزادی عمل بیشتر در استفاده از منابع غذایی جدید مانند: مواد جایگزین، کاهش هزینه تولید، تولید بر اساس تقاضا مشتری یا شخصی‌سازی محصولات، کاهش ضایعات و اثرات مخرب زیست‌محیطی. به دلایل ذکر شده، توجه بخش‌های دانشگاهی، تجاری و صنعتی را به خود جلب کرده است و امروزه کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، نساجی، الکترونیک، هوانوردی، ساختمان و معماری، پزشکی، داروسازی، دندانپزشکی و صنایع غذایی یافته است. دور از انتظار نیست که در آینده نزدیک، جایگزین روش‌های امروزی تولید مواد غذایی شود (Lashkari, & Esmailzadeh, 2025c و Esmailzadeh, Vaghefi, Esmailzadeh, & Tavallali, 2025).

6- Direct Energy Deposition

7- Sheet Lamination

8 - Virtuoso Mixer™, Robotic™ Chef, Digital Fabricator™

1- Vat Photo Polymerization

2- Material Extrusion

3- Powder Bed Fusion

4- Binder Jetting

5- Material Jetting or Inkjet Printing

مواد قوی تر است (ماده الاستیک تر)، بوده و هرچه مقدار آن کوچک تر باشد، قابلیت جریان ماده بیشتر (ماده ویسکوزتر) خواهد بود. بنابراین، ویژگی های رئولوژیکی نقش تعیین کننده ای در قابلیت اکستروژن و چاپ ایفا می کنند و ایجاد تعادل رئولوژیکی می تواند تضمین کند که جسم چاپ شده در عین حفظ شکل، تا حد ممکن مستحکم باشد تا اشکال پیچیده غذایی به درستی شکل بگیرند (Li et al., 2022). مواد غذایی باید در طول فرآیند اکستروژن قابلیت جریان داشته باشند و پس از چاپ نیز قادر به حمایت از ساختار خود برای تولید محصولات با ساختارهای پایدار باشند. پروتئین ها، چربی ها، نشاسته ها و هیدروژل ها دارای ماهیت چاپ پذیری هستند و بر اساس نحوه تغییر حالت خود در هنگام چاپ، به سه دسته تقسیم می شوند: مواد ژلی با تغییر فاز، مواد خمیری بدون تغییر فاز و مواد ذوب شونده با تغییر فاز (Daffner et al., 2020; Wilms, Daffner, Kern, Gras, & Kohlus, 2021). مواد ژلی به موادی اطلاق می شود که عمدتاً با تشکیل ژل، استحکام و ویسکوزیته را برای تکمیل فرآیند چاپ افزایش می دهند مانند پروتئین ها و هیدروژل ها (Warner, Norton, & Mills, 2019); مواد خمیری بدون تغییر فاز شامل موادی هستند که بدون تغییر فاز در طول فرآیند چاپ، قابل اکستروژن باشند مانند نشاسته (Lille, Nurmela, Nordlund, Metsa-Kortelainen, & Sozer, 2018); در نهایت، مواد ذوب شونده با تغییر فاز به موادی اشاره دارند که پس از گرم شدن از حالت جامد به مایع تبدیل شده و بلافاصله پس از اکستروژن، به سرعت جامد می شوند مانند کره کاکائو (Hao et al., 2010; Lille et al., 2018). علاوه بر این، این ترکیبات می توانند ویسکوزیته و رئولوژی مواد قابل چاپ را تغییر داده و حتی قابلیت چاپ موادی که به راحتی قابل چاپ نیستند (مانند فیبرها) را بهبود بخشند (Li et al., 2022).

ترکیبات مؤثر در قابلیت چاپ مواد غذایی

کربوهیدرات ها

کربوهیدرات ها ترکیبات آلی هستند که از قندهای ساده، الیگوساکاریدها و پلی ساکاریدها (نشاسته ای و غیر نشاسته ای) تشکیل شده اند. پلی ساکاریدها نسبت به سایر ترکیبات، به زمان بیشتری برای

کالری دریافتی کمک کند (Prakash, Bhandari, Godoi, & Zhang, 2019). طراحی های مختلف ریزساختاری در مواد غذایی می تواند تراکم پرشدگی متفاوتی در فرآورده ایجاد کند که منجر به ایجاد حس دهانی^۱ متمایزی می شود. این فرآیند در مقیاس میکرو، امکان افزودن ترکیبات زیست فعال به فرآورده های چاپ سه بعدی را نیز فراهم می آورد. افزون بر این، تولید غذاهای با بافت اصلاح شده برای افراد مبتلا به اختلالات بلع نیز از طریق این فناوری امکان پذیر شده است. تمامی این مزایای بالقوه در چاپ مواد غذایی، به توسعه فرآورده های غذایی مناسب با ارزش اقتصادی بالا منجر می گردد. انتخاب مواد اولیه در فرمولاسیون فرآورده، یکی از جنبه های حیاتی است که قابلیت چاپ را تعیین می کند. مواد اولیه برای چاپ غذای سه بعدی به سه دسته «قابل چاپ»^۲، «غیرقابل چاپ»^۳ و «مواد جایگزین»^۴ تقسیم می شوند. تاکنون در کشور بررسی های مشخصی در زمینه معرفی مواد اولیه قابل استفاده در چاپگرهای سه بعدی صورت نگرفته است؛ از این رو، ما در این مطالعه تلاش می کنیم تا به بحثی عمیق درباره قابلیت چاپ مواد اولیه غذایی و طبقه بندی مواد مصرفی در چاپگرهای سه بعدی بپردازیم.

قابلیت چاپ

قابلیت چاپ به توانایی ذاتی ماده برای مقاومت در برابر وزن خود هنگام رسوب بر روی بستر چاپ اشاره دارد (Kim, Bae, & Park, 2018). ماده ای که چاپ مناسبی دارد، باید از ثبات ابعادی و مکانیکی کافی برخوردار باشد تا پس از فرآیند چاپ، شکل خود را حفظ کند. ماهیت و خواص مواد اولیه، یک معیار اساسی در تعیین کیفیت نهایی سازه های خوراکی چاپ شده است. در این میان، ویژگی های رئولوژیکی مواد غذایی برای ارزیابی و بهبود قابلیت چاپ و توانایی خودپشتیبانی^۵ در چاپ سه بعدی، به ویژه در روش های مبتنی بر اکستروژن، حیاتی هستند. از ویژگی های رئولوژیکی شامل تنش تسلیم (τ_0)^۶، مدول الاستیک (یانگ) (G')^۷ و ویسکوزیته (μ)^۸ برای توصیف رفتار ماده استفاده می شود. مقدار بیشتر τ_0 نشان دهنده نیاز به نیروی اکستروژن بیشتر برای ایجاد جریان در ماده و همچنین بیانگر استحکام مکانیکی بالاتر مواد است. مقدار بیشتر G' نیز نشان دهنده قدرت مکانیکی بیشتر مواد و توانایی خودپشتیبانی بهتر مواد است. μ نشان دهنده توانایی اتصال مواد است؛ به طوری که هرچه مقدار μ بزرگتر باشد، توانایی اتصال

(مقدار نیروی اولیه مورد نیاز جهت به حرکت درآوردن سیال)

7- Elastic Modulus

(نسبت تنش به کرنش در ناحیه الاستیک جسم است و نشان دهنده بودن ویژگی جامد بودن ماده است).

8- Viscosity

(مقاومت درونی سیال در مقابل جریان یافتن)

1- Mouthfeel

2- Printable

3- Non printable

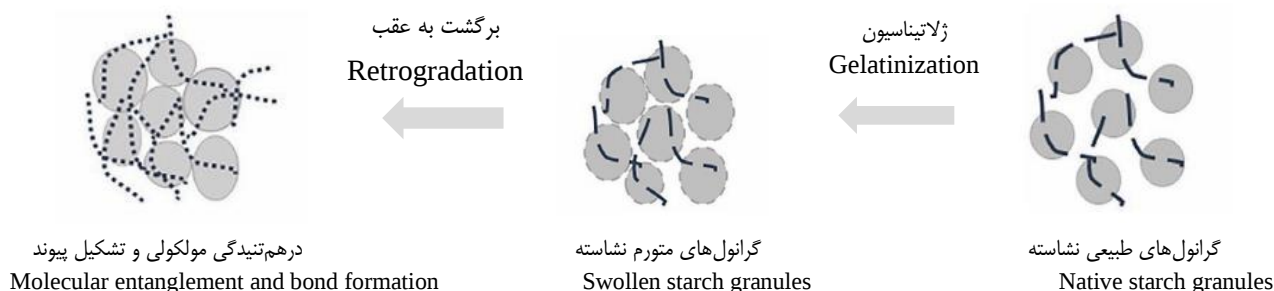
4- Alternative materials

5- Self-Supporting

6- Yield Stress

مواد غذایی مناسب‌تر می‌کند. در مقایسه با سایر ترکیبات غذایی، کربوهیدرات‌ها، به‌ویژه نشاسته، تمایل بیشتری به ژلاسیون دارند (شکل ۱) و از این طریق، قوام و جریان‌پذیری ماده را متعادل کرده و رسوب لایه‌ای سازه‌های سه‌بعدی را تنظیم می‌کنند (Anandharamakrishnan *et al.*, 2022).

هضم نیاز دارند و پاسخ گلیسمی^۱ پایین‌تری ایجاد می‌کنند. نشاسته از آمیلوز خطی و آمیلوپکتین شاخه‌دار با پیوندهای گلوکوزیدی، و از واحدهای گلوکز ساخته شده است. پلی‌ساکاریدهای غیرنشاسته‌ای نیز به دو دسته سلولزی و غیرسلولزی (پکتین و همی‌سلولز) تقسیم می‌شوند که بخش عمده‌ای از دیواره سلولی گیاهان را تشکیل می‌دهند. شبکه پلیمری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پلی‌ساکاریدها، آن‌ها را برای چاپ

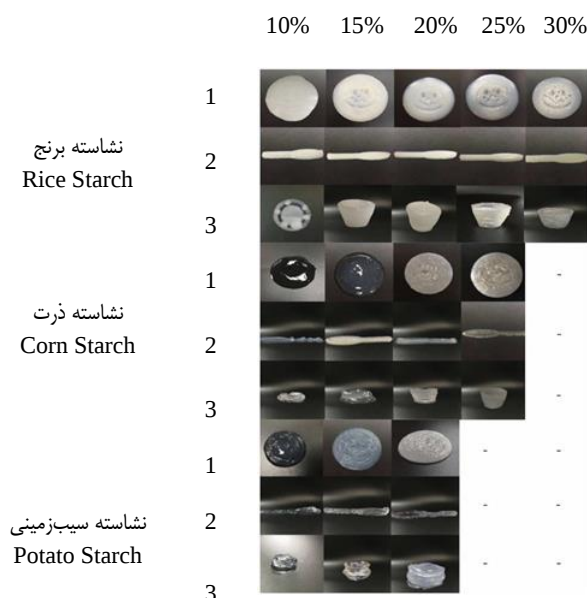


شکل ۱- مکانیسم ژلاتینه‌شدن گرانول‌های نشاسته (Anandharamakrishnan *et al.*, 2022)

Fig. 1. Gelation mechanism of starch granules (Anandharamakrishnan *et al.*, 2022)

چگالی همپوشانی زنجیره‌های مولکولی و تقویت برهمکنش میان زنجیره‌ها و پیوندهای هیدروژنی می‌شود. این امر می‌تواند باعث کاهش اندازه ساختار شبکه‌ای تشکیل‌شده و متراکم‌تر شدن شبکه کل سیستم گردد.

مطالعاتی درباره مقایسه سیستم‌های مختلف نشاسته، از جمله نشاسته برنج، ذرت و سیب‌زمینی، گزارش شده است (شکل ۲). نتایج نشان داد که قابلیت چاپ به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ترمورئولوژیکی سیستم‌های نشاسته‌ای قرار دارد که این ویژگی‌ها بسته به منبع نشاسته متفاوت‌اند. افزایش غلظت نشاسته موجب افزایش



شکل ۲- غلظت‌های مختلف نمونه‌های نشاسته‌ای چاپ شده به روش سه‌بعدی با استفاده از فرآیند اکستروژن ذوب داغ (Chen *et al.*, 2019a)

Fig. 2. Different concentrations of 3D printed starch samples using hot-melt extrusion (Chen *et al.*, 2019a)

(میزان افزایش قند خون بعد از مصرف یک ماده غذایی حاوی ۵۰ گرم گلوکز)

1- Glycemic index (GI)

آن ها شامل تنظیم فعالیت های فیزیولوژیکی، حفظ pH طبیعی، عمل به عنوان پیام رسان شیمیایی و ذخیره سازی است. بقولات و حبوبات منبع خوبی از پروتئین های گیاهی هستند. پروتئین های حاصل از منابع حیوانی نیز شامل تخم مرغ، گوشت قرمز، میگو، ماهی و فرآورده های لبنی مانند پنیر و پودر آب پنیر می باشند. بر اساس پروفایل اسید آمینه، پروتئین های حیوانی به عنوان پروتئین های کامل و پروتئین های گیاهی به دلیل کمبود یک یا چند اسید آمینه ضروری، ناقص در نظر گرفته می شوند. عوامل مختلفی بر عملکرد و دسترس پذیری پروتئین ها تأثیر می گذارند، از جمله گرما، pH (اسید/باز) و هیدرولیز آنزیمی که منجر به دناتوره شدن، تجمع و اتصال متقابل آن ها می شوند. این عوامل به نوبه خود بر قابلیت چاپ آن ها تأثیر می گذارند (Anandharamakrishnan et al., 2022).

برای افزایش قابلیت چاپ پروتئین ها، سه روش اصلی عبارتند از: پیوند عرضی شیمیایی، پیوند عرضی یونی و تشکیل ژل. این روش ها می توانند پروتئین ها را به تشکیل ساختار ژل مانند ترغیب کرده و استحکام مکانیکی و توانایی خودپشتیبانی آن ها را افزایش دهند. علاوه بر این، رسوب در نقطه ایزوالکتریک نیز می تواند برای تشکیل مواد چاپ سه بعدی مورد استفاده قرار گیرد. پروتئین ها در نقطه ایزوالکتریک تجمع می یابند که این ویژگی، برای مواد چاپ سه بعدی مبتنی بر مایع^۲، عملکردی کلیدی است. تجمع ناشی از برهمکنش بین رشته ها و پروتئین های اصلاح شده آنزیمی نیز می تواند ساختارهای خودپشتیبان تشکیل دهد (Li et al., 2022).

فرمولاسیون غنی از ایزوله پروتئین سویا با بهره گیری از خواص عملکردی ترکیب همزمان ژلاتین با آلژینات سدیم برای چاپگر سه بعدی ساخته شد که ساختاری پایدار به سازه های سه بعدی بخشید. برهمکنش های فیزیکی پیوندهای پپتیدی ژلاتین به همراه نمک های آلژینات سدیم در دمای ذوب آن می تواند شبکه ای مشبک را تشکیل دهد و استحکام مخلوط چاپ را فراهم آورد. افزایش غلظت ژلاتین تأثیر قابل توجهی بر جریان پذیری ماده داشت که به نوبه خود منجر به بهبود سختی و قابلیت جویدن ژل های ایزوله پروتئین سویا شد. بنابراین، ایزوله پروتئین سویا همراه با ژلاتین، با وضوح بهتر قابل چاپ بود (Chen et al., 2019b). پروتئین ها را می توان لایه به لایه با مواد پلی ساکارییدی مانند آلژینات روی هم چید. ترانس گلوتامیناز می تواند تشکیل پیوند کووالانسی بین لیزین و گلوتامین را در حضور کلسیم کاتالیز کند و استحکام ژل و خواص بافتی آن را افزایش دهد و قابلیت چاپ آن را بهبود بخشد. به عنوان مثال، پروتئین های موجود در گوشت چرخ کرده می توانند با ایجاد پیوند عرضی آنزیمی، هیدروژل های

با این حال، هنگامی که غلظت نشاسته از ۳۰ درصد فراتر رود، فشردگی سازی مواد دشوارتر می شود و این مسئله می تواند بر کیفیت چاپ تأثیر منفی بگذارد. از آنجا که نشاسته ژلاتینه نشده در اثر گرم شدن طی پردازش پس از چاپ متورم، دناتوره و ژلاتینه می شود، و همچنین تورم اکستروژنی اغلب هنگام عبور مواد ویسکوالاستیک از نازل با قطر کم رخ می دهد، که هر دو می توانند به تخریب محصول نهایی منجر شوند، بنابراین بهتر است مواد نشاسته ای پس از ژلاتینه شدن چاپ شوند. در عین حال، قطر نازل باید بیش از ۰/۸ میلی متر باشد تا اثر چاپ بهتری حاصل شود. محققان دریافتند که استفاده از ۲۵ درصد نشاسته ذرت، ۱۵ درصد نشاسته سیب زمینی یا ۲۰ درصد نشاسته برنج در چاپ سه بعدی می تواند محصولی خوش فرم با ساختار یکنواخت و متراکم، استحکام ژل بالاتر و تعداد لایه های چاپ بیشتر ایجاد کند (Chen, Xie, Chen, & Zheng, 2019a). این نتایج نشان می دهد که نشاسته ویژگی های یک جوهر مناسب برای چاپ سه بعدی، همراه با انعطاف پذیری بالا، را دارد.

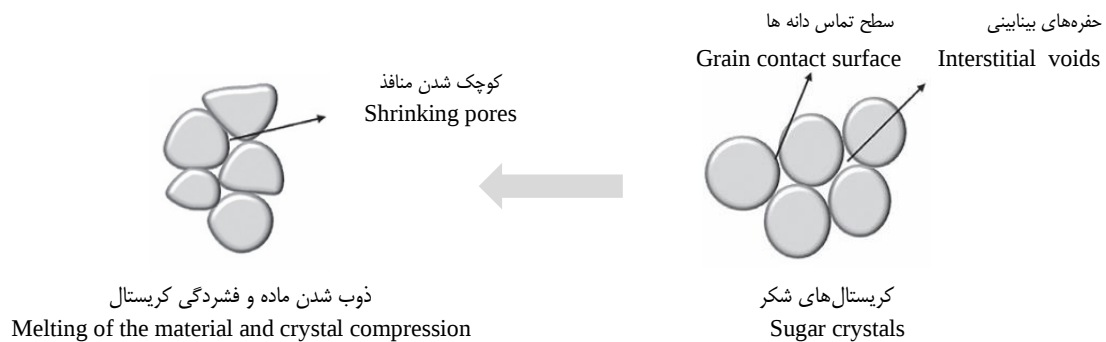
در فرآیند چاپ سه بعدی شکر، از روش تفجوشی استفاده می شود که شامل حرارت دهی ذرات جامد تا نقطه ذوب آن ها است و در نتیجه، اتصالاتی میان فضاهای خالی بین دانه ها ایجاد می شود (شکل ۳) (Southerland, Walters, & Huson, 2011). این روش، روشی اقتصادی و انعطاف پذیر برای درون پوشانی ترکیبات فعال در مواد غذایی پودری مانند شکر به شمار می رود. در این فرآیند، ساختار کریستالی ساکارز از حالت کریستال کامل به کریستال های متراکم یا تجمع یافته نامنظم تغییر می کند؛ در نتیجه، شبکه ای متخلخل ایجاد می شود که می توان ماده فعال دیگری را در آن جای داد و یک فرآورده عملکردی تولید کرد (Lashkari, 2025b). در این حالت، حفره های مولکولی باز می شوند و با اعمال حرارت و فشار جزئی، ذرات به یکدیگر جوش می خورند. چاپ سه بعدی قندها تا حد زیادی به ویژگی هایی مانند تبلور، نقطه ذوب، منبع و میزان گرمایش، دمای انتقال شیشه ای (T_g)^۱، تراکم پذیری، حلالیت و چگالی ماده بستگی دارد. این پارامترها تأثیر زیادی بر تخلخل سازه های ساخته شده دارند و از این رو می توان بافت آب نبات های چاپ شده را کنترل کرد (Sun, Zhou, Huang, Fuh, & Hong, 2015).

پروتئین ها

پروتئین ها گروه پیچیده ای از بیوپلیمرها هستند که از اسیدهای آمینه خطی و منشعب تشکیل شده اند و از طریق پیوندهای پپتیدی به یکدیگر متصل می شوند. پروتئین ها نقش حیاتی در یکپارچگی ساختاری دیواره های سلولی و سفتی بافت ها دارند. سایر نقش های عملکردی

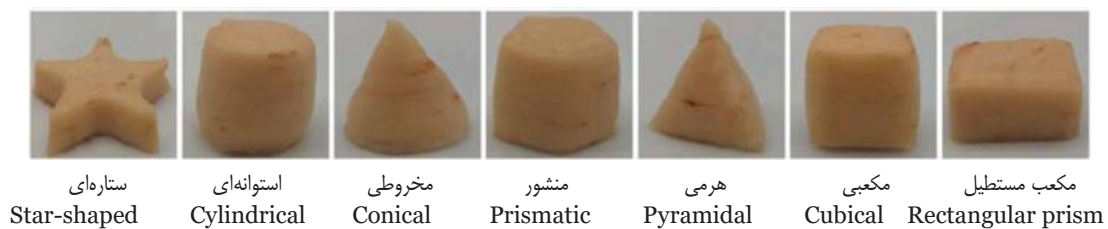
سه‌بعدی دارند. در مطالعه‌ای دیگر، قابلیت چاپ سوریمی میگو مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). پارامترهای مناسب چاپ و روش پردازش حرارتی مطلوب تعیین شدند و محققان توانستند محصولات چاپ سه‌بعدی در اشکال مختلف با ارزش افزوده بالا از سوریمی میگو تولید کنند (Pan et al., 2024).

خودپشتیبان تولید کنند که سختی، الاستیسیته و دقت چاپ را افزایش داده و اثر چاپ را بهبود می‌بخشد. محصول حاصل، ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی متراکم‌تر و فشرده‌تری خواهد داشت، احتباس آب بهتری نشان می‌دهد و اثر چاپ را تقویت می‌کند (Zhao et al., 2020). این موارد نشان می‌دهد که پروتئین‌ها پتانسیل بالایی به‌عنوان ماده‌ی چاپ



شکل ۳- فرآیند تفجوشی (Southerland et al., 2011)

Fig. 3. Sintering process (Southerland et al., 2011)



شکل ۴- چاپ سه‌بعدی سوریمی میگو در شکل‌های متفاوت (Pan et al., 2024)

Fig. 4. 3D printing of surimi shrimp in different shapes (Pan et al., 2024)

خواص فیزیکی مطلوب‌تری دارند؛ به‌گونه‌ای که می‌توانند در دمای ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شوند و با سرد شدن، برای نگهداری بهتر به حالت جامد درآیند. برای مثال، کره کاکائو می‌تواند در مدت‌زمان کوتاهی پس از سرد شدن جامد شود و یک لایه خودپشتیبان تشکیل دهد (Rando, & Ramaioli, 2020).

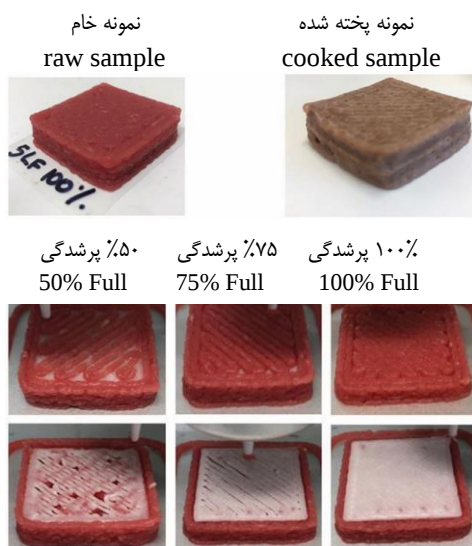
در راستای تحلیل اثر چربی‌های حاصل از منابع مختلف حیوانی بر قابلیت چاپ، مطالعه‌ای انجام شده است. در این مطالعه، چربی اشباع نامطلوب موجود در گوشت گاو حذف شد و چربی غیراشباع خوک (۳۹ درصد چربی غیراشباع) به‌صورت یک لایه جداگانه و با استفاده از چاپ سه‌بعدی در ساختار گوشت گاو گنجانده شد. این پژوهش اثر و میزان چربی گوشت خوک را به‌عنوان لایه‌های میانی بر قابلیت چاپ گوشت گاو ارزیابی می‌کند (شکل ۵). لیپیدها مسئول جریان یکنواخت خمیر گوشت رشته‌ای از طریق نازل چاپ هستند. همچنین، لایه‌های چربی قرارگرفته بین لایه‌های گوشت، به دلیل ناپایداری گلوله‌های چربی در حین عملیات حرارتی، با یکدیگر ادغام می‌شوند و به‌طور متناسب سختی

لیپیدها

یکی دیگر از اجزای اصلی مواد غذایی که به قابلیت چاپ کمک می‌کند، لیپیدها هستند. لیپیدها عمدتاً به‌صورت چربی یا روغن وجود دارند و برای ذخیره انرژی در بدن انسان ضروری‌اند. این مواد از اسیدهای چرب، تری‌گلیسریدها و فسفولیپیدها تشکیل شده‌اند. بر اساس وجود پیوندهای دوگانه در زنجیره کربنی، اسیدهای چرب به اشباع و غیراشباع طبقه‌بندی می‌شوند. منابع گیاهی چربی شامل دانه‌های روغنی، آجیل و میوه‌ها مانند زیتون، نخل و آووکادو هستند، در حالی که منابع حیوانی مانند گوشت، ماهی (از جمله ماهی سالمون و ماکرل)، تخم‌مرغ و فرآورده‌های لبنی مانند کره و مارگارین دارای مقادیر قابل توجهی چربی‌اند. عوامل مختلفی که بر عملکرد چربی تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از انجماد/ذوب‌پذیری، ساختار کریستالی/چندریختی، اندازه گلوله، استریفیکاسیون، درجه هیدروژناسیون، ترکیب اسیدهای چرب و نحوه توزیع آن‌ها در تری‌گلیسریدها (Devi, & Khatkar, 2016). چربی‌های اشباع‌شده

لیپیدها بافتی خامه ای به مخلوط چاپ می بخشند و تشکیل خمیر را افزایش می دهند. این اثر به دلیل وجود کریستال های β اسیدهای چرب است که از اشکال α و β پایداری دارند.

و جویدنی بودن نمونه های پخته شده را کاهش می دهند (Dick, Bhandari, & Prakash, 2019). چربی ها و روغن ها به عنوان برجسته ترین مواد در تنظیم ویژگی های فیزیکوشیمیایی مواد اولیه برای چاپ سه بعدی در نظر گرفته می شوند. همراه با سایر ترکیبات غذایی،



شکل ۵- گوشت چاپ شده سه بعدی: (۱) نمونه های خام و پخته شده، (۲) خمیر گوشت چاپ شده و لایه های میانی چربی خوک (Dick et al., 2019).
Fig. 5. Multi-material 3D printed meat (1) Raw and cooked samples, (2) 3D printed meat paste and lard interlayers (Dick et al., 2019)

مطالعات اندکی در زمینه بررسی چالش های پیچیده در چاپ سه بعدی فیبرها گزارش شده است. لیل و همکاران پژوهشی را برای توسعه ساختارهای سه بعدی جدید با فرمولاسیون های غنی از فیبر و پروتئین، همراه با کاهش محتوای چربی و قند، انجام دادند. ترکیبات مخلوط چاپ شامل نشاسته، فیبر نانوسلولزی و پودر شیر بود که به صورت تکی و ترکیبی برای دستیابی به ساختارهای سه بعدی پایدار پس از چاپ مورد آزمایش قرار گرفتند. در راستای بهبود قابلیت چاپ، ماتریس ژلی با استفاده از نانوفیبرهای سلولزی تقویت شد. نتایج نشان داد که در سیستم های حاوی فیبر، جریان مواد در سیستم ژلی به صورت ناپیوسته است؛ به نظر می رسد ذرات درشت تر فیبر باعث مسدود شدن نازل چاپ، جدایش فاز و لخته شدن مواد می شوند. این مطالعه ارزیابی مقایسه ای از مواد تشکیل دهنده ارائه داده و نشان می دهد که چاپ سه بعدی فیبر در مقایسه با سیستم های غذایی مبتنی بر نشاسته و پروتئین، با دشواری های به مراتب بیشتری همراه است (Lille et al., 2018). در پژوهشی دیگر، استفاده از مواد غذایی مبتنی بر سلول^۱ همچون اسفناج خشک شده به روش انجمادی، به عنوان «جوهر

فیبر غذایی

امروزه رفاه و غذای سالم موجب جذابیت و تمایل به رژیم غذایی غنی از فیبر شده است. فیبرهای غذایی گروهی از قسمت علفی غیرقابل هضم یک وعده غذایی هستند که از اجزای کربوهیدرات تشکیل شده اند که توسط آنزیم های روده هیدرولیز نمی شوند و دارای عملکرد حیاتی در تنظیم فیزیولوژی طبیعی بدن انسان هستند (Zinina, Merenkova, Tazeddinova, & Rebezov, 2019). بخش قابل توجهی از فیبرهای غذایی در یک رژیم غذایی منظم به حفظ سلامت روده با کاهش بروز بیماری های مرتبط با سبک کاری کم تحرکی مانند: بیماری های قلبی عروقی، دیابت و چاقی کمک می کند. بر اساس حالیت، این بخش از پلیمرهای کربوهیدراتی غیرقابل هضم به عنوان محلول و نامحلول طبقه بندی می شوند. دسته اول فیبر غذایی محلول، شامل: پکتین، صمغ ها و موسیلاژهای دانه ها است در حالی که گروه دوم فیبر غذایی نامحلول، شامل: سلولز، همی سلولز و لیگنین است (Dai & Chau, 2017).

(غذاهای کشت یافته یا آزمایشگاهی حاصل از رشد سلول های حیوانی، گیاهی یا میکروبی در شرایط کنترل شده)

بر این اساس، مواد غنی از فیبر به دلیل ماهیت ذاتی خود، «غیرقابل چاپ» محسوب شده و برای دستیابی به عملکرد مطلوب، نیازمند کاهش اندازه ذرات، هیدراسیون بهینه و ترکیب با هیدروکلوئیدها هستند.

غذایی» در چاپ سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر اندازه ذرات بر عملکرد چاپ ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودن ۱۰ درصد (وزنی/وزنی) صمغ زانتان، ظرفیت نگهداری آب در اسفناج را بهبود می بخشد. همچنین، ذرات با ابعاد بزرگ تر، پایداری مکانیکی سازه های چاپی را افزایش دادند (شکل ۶) (Lee, Won, Kim, Park, 2019).



شکل ۶- اثر اندازه ذرات بر چاپ سه بعدی پودر اسفناج فیبری: (۱) ۳۰۷ μm، (۲) ۲۵۹ μm، (۳) ۱۷۲ μm و (۴) ۵۰ μm (Lee et al., 2019)

Fig. 6. Effect of particle size on 3D printing of fibrous spinach powder:
(1)307 μm, (2)259μm, (3)172 μm, (4)50μm (Lee et al., 2019)

به افزودن عوامل اتصال دهنده^۱، برای فرآیند چاپ آماده می سازد. این دسته شامل هیدروژل ها، خامه قنادی، پنیر، خمص، بستنی، پودر شکر و مواد اولیه بر پایه ی نشاسته است (Sun, Zhou, Yan, Huang, & Lin, 2018b). قابلیت چاپ مطلوب در این مواد، تا حد زیادی به پارامترهایی نظیر مقدار ماده جامد کل، درصد پرشدگی، ویژگی های رئولوژیکی، استحکام مکانیکی، تنش تسلیم مناسب، مدول الاستیک (G') بالا، ویسکوزیته ی بالا و تانژانت اتلاف پایین بستگی دارد؛ عواملی که همگی برای حفظ پایداری ساختار محصول نهایی ضروری هستند (Hussain, Malakar, & Arora, 2022). اگرچه این مواد قابلیت چاپ بالایی دارند، اما لزوماً به عنوان یک وعده ی غذایی کامل مطرح نیستند؛ از این رو، برای دستیابی به فرآورده هایی با ارزش تغذیه ای مطلوب، بهینه سازی فرمولاسیون ضروری است. با توجه به ماهیت متنوع مواد غذایی، ارائه ی یک سیستم طبقه بندی واحد برای تمامی مواد قابل چاپ دشوار است. از این رو، تقسیم بندی جامعی از این مواد بر اساس منبع و نوع ترکیب پایه ی سیستم غذایی در جدول ۱ ارائه شده است (Anandharamakrishnan et al., 2022).

مواد اولیه بر پایه شکر (قندها و شیرینی جات)

مواد مبتنی بر شکر، به دلیل انعطاف پذیری بالا و آزادی عمل گسترده در فرآیند تولید، جایگاه ویژه ای در چاپ سه بعدی دارند. این دسته شامل انواع محصولات قنادی است که با سطوح بالای سفارشی سازی قابل چاپ هستند. برای نمونه، شکلات به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک متشکل از پودر کاکائو، شیر خشک و چربی،

طبقه بندی مواد اولیه غذایی بر اساس قابلیت چاپ

بر اساس ماهیت و قابلیت چاپ مواد اولیه، اجزای مورد استفاده در چاپ سه بعدی را می توان به سه دسته ی مواد ذاتاً قابل چاپ، مواد غیرقابل چاپ، و مواد جایگزین طبقه بندی کرد (Sun et al., 2018a). دسته ی نخست شامل مواد ذاتاً قابل چاپ مانند شکلات، پنیر، خامه قنادی، هیدروژل ها و موارد مشابه است که به طور طبیعی و بدون نیاز به افزودنی های خاص، قابلیت چاپ دارند. این دسته از مواد معمولاً به فرآیند آماده سازی کمتری پیش از چاپ نیاز دارند. دسته ی دوم شامل مواد غذایی رایج مانند غلات اصلی، میوه ها و سبزیجات، تخم مرغ و فرآورده های گوشتی است. این مواد اگرچه در رژیم غذایی روزمره متداول اند، اما به تنهایی قابل چاپ نیستند و برای تبدیل شدن به فرم قابل چاپ، نیازمند پیش پردازش هایی مانند افزودن مواد کمکی یا ترکیب با درصد مناسبی از مواد ذاتاً قابل چاپ هستند. در این میان، استفاده از هیدروکلوئیدهای غذایی به عنوان افزودنی، رایج ترین راهبرد برای بهبود چاپ پذیری مواد غیرقابل چاپ به شمار می رود. دسته ی سوم نیز شامل مواد جایگزین مانند حشرات، جلبک ها، قارچ ها و دانه های لوپین است که با وجود برخورداری از ارزش تغذیه ای مناسب، در بسیاری از فرهنگ ها به عنوان غذاهای غیرمعارف شناخته می شوند (Sun et al., 2015).

مواد اولیه غذایی قابل چاپ

همان طور که پیش تر اشاره شد، مواد اولیه ی «ذاتاً قابل چاپ» از ویژگی های ویسکوالاستیک مطلوبی برخوردارند که آن ها را بدون نیاز

(Lanaro, Desselle, & Woodruff, 2019). نخستین گزارش از چاپ سه بعدی ساختارهای قندی با استفاده از فناوری تفجوشی توسط اسکای و ادمان، (Oskay, & Edman, 2009).

قابلیت چاپ با استفاده از روش‌های اکستروژن، تفجوشی انتخابی با لیزر و جوهرافشان را دارد که نشان‌دهنده تنوع کاربردی آن است. در فرآیند تفجوشی انتخابی با لیزر، با تجمع پودرهای بلور شکر و کاکائو و طی تغییرات فاز و ساختاری، سازه‌های سه‌بعدی تولید می‌شوند.

جدول ۱- طبقه‌بندی گسترده‌ای از مواد قابل چاپ
Table 1- Broad classification of printable materials

مواد چاپ پذیر Natively printable materials				
ژل‌های غذایی Food gels		غذاهای خمیری / خمیرها Food dough/Pastes		قندها و شیرینی جات Sugars and confectioneries
الئوژل‌ها Oleogels	هیدروژل‌ها Hydrogels	خمیری ترکیبی Composite dough	مبتنی بر پروتئین Protein-based	مبتنی بر غلات Cereal-based
	برپایه پروتئین Protein-based			
	برپایه نشاسته Starch-based			

بر سطح غذاها با استفاده از شکلات طراحی شده است. برخلاف روش‌های مبتنی بر پودر، چاپ جوهرافشان امکان تولید محصولاتی با طعم و بافت بسیار مشابه با غذاهای سنتی را فراهم می‌کند. در نهایت، پیاده‌سازی فناوری‌های نوین چاپ سه‌بعدی در حوزه فرآورده‌های قندی، فرصت‌های بی‌نظیری برای نوآوری در بافت، طعم و مزه ایجاد کرده است (Takagishi, Suzuki, & Umezu, 2018). **جدول ۲**

نمونه‌هایی از چاپ مواد مبتنی بر شکر را گزارش کرده است.

مواد اولیه مبتنی بر غلات

مواد اولیه مبتنی بر غلات معمولاً به صورت نیمه جامد و خمیری هستند و برای دستیابی به جریان پذیری و قوام یکنواخت، به اختلاط و پیش فرآیند مناسب نیاز دارند. غلات بخش عمده‌ای از رژیم غذایی روزانه را تشکیل می‌دهند و در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها بر بررسی قابلیت چاپ مواد غذایی مبتنی بر نشاسته، به عنوان فرمولاسیون‌های پایه برای تدوین دستورالعمل‌های چاپ دیجیتال با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی، متمرکز شده‌اند. جزء اصلی غلات، نشاسته و به ویژه آمیلوز است (Huang, & Perdon, 2020) که نقش مهمی در شکل‌گیری ساختار و بهبود چاپ‌پذیری مواد مبتنی بر نشاسته دارد. با توجه به ماهیت این مواد اولیه، خمیر نیمه‌جامدی از اجزای خشک دانه‌های غلات، از طریق مخلوط کردن آرد آن‌ها با آب و انجام پیش‌فرآیند مناسب، تشکیل می‌شود. ویسکوزیته خمیر حاصل باید به گونه‌ای باشد که ماده بتواند از نازل با قطر کم عبور کند و در عین حال، وزن لایه‌های انباشته شده را بدون کج شدن یا فروریختن تحمل کند تا سازه سه بعدی با وضوح مناسب ایجاد شود؛ این امر ارتباط مستقیم چاپ‌پذیری با خواص رئولوژیکی را نشان می‌دهد (Chen et al.,

شکلات، برای چاپ به روش اکستروژن داغ مناسب‌تر است. موفقیت در چاپ سه‌بعدی شکلات پس از رسوب‌گذاری، به کنترل دقیق متغیرهایی نظیر دما، بهینه‌سازی اندازه ذرات و تأثیر امولسیفایرها بر جریان‌پذیری و یکنواختی محصول بستگی دارد (Lanaro et al., 2019). مانتیهال و همکاران (Mantihal, Prakash, & Bhandari, 2019a) با بهره‌گیری از یک پریتر تجاری شکلات، با افزودن ۵ درصد (وزنی/وزنی) استئارات منیزیم به‌عنوان روان‌کننده، قابلیت جریان و کنترل چسبندگی ماده را بهبود بخشیدند. آن‌ها با تحلیل پروفیل‌های رئولوژیکی و حرارتی جوهرهای شکلاتی، دریافته‌اند که ساخت سازه‌های شش‌ضلعی با نگهدارنده‌های متقاطع، در مقایسه با نگهدارنده‌های موازی، کیفیت و پایداری ساختاری بهتری دارند (Mantihal et al., 2019a).

اخیراً رویکرد نوینی برای چاپ شکلات پیشنهاد شده است که در آن، چاپ مستقیم در فاز مایع و در دمای اتاق، با استفاده از فناوری نگارش مستقیم جوهر (DIW)^۱ انجام می‌شود. در این روش، جوهر شکلات با ترکیب شربت‌ها و پودر کاکائو در نسبت‌های بهینه تهیه شده و از طریق اکستروژن سرد چاپ می‌شود (Karyappa, & Hashimoto, 2019). همچنین چاپ جوهرافشان، روش دیگری برای چاپ شکلات است. این فناوری که تکامل یافته روش‌های سنتی تزئین دوبعدی غذاست، امروزه با سرعت و دقت بیشتری نسبت به چاپ اکستروژن به کار گرفته می‌شود. در این روش، ماده اولیه به‌صورت قطرات ریز در مقیاس میکرونی و به‌صورت لایه‌به‌لایه بر روی بستر چاپی قرار می‌گیرد. اساس رانش قطرات در چاپگرهای جوهرافشان می‌تواند مبتنی بر مکانیسم‌های حرارتی یا پیزوالکتریک باشد. فودجت^۲ یکی از جایگرهای تجاری است که عمدتاً برای تزئین و لایه‌نشانی مواد

پژوهش‌های متعددی بر بررسی قابلیت چاپ آرد غلات مختلف، به‌صورت خالص و یا در ترکیب با افزودنی‌هایی نظیر صمغ زانتان، صمغ گوار و سایر هیدروکلوئیدها متمرکز شده‌اند که خلاصه‌ای از آن‌ها در **جدول ۳** ارائه شده است. این مطالعات بینش‌های ارزشمندی را در خصوص بهینه‌سازی فرمولاسیون مواد اولیه نشاسته‌ای جهت تولید محصولات غذایی فراسودمند (سالم) با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی فراهم می‌آورند.

(2019a). بیشتر مواد اولیه مبتنی بر نشاسته برای چاپ به روش اکستروژن در دمای اتاق مناسب هستند (Theagarajan *et al.*, 2020). خمیر در طول فرآیند اکستروژن، رفتار رقیق‌شوندگی از خود نشان می‌دهد (Wang *et al.*, 2022). محققین تأثیر ترکیبات مواد اولیه بر چاپ‌پذیری خمیر نان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییر در نسبت اجزای خام خمیر نان، تأثیر قابل توجهی بر کیفیت چاپ سازه‌های سه‌بعدی دارد (Yang, Zhang, Prakash, & Liu, 2018).

جدول ۲- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ مواد بر پایه شکر

Table 2- Summary of the mechanism of printability of sugar-based material

نتایج Results	ترکیب مواد Material composition	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ماده چاپ‌پذیر Printable material
خصوصیات حسی و بافتی نمونه‌ها با تغییر درصد پر شدن تغییر یافته است. Sensory and textural properties of samples were altered by varying the infill percentage	شکلات تلخ شرکت های کادبری و کالیبات Cadbury and Callebaut dark chocolate	ذوب گرم (۳۲ °C) با بستر گرم (۱۵-۱۶ °C) Hot-melt (32 °C) with heated bed (15-16 °C)	شکلات Chocolate
موفقیت در رسوب شکلات به ویژگی‌های مواد و متغیرهای چاپ بستگی دارد. The successful deposition of chocolate depends upon the material characteristics and printing variables	شکلات، شیر شرکت کادبری Cadbury milk chocolate	اکستروژن ذوب گرم (۳۲-۴۰ °C) Hot-melt extrusion (32-40 °C)	شکلات Chocolate

جدول ۳- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ مواد بر پایه غلات

Table 3- Summary of the mechanism of printability of cereal-based material

نتایج Results	ترکیب مواد Material composition	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ماده قابل چاپ Printable material
ویژگی‌های ابعادی و رفتارهای کیفی نمونه‌ها به صورت کمی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. Dimensional attributes and quality behaviours of samples are quantitatively studied	آرد گندم، نشاسته گندم و پروتئین سفیده تخم‌مرغ Wheat flour, wheat starch, and egg white protein	دمای اتاق (۲۱ °C) Room temperature (21 °C)	جوهر مبتنی بر غلات Cereal-based ink
در میان مواد آزمایش شده، ماش قوی‌ترین ژل را تولید می‌کند در حالی که دانه‌های اشک روپاه دارای ساختار ضعیفی هستند. Among the tested materials, mung bean gel yields the strongest gel while job's tear seeds possessed weak structure	برنج سیاه، برنج قهوه‌ای، باکویت، ماش، بذر اشک روپاه Black rice, Brown rice, Buckwheat, Mung bean, Job's tear seeds	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	ژل‌های ساخته شده از غلات انتخابی Gels made out of selected cereal grains
نشاسته گندم دارای شبکه‌ای منظم از ریزساختار، ویسکوزیته پایین‌تر و قابلیت خروج بهتر بود. Wheat starch possessed a regular network of microstructure, lower viscosity with better extrudability	نشاسته سیب‌زمینی، نشاسته گندم، نشاسته ذرت Potato starch, Wheat starch, Corn starch	ذوب گرم (۴۵ °C) Hot-melt (45 °C)	ژل نشاسته Starch gel
آرد مرکب بومی غنی از فیبر و پروتئین بدون هیچ افزودنی چاپ شد. Fibre and protein rich indigenous composite flour was printed without any additives	ماش، سرخ شده، ارزن و دانه‌های زنجان Gram, fried gram, barnyard millet, and ajwain seeds	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد ترکیبی بومی Indigenous composite flour
اثر ترکیب مواد بر کیفیت غذاهای مبتنی بر برنج چاپ شده بررسی شد. Effect of material formulation on the quality of the examined printed rice-based foods was	برنج جاپونیکا، برنج اندیکا و برنج مومی Japonica rice, indica rice, and waxy rice	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	خمیر برنج Rice dough
ویژگی‌های بافتی به شدت با متغیرهای چاپ مانند تراکم پر کردن و سایز نازل همبستگی دارد. Textural properties were strongly correlated with the printing variables such as infill density, perimeters, and nozzle size	پودر برنج قهوه‌ای، مخلوط صمغ‌های گوار و زانتان Brown rice powder, xanthan gum-guar gum mix	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	خمیر برنج قهوه‌ای Brown rice paste
این مطالعه یک پایه علمی برای چاپ سه بعدی مواد غذایی در آینده با استفاده از نشاسته برنج ارائه می‌دهد. This study provides a scientific base for future 3D printing of foods using rice starch.	نوع بومی برنج پوننی Indigenous rice variety ponni	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	نشاسته برنج Rice starch
سوسپانسیون نشاسته با غلظت ۱۵-۲۵ درصد (وزنی/وزنی) بیشترین قابلیت اکسترون شدن و استحکام مکانیکی را نشان داد. Starch suspensions of concentration 15-25% (w/w) possessed excellent extrudability and mechanical integrity	-	ذوب گرم (۷۰-۸۵ °C) Hot-melt (70-85 °C)	سیب‌زمینی، برنج و نشاسته ذرت Potato, rice, and corn starches

مواد مبتنی بر پروتئین

چاپ سه بعدی، گزارش کردند. در فرایند مرسوم و چندمرحله ای آماده سازی سوریمی، کیفیت ژل ممکن است کاهش یابد و این ژل، استحکام کافی برای حفظ سازه های سه بعدی نداشته باشد. از این رو، نشاسته سیب زمینی شیرین برای بهبود ویژگی های رئولوژیکی ژل سوریمی به کار رفت. نتایج نشان داد که ژل سوریمی حاوی نشاسته سیب زمینی شیرین، از استحکام ژلی مناسبی همراه با بافتی نرم تر برخوردار است. این ویژگی به دلیل پیوندهای متقابل میان پروتئین های میوفیبریلار ماهی و نشاسته سیب زمینی شیرین بود که ساختاری یکنواخت و توده مانند ایجاد می کند و آن را برای چاپ سه بعدی مناسب می سازد (Dong et al., 2019).

انواع مختلفی از پژوهش ها با تمرکز بر تأثیر خواص فیزیکی شیمیایی بر قابلیت چاپ مواد غذایی مبتنی بر پروتئین در حال انجام است (جدول ۴). تولید فرآورده هایی مانند پنیر، توفو (پنیر سویا)، گوشت چرخ کرده و سایر محصولات مشابه، مستلزم دنا توره شدن و انعقاد هم زمان مولکول های پروتئینی است که این فرآیند به بهبود خواص بافتی محصول نهایی کمک می کند. دونگ و همکاران (Dong et al., 2019)، مطالعه ای درباره قابلیت چاپ ژل سوریمی حاوی نشاسته سیب زمینی شیرین، به عنوان یک تقویت کننده ساختاری بالقوه برای

جدول ۴- خلاصه ای از مکانیزم قابلیت چاپ مواد بر پایه پروتئین

Table 4- Summary of the mechanism of printability of protein-based material

ماده چاپ پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
پنیر Cheese	ذوب گرم (۶۰ °C) Hot-melt (60 °C)	پنیر با میزان کلسیم متفاوت ۱۵/۸ الی ۳۱ میلی گرم کلسیم در هر گرم پروتئین Cheese with different calcium levels of 15.8 to 31 mg of Ca/g of protein	تبدیل سل-ژل در دامنه دمای ۶۰-۵۲ درجه سانتی گراد به طور ناگهانی با کاهش کلسیم، کاهش یافت. Among the tested samples, the gel-sol transition ranged from 52 to 60 °C that significantly decreased with decreasing calcium levels.
پنیر Cheese	ذوب گرم (۷۵ °C) Hot-melt (75 °C)	پنیرهای تیمار نشده؛ ذوب شده و چاپ شده سه بعدی در دماهای مختلف Untreated, melted, printed cheeses at different extrusion rates	ویژگی های بافتی مانند سختی می تواند در حین چاپ تعیین شود. This study showed that the textural properties like hardness could be tailored through 3D printing.

بهبود دسترسی زیستی. به دلیل همین کاربردهای متنوع، ژل های غذایی در سال های اخیر مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. بر اساس فاز محبوس در شبکه ژلی (هوا، آب یا روغن)، این مواد به ترتیب با نام های آروژل ها^۱، هیدروژل ها^۲ و اولئوژل ها^۳ طبقه بندی می شوند (Rebaka, Rachamalla, Batra, & Subbiah, 2020). با ظهور فناوری چاپ سه بعدی غذا، ساخت و طراحی شبکه های ژلی نرم تسهیل شده است و امکان تولید سازه های پیچیده با خواص بیولوژیکی سفارشی فراهم آمده است.

هیدروژل ها به عنوان مواد ویسکوالاستیک، رفتاری حد واسط بین جامد و مایع دارند و خواص الاستیک و ویسکوز را هم زمان بروز می دهند. بر اساس ساختار فیزیکی شبکه بیوپلیمری، هیدروژل ها به سه دسته ژل های ضعیف، شبه قوی و قوی تقسیم می شوند (Nazir, Asghar, & Maan, 2017). نمای شماتیک روش های ساخت هیدروژل در شکل ۷ و مطالعات متعدد پیرامون کاربردهای بالقوه چاپ سه بعدی آن ها در سیستم های غذایی در جدول ۶ ارائه شده است.

خمیرهای ترکیبی

جدول ۵، نمونه هایی از پژوهش های انجام شده در زمینه چاپ سه بعدی پوره ها، خمیرهای غذایی و خمیرهای ترکیبی را ارائه می دهد. در این مطالعات، ترکیبات متنوعی شامل منابع پروتئینی، نشاسته ای، لیپیدی و هیدروکلوئیدها مورد بررسی قرار گرفته اند. جزئیات مربوط به مواد اولیه، شرایط عملیاتی فرآیند و نتایج حاصل از این تحقیقات در جدول مذکور درج شده است.

سیستم های غذایی مبتنی بر ژل

ژل های غذایی، شبکه های پلیمری سه بعدی هستند که عمدتاً از پلی ساکاریدها و پروتئین ها تشکیل شده اند. این ساختارها کارکردهای متعددی دارند، از جمله: تنظیم ویژگی های بافتی و حسی، تثبیت ساختارهای غذایی ناپایدار، افزایش ماندگاری، بهبود ویژگی های فیزیکی شیمیایی (مانند افزایش احساس سیری)، جایگزینی چربی و

جدول ۵- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ پوره‌ها، خمیرهای غذایی و خمیرهای ترکیبی

Table 5- Summary of the mechanism of printability of puree, food paste and composite dough

ماده چاپ پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
پوره سیب‌زمینی Mashed potato	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	سیب‌زمینی (پخته بخارپز)، ۱۵٪ ترهالوز (وزنی/وزنی)، و نشاسته سیب‌زمینی (۲، ۱، ۰ و ۴٪) Potato (steam cooked), 15% trehalose (w/w), and starch (0, 1, 2, and 4%) potato	این مطالعه ارتباط معناداری بین خواص مواد و قابلیت چاپ با افزایش نسبت نشاسته سیب‌زمینی را برقرار می‌کند. This study establishes a significant correlation between the material properties and printability with increased proportion of potato starch
پوره سیب‌زمینی تجاری Commercial potato puree	گرم (۳۰ °C و ۲۰ °C) Hot (10, 20, and 30 °C)	پوره سیب‌زمینی و شیر کامل Potato puree and whole milk	نتایج نشان داد که قابلیت چاپ با شاخص همگنی افزایش و با شاخص رفتار کاهش می‌یابد. Results showed that printability increased with consistency index and decreased with the behaviour index.
پوره سیب‌زمینی Potato puree	دمای اتاق (۲۰ °C) Room temperature (20 °C)	سیب‌زمینی پخته، پوره هویج، روغن زیتون، کره، آلژینات و آگار Cooked potato, carrot puree, olive oil, butter, alginate, and agar	اثر روش‌های مختلف پخت (گرمایش مایکروویو و جوشاندن) بر تغییرات میکروساختاری نشاسته برای چاپ سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. The effect of different cooking methods (microwave heating and boiling) on microstructural changes of starch for 3D printing was studied.
خمیر کوکی Cookie dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد برنج، آرد گندم، آرد تاپوکا، کره و چربی، شکر، پودر شیر و آب Rice flour, wheat flour, tapioca flour, butter and shortening, sugar, milk powder, and water	کارایی مولکول‌های نشاسته به شدت بر خواص فیزیکوشیمیایی مخلوط چاپ تأثیر گذاشته است. Functionality of the starch molecules greatly affected physiochemical property of printing mixture
خمیر نانوبایی Baking dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	شکر قنادی، کره، تخم مرغ، آرد کم گلوتن و آب Icing sugar, butter, egg, low gluten flour, and water	سرکودن سریع پس از فرآیند ساخت ساختارهای چاپ شده (۶۵- درجه سانتی‌گراد برای حدود ۱۰ دقیقه) در ثبات ساختار و شکل در حین پخت مفید بود. Post-process fast cooling of the 3D printed structures (-65 °C for approximately 10 min) was beneficial in structure and shape stability during baking
خمیر مرکب Composite dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد گندم، پودر انبه خشک شده به روش انجمادی، روغن زیتون و آب Wheat flour, freeze dried mango powder, olive oil, and water	تأثیر ترکیب ماده بر ویژگی‌های چاپ سه‌بعدی خمیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. Effect of the material composition on the 3D printing characteristics of dough was analyzed
خمیر نانوبایی Baking dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد کم گلوتن، شکر قنادی، کره، تخم مرغ و آب Low gluten flour, icing sugar, butter, egg, and water	یک ژل شبه‌پلاستیک با استحکام ژل بالاتر، قابلیت اکستروژن، الاستیسیته و چکش خواری پایین‌تر برای دستیابی به قابلیت بالاتر در چاپ مطلوب بود. A pseudoplastic gel with higher gel strength, extrudability, elasticity, and a lower ductility were desirable for achieving higher print fidelity
خمیر کوکی Cookie dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	نشاسته گندم، آرد کم گلوتن، شکر، کره و تخم‌مرغ Wheat starch, low gluten flour, sugar, butter, and egg	پیش‌تیمار با مایکروویو به‌طور قابل‌توجهی درجه ژلاتینه شدن را افزایش داده و ویسکوزیته، سختی و الاستیسیته خمیر را بهبود بخشید. Microwave pre treatment significantly increased the degree of gelatinization and improved viscosity, hardness, and elasticity of dough.
خمیر مبتنی بر پروتئین پلازما Plasma protein based dough	دمای اتاق (۲۰ °C) Room temperature (20 °C)	پروتئین پلازما از خوک، کنسانتره‌های پروتئین نخود و ایزوله پروتئین سویا Porcine plasma protein, pea protein concentrates, and soy protein isolate	خمیر با پروتئین پلازما از خوک بین ۴۲/۵ تا ۴۷/۵٪ (وزن/وزن) نشان‌دهنده عملکرد بالاتر در چاپ بود. همچنین، خمیر مخلوط با کنسانتره پروتئین نخود و ایزوله پروتئین سویا در مقادیر ۱۰ تا ۱۵٪ (وزن/وزن) قابلیت چاپ بهتری داشت. Dough with porcine plasma protein between 42.5 and 47.5% (w/w) showed higher printing performance. Also, mixed dough with pea protein concentrate and soy protein isolate of 10-15% (w/w) possessed better printability.

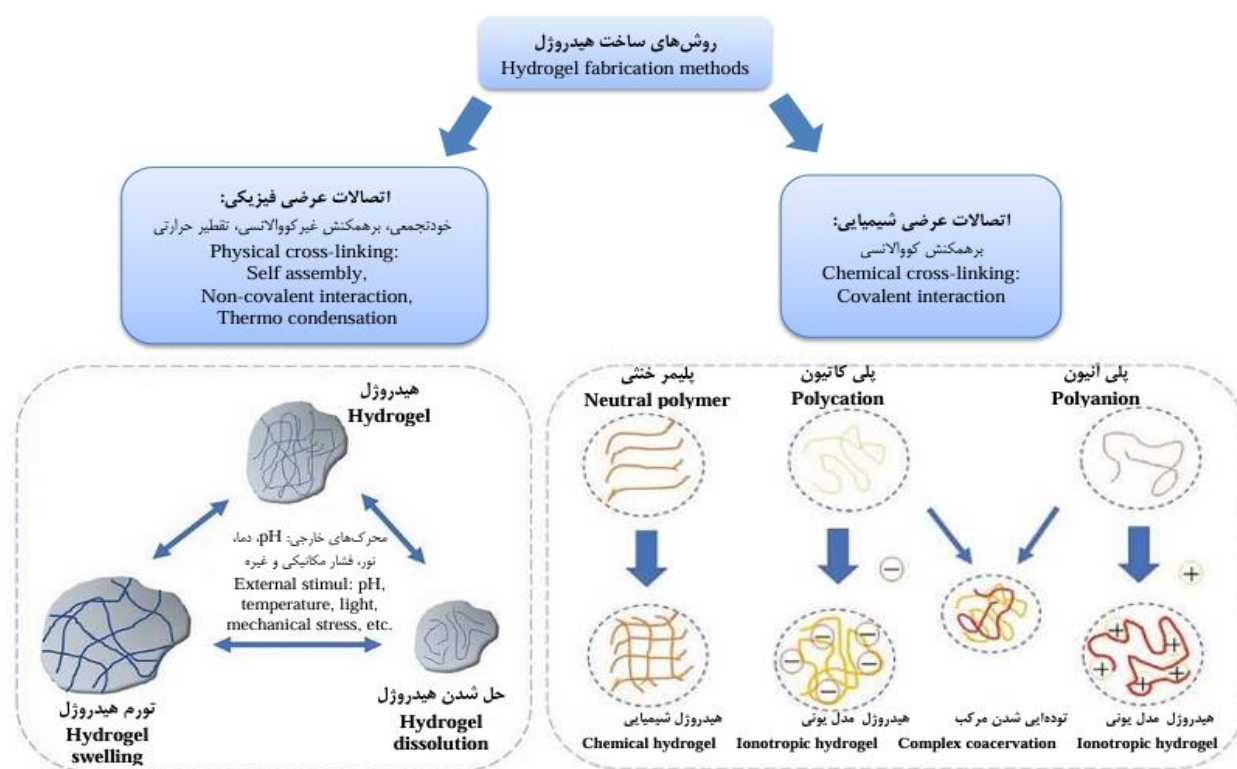
دارویی به‌عنوان سیستم‌های انتقال دارو کاربرد دارند. امروزه تحقیقات بر کاربرد فناوری چاپ سه‌بعدی برای انتقال اجزای زیست‌فعال از طریق اولئوژل‌های زیست‌سازگار مشتق شده از روغن‌های گیاهی متمرکز شده است. اولئوژل‌ها سیستم‌های نیمه‌جامدی هستند که در آن‌ها فاز مایع

دسته دیگری از ژل‌ها که اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند، اولئوژل‌ها هستند. اولئوژل‌ها از جایگزینی فاز مایع هیدروژل‌ها با حلال‌های غیرقطبی (مانند روغن) حاصل می‌شوند (Co, & Marangoni, 2018). این مواد در صنایع غذایی به‌عنوان ژل‌های خوراکی و در صنایع

چربی را برای چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن بررسی کردند. در این مطالعه، قابلیت چاپ فرمولاسیون‌های حاصل از مخلوط مونوگلیسریدها و فیتواسترول‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد (وزن/وزن) فیتواسترول، که با ۱۰ و ۲۰ درصد (وزن/وزن) مونواسترها فرموله شده بودند، به دلیل پایین‌تر بودن دمای ژل‌زایی، قابلیت چاپ بهتری داشتند (Cotabarren et al., 2019). بنابراین، اولئوژل‌ها به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ساختاردهی به روغن و انتقال دارو، جایگاه ویژه‌ای در صنایع غذایی و دارویی پیدا کرده‌اند (Anandharamakrishnan et al., 2022).

آلی در یک شبکه ویسکوالاستیک سه‌بعدی، حاصل از اتصالات عرضی پلیمری، محبوس شده است. این ساختارها بر اساس وزن مولکولی شبکه به دو دسته تولیدکنندگان اولئوژل با وزن مولکولی کم و نوع پلیمری با وزن مولکولی زیاد تقسیم می‌شوند (Rebeka et al., 2020). دسته اول شامل آلکان‌ها، موم‌ها، اسیدهای چرب، الکل‌های چرب، فیتواسترول‌ها، سرامیدها، استرها، لسیتین، سورفاکتانت‌ها، تریترپنوئیدها، مونوگلیسریدها و مشتقات تری‌گلیسرید است؛ در حالی که دسته دوم شامل پلیمرهای مشتق سلولزی، پلی‌ساکاریدهای محلول در آب و پروتئین‌ها می‌باشد.

به تازگی، کوتابارن و همکاران (Cotabarren, Cruces, & Palla, 2019) قابلیت‌های اولئوژل‌های حاوی مواد مؤثره محلول در



شکل ۷- روش‌های به کار رفته برای ساخت هیدروژل‌ها (Anandharamakrishnan et al., 2022)

Fig. 7. Methods used for hydrogel fabrication (Anandharamakrishnan et al., 2022)

پژوهش‌ها بر تولید غذاهای سنتی از طریق چاپ سه‌بعدی متمرکز شده‌اند. در این روش، مواد خام غیرقابل چاپ ابتدا با فرآیندهایی مانند آسیاب کردن، برش‌دادن و چرخ کردن، به ذرات ریز تبدیل می‌شوند؛ سپس با یکدیگر مخلوط و همگن می‌گردند. در نهایت، هیدروکلوئیدهای مناسب به آن‌ها افزوده می‌شود و فرآورده نهایی به‌صورت ژل، امولسیون یا کلوئید برای چاپ توسط چاپگر آماده می‌شود (Anandharamakrishnan et al., 2022).

مواد اولیه غذایی غیر قابل چاپ

مواد غذایی که به‌طور ذاتی غیرقابل چاپ هستند، نظیر غلات، حبوبات، سبزیجات، میوه‌ها، غذاهای دریایی و فرآورده‌های گوشتی، بخش عمده‌ای از رژیم غذایی مردم را در سراسر جهان تشکیل می‌دهند. با پیشرفت‌های حاصل در حوزه فناوری چاپ سه‌بعدی، امروزه می‌توان از این مواد برای تولید محصولات غذایی جدید با اشکال، ساختارها، طعم‌ها و بافت جذاب و متفاوت بهره برد (Sun et al., 2018a). امروزه،

جدول ۶- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ سیستم‌های غذایی مبتنی بر ژل

Table 6- Summary of the mechanism of printability of Gel-based food systems

ماده چاپ پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
ژل ترکیبی پروتئین شیر Milk protein composite gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	کنسانتره پروتئین شیر و کازینات سدیم Milk protein concentrate and sodium caseinate	ژل پروتئین شیر حاوی ۴۰۰ تا ۴۵۰ گرم در هر کیلوگرم پروتئین کل بهترین مطابقت با مدل چاپ را داشت. Milk protein gel containing 400–450g of total protein possessed best print fidelity
شبیه سازی غذایی پروتئین شیر Milk protein food simulant	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	ایزوله پروتئین وی، کنسانتره پروتئین شیر، گلیسرول و صمغ زانتان Whey protein isolate, milk protein concentrate, glycerol, and xanthan gum	کنسانتره پروتئین شیر: ایزوله پروتئین آب پنیر با نسبت ۵ به ۲ عملکرد بهتری در چاپ نشان داد. Milk protein concentrate: whey protein isolate of 5 showed better printing performance : 2 proportion
ژل پروتئین نخود فرنگی Pea protein gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	پروتئین نخود فرنگی، زایلوز، پروتئاز، گلیسرول و نشاسته سیب‌زمینی Pea protein, xylose, protease, glycerol, and potato starch	محصولات واکنش میلارد زایلوز بالاترین درجه پیوند متقابل را داشتند که بهترین چسبندگی و همبستگی را نشان داد. Xylose Maillard reaction products had the highest degree of cross linking showed a strongest adhesion and cohesion
ژل پروتئین نخود فرنگی Pea protein gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	پروتئین نخود، پودر آلژینات و کلرید کلسیم Pea protein, alginate powder, and calcium chloride	نسبت آلژینات به پروتئین نخود ۸۰ به ۲۰ عملکرد چاپ بهتری نشان داد. Alginate to pea protein proportion of 80 : 20 showed better printing performance
هیدروژل Hydrogel	-	آگار و ژلاتین (که به طور جداگانه استفاده می‌شوند) Agar and gelatin (used individually)	فرمولاسیون آزمایش شده سیستم‌های ژل دارای سختی بین ۸ تا ۴۵ کیلوپاسکال بود که بافتی نرم و شبیه به ژله داشت. Tested formulation of gel systems had hardness ranged from 8 to 45kPa possessing a soft jelly-like texture
قالب‌های هویجی Carrot moulds	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	پوره هویج، صمغ گوار، صمغ زانتان و ژلاتین Carrot puree, Guar gum, xanthan gum, and gelatin	نمونه‌های دارای ژلاتین و گوار گام دارای سختی بیشتر و بافت متراکم‌تری بودند. The samples with gelatin and xanthan gum possessed higher hardness and densest texture
هیدروژل Hydrogel	دماهای (۲۵-۵۰ C°) temperatures (25-50 °C)	صمغ زانتان و کنجک Xanthan and Konjac gum	افزایش محتوای شربت منجر به ایجاد یک ژل ضعیف شد. ترکیب مواد تأثیر قابل توجهی بر خواص بافتی و رئولوژیکی داشت. Increasing syrup content resulted in a weakgel. Material composition had significant impact on textural and rheological properties.
ژل ایزوله سویا Soy protein isolate gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	ایزوله پروتئین سویا، صمغ زانتان و کلرید سدیم Soy protein isolate, xanthan gum, and sodium chloride	ژل پروتئین ایزوله سویا با صمغ زانتان و محلول کلرید سدیم در غلظت ۱ گرم/۱۰۰ میلی‌لیتر نشان‌دهنده قابلیت چاپ بهتری بود. Soy protein isolate gel with xanthan gum and NaCl solution at 1 g/100 ml showed better printability.
هیدروژل Hydrogel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	نشاسته کاساوا Cassava starch	نمونه‌های چاپ‌شده با حرارت خشک دارای قابلیت چاپ بهتری نسبت به نمونه‌های نشاسته‌ای بومی هستند. Dry heat treatment 3D printed samples exhibit better printability than native starch samples
هیدروژل Hydrogel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	صمغ زانتان، لوبیای لوکاست، کاراگینان، پکتین، آگار، آلژینات سدیم، گوار، صمغ عربی، مالتودکسترین، کاراگینان ایوتا و ژلاتین Xanthan, locust bean, carrageenan, pectin, agar, sodium alginate, guar, gum Arabic, maltodextrin, iota carrageenan, and gelatin	زاویه فاز و شاخص آرامش می‌تواند برای درک رفتار ویسکوالاستیک مواد مورد استفاده قرار گیرد. The phase angle and relaxation exponent could be used for understanding of viscoelastic behaviour of the material supplies.
هیدروژل Hydrogel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	نشاسته کاساوا Cassava starch	تأثیرات تیمار ازن در نشاسته اصلاح شده را نشان می‌دهد که می‌تواند برای تولید غذاهای مبتنی بر نشاسته چاپ شده مورد استفاده قرار گیرد. The effects of ozone treatment in starch modification that can be used for production of printed starch based food

چرا غذاهای سنتی غیر قابل چاپ هستند؟

غذاهای سنتی در رژیم غذایی روزمره ما، اغلب غنی از فیبر (میوه‌ها و سبزیجات)، پروتئین‌های رشته‌ای (فراورده‌های گوشتی) و رطوبت بالا

هستند؛ ویژگی‌هایی که به‌طور معمول مطلوبیت آن‌ها را برای چاپ سه‌بعدی کاهش می‌دهد و در نتیجه، آن‌ها را در دسته مواد غذایی غیرقابل چاپ قرار می‌دهد. علت اصلی این امر آن است که این مواد نسبت به مواد اولیه قابل چاپ، حاوی مقادیر کمتری از ترکیبات مؤثر

ساختارهای پلی ساکاریدی یا پروتئینی باشند که منشاء آن‌ها گیاهی، جلبکی، حیوانی یا میکروبی است (جدول ۷). نقش هیدروکلوئیدهای غذایی در جمع‌آوری و ساختاردهی غذاها بسیار چشمگیر است و کاربردهای وسیعی از جمله افزایش ظرفیت جذب آب، عمل به عنوان عامل ژل سازی و غلیظ کننده، تثبیت امولسیون‌ها، بهبود چسبندگی، فلوکولاسیون و تثبیت کف را شامل می‌شود. از این رو، هیدروکلوئیدهای غذایی به عنوان اسکلتی برای ساختارهای غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Lu, Nishinari, Matsukawa, & Fang, 2020).

کیم و همکاران (Kim et al., 2018) مطالعه‌ای را به منظور ارزیابی مقایسه‌ای هیدروکلوئیدهای مختلف، از جمله صمغ گوار، صمغ ژلان، صمغ زانتان، صمغ لوبیای لوکاست، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز، متیل سلولوز و ژلاتین، برای کاربرد در چاپ مواد غذایی انجام دادند. هدف این مطالعه، چارچوب بندی یک سیستم طبقه بندی مبتنی بر ارزیابی قابلیت چاپ بود. در میان هیدروکلوئیدهای مورد بررسی، متیل سلولوز توانایی شبیه سازی رفتار تغییر شکل مواد غذایی را نشان داد و از پایداری مکانیکی خوبی برخوردار بود که با اکثر سیستم‌های غذایی با ویسکوزیته‌های متنوع سازگار است (Kim et al., 2018). در مطالعه‌ای دیگر، محققین یک سیال غذایی مبتنی بر پکتین را برای کاربردهای چاپ سه بعدی توسعه دادند. این پژوهش، تأثیر درجه متوکسیلاسیون پکتین را با غلظت یون‌های کلسیم به عنوان عامل اتصال عرضی، که به قابلیت چاپ کمک می‌کند، مرتبط دانست. نتایج نشان داد که فرمولاسیون جوهر مواد غذایی به شدت تحت تأثیر چگالی شبکه پلیمری و درجه اتصال عرضی آن با یون‌های کلسیم قرار دارد. افزودن قند به مواد غذایی نیز بر رفتار ویسکوالاستیک تأثیر گذاشته و بنابراین می‌تواند با قابلیت چاپ ارتباط مثبت داشته باشد. حضور قند، ماتریس پلیمری را کم‌آب کرده و از این طریق مکانیسم ژل سازی را با تشکیل پیوندهای هیدروژنی افزایش می‌دهد که منجر به مدول الاستیک بالاتر و در نتیجه ژل پکتین سفت تر می‌شود (Vancauwenberghe, Katalagarianakis, Wang, & Meerts, 2017).

با گنجاندن هیدروکلوئیدها در فرمولاسیون‌ها، امکان تولید سیستم‌های ژلی بر پایه گیاهان و جانوران که قابلیت چاپ دارند، فراهم می‌شود. علاوه بر این، مطالعات متعددی درباره چاپ سه بعدی ژل آب لیمو، ژل سیب زمینی له شده/آب توت فرنگی، سوریمی ماهی و فرآورده‌های گوشتی مانند گوشت گاو، خوک، مرغ، صدف و بوقلمون گزارش شده است. تمام این مطالعات، قابلیت چاپ سه بعدی غذاهای سنتی سالم را با ویژگی‌های بافتی، حسی و تغذیه‌ای بهبود یافته از طریق به کارگیری هیدروکلوئیدهای غذایی تأیید می‌کنند (Anandharamakrishnan et al., 2022).

(نظیر کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و چربی‌های خاص) هستند؛ ترکیباتی که مسئول مکانیسم‌های ژلاتیناسیون، هیدراتاسیون، روان سازی، توده سازی و سخت شدن (سفت شدن) هستند و در نهایت، قابلیت چاپ را به مواد اولیه می‌بخشند (Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). پلاستیسیته ناکافی، ویسکوزیته پایین و مقاومت مکانیکی ضعیف، دلایل اصلی غیرقابل چاپ بودن این دسته از مواد غذایی هستند. پوره این مواد غالباً سیالیت بالایی از خود نشان می‌دهد و فاقد پلاستیسیته و شکل پذیری کافی برای حفظ ساختار پس از چاپ است. علاوه بر این، وجود ذرات درشت و مواد با محتوای سلولزی بالا، خطر انسداد نازل، در طول فرآیند چاپ را افزایش می‌دهد. در مورد مواد اولیه میوه و سبزیجات، چالش‌های دیگری نظیر تمایل به اکسیداسیون، قهوه‌ای شدن، رشد میکروبی و در نتیجه، از دست رفتن ارزش غذایی و کیفیت اولیه در طی فرآیند چاپ سه بعدی نیز وجود دارد (Li et al., 2022). با وجود چالش‌های ذکر شده، این مواد غذایی منبع غنی از آنتی اکسیدان‌ها، ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری برای بازسازی و احیای بدن محسوب می‌شوند. با این حال، استخراج و فرآوری مؤثر بخش‌های فیبری این مواد، یکی از چالش‌های شناخته شده در این زمینه است (Lille et al., 2018). فیبرها، تنها در ترکیب با سایر اجزای پلیمری مانند نشاسته و هیدروکلوئیدها، قابلیت چاپ پذیری پیدا می‌کنند. فیبرها دارای مزایای درمانی متعددی هستند، از جمله کمک به حفظ سلامت روده، کاهش کلسترول، کنترل سطح قند خون و کاهش خطر ابتلا به بیماری‌هایی نظیر چاقی، دیابت و بیماری‌های قلبی-عروقی (Yegin, Kopec, Kitts, & Zawistowski, 2020). در نتیجه، مطالعاتی در زمینه چاپ سه بعدی فیبرها با هدف ایجاد حس سیری، که می‌تواند به کاهش مصرف غذا و دریافت کالری کمک کند، انجام شده است. با توجه به ماهیت فیبری سبزیجات و فرآورده‌های گوشتی، بهبود چاپ پذیری آن‌ها مستلزم تنظیم دقیق خواص فیزیکوشیمیایی است. برای دستیابی به قوام و جریان مناسب در چاپگرهای اکستروژنی، کالیبراسیون میزان جامدات فرمولاسیون ضروری است. افزون بر این، مجموع جامدات موجود در مواد اولیه، معیاری کلیدی است که بر پایداری سازه‌های سه بعدی نهایی تأثیر می‌گذارد (Ricci, Derossi, & Severini, 2019).

نقش هیدروکلوئیدهای غذایی در بهبود قابلیت چاپ

مواد غیرقابل چاپ را می‌توان با تنظیم ویژگی‌های رئولوژیکی آن‌ها، مانند ویسکوزیته، غلظت و قابلیت جریان، از طریق افزودن هیدروکلوئیدها، به مواد قابل چاپ سه بعدی تبدیل کرد. هیدروکلوئیدها، همان طور که از نامشان پیداست، پلیمرهای آب دوستی هستند که حاوی گروه‌های هیدروکسیل می‌باشند. این گروه‌ها می‌توانند بخشی از

جدول ۷- خلاصه‌ای از نقش هیدروکلوئیدهای مهم تجاری در غذاها

Table 7- Summary of the role of commercially important hydrocolloids in foods

منبع Source	منشاء استخراجی Origin of extraction	هیدروکلوئید Hydrocolloid	دسته‌بندی غذا Food category	عملکرد Function
گیاهی Botanical	گیاهان Plants	نشاسته Starch	سس سالاد، سس‌ها، سوپ‌ها، مربا، ژله‌ها، بستنی‌ها، کیک‌ها، شیرینی‌ها، غذاهای پروتئینی و محصولات لبنی تخمیری Salad dressing, sauces, soups, jam, jellies, ice cremes, cakes, candies, muscle foods, and cultured dairy products	عامل غلیظ‌کننده و ژل‌ساز Thickening and gelling agent
		پکتین Pectin	مواد پرکننده نانوائی، دسرهای یخی لبنی، مربا، ژله‌ها و مارمالادها Bakery fillings, frozen dairy desserts, jam, jellies, and marmalades	عامل پایدارکننده، غلیظ‌کننده و ژل‌ساز Stabilizer, thickening, and gelling agent
		سلولز Cellulose	محصولات نانوائی، پوشش‌های خامه‌ای، پوشش‌های خوراکی، شیرینی‌جات و محصولات غذایی بازسازی‌شده Bakery products, whipped toppings, edible coatings, confectioneries, and reformed food products	عامل پایدارکننده، غلیظ‌کننده، ژل‌ساز و کمک به هم زدن Stabilizer, thickening, gelling, agent and whipping aid
		صمغ عربی/آفاقیا Gum arabic/ gum acacia	سوپ‌ها، دسرها، نوشیدنی‌ها، سس‌ها، کرم‌ها، شیرینی‌ها، پودینگ‌ها و پرکننده‌ها Soups, desserts, beverages, dressings, spreads, candies, puddings, and fillings	عامل پایدارکننده، چسبنده، امولسیفایر، غلیظ‌کننده و ژل‌ساز Stabilizer, binder, emulsifier, thickening and gelling agent
	ترشحات صمغی درختان Tree gum exudates	صمغ کارایا Gum karaya	دسرهای سس‌ها، نوشیدنی‌های الکلی مبتنی بر تخم‌مرغ، پوشش‌های آجیل و تنقلات Desserts, sauces, egg-based liqueurs, nut coatings, and snacks	عامل بافت‌دهنده، چسبنده، اتصال‌دهنده، تعلیق و غلیظ‌کننده Texturizer, adhesive, binding, suspension, and thickening agent
		صمغ تراگانثان tragacanth Gum	بستنی‌ها، دسرهای یخ‌زده، آبنبات‌ها، فوندانت و کیک‌ها Ice-creams, frozen desserts, candies, fondant, and cakes	عامل امولسیفایر و غلیظ‌کننده Emulsifying and thickening agent
		صمغ قاطلی Gum ghatti	آبنبات‌ها، آدامس، پاستیل، محصولات نانوائی و شیرینی‌جات Candies, chewing gum, pastilles, bakery products, and confectioneries	امولسیفایر، تثبیت‌کننده، غلیظ‌کننده، پوشش‌دهنده و ژل‌ساز Emulsifier, stabilizer, thickener, coating, and gelling agent
	دانه‌ها Seeds	صمغ گوار Guar gum	محصولات نانوائی و پرکننده‌ها، محصولات لبنی تخمیری، دسرهای یخ‌زده لبنی و سس سالاد Bakery products and fillings, cultured dairy products, frozen dairy desserts, and salad dressing	عامل غلیظ‌کننده، امولسیون‌کننده، ژل‌ساز و ماده نگهدارنده Thickener, emulsifier, gelling, and preserving agent
		صمغ دانه خرنوب Locust bean	محصولات لبنی تخمیری، سس سالاد، دسرهای یخ‌زده لبنی و مواد پرکننده نان Cultured dairy products, salad dressing, frozen dairy desserts, and bakery fillings	پایدارکننده، ژل‌ساز و غلیظ‌کننده عامل Stabilizer, gelling, and thickening agent
		تارا گام Tara gum	کالا‌های پخته‌شده، محصولات لبنی، دسرهای یخ‌زده، ژله‌ها، محصولات گوشت فرآوری‌شده، سس‌ها و چاشنی‌ها Baked goods, dairy products, frozen desserts, jellies, processed meat products, sauces, and dressings	عامل غلیظ‌کننده و پایدارکننده Thickener and stabilizer agent
		زایلوگلوکان صمغ تمر هندی Tamarind gum xyloglucan	مربا، ژله، مارمالاد، آبنبات، آدامس، نوشیدنی‌ها و محصولات نانوائی Jam, jelly, marmalade, candy, chewing gum, beverages, and bakery products	عامل غلیظ‌کننده، ژل‌ساز، تثبیت‌کننده، چسبنده و پیونددهنده Thickening, gelling, stabilizing, adhesive, and binding agent
	پروتئین سویا Soy protein	پروتئین سویا Soy protein	فرمول‌های غذایی نوزاد، محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها و مخلوط‌های سلامت Infant food formulas, dairy products, beverages, and health mix	عامل بافت‌دهنده، امولسیفایر، همزدن، پیونددهنده، ژل‌ساز و غلیظ‌کننده Texturizer, emulsifier, whipping, binding, gelling, and thickening agent

حیوانی Animal	غده‌ها Tubers	گلوکومانان کنجاک Konjac glucomannan	محصولات نانوائی و پرکننده‌ها Bakery products and fillings	عامل پوشش‌های محافظ خوراکی، تثبیت کننده، امولسیفایر و ژل ساز Protective and edible coatings, stabilizer, emulsifier, and gelling agent
	کلاژن Collagen	ژلاتین Gelatin	آبنبات‌ها، دسرها، محصولات گوشتی فرآوری شده، بستنی و محصولات لبنی Candies, desserts, processed meat products, ice cream, and dairy products	عامل شفاف کننده، پوشش محافظ، پایدار کننده و غلظت دهنده Clarifying agent, protective coating, stabilizer, and thickening agent
	کیتین Chitin	کیتوزان Chitosan	کیک‌ها و شیرینی‌ها، محصولات لبنی Cakes and pastries, dairy products	پوشش‌های حفاظتی، امولسیفایر، بافت دهنده، حفظ رطوبت، عامل فعال سطحی، تثبیت کننده، ژله‌ای کننده و غلیظ کننده‌ها Protective coatings, emulsifier, texturizer, humectant, surfactants, stabilizer, gelling, and thickening agents
	بافت‌های پیوندی Connective tissues	هیالورونان Hyaluronan	ژله، محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها و نوشیدنی‌های سلامت Jelly, dairy products, beverages, and health drinks	غلظت کننده و پایدار کننده Thickener and stabilizer
جلبیکی Algal	تخم مرغ Egg	پروتئین سفیده تخم مرغ Egg white protein	سس‌ها، کرم‌ها، کیک‌ها و شیرینی‌ها Sauces, custards, cakes, and confectioneries	عامل غلظت دهنده، ژل ساز و کف ساز، امولسیفایر، منعقد کننده، چسباننده و بهبود دهنده بافت Thickening, gelling and foaming, emulsifier, coagulant, binding agent, and texture enhancer
	شیر Milk	کازئینات Caseinat	محصولات لبنی، ژله‌ها، آبنبات‌ها و شیرینی جات Dairy products, jellies, candies, and confectioneries	عامل پایدار کننده، غلیظ کننده و ژل ساز Stabilizer, thickening, and gelling agents
	جلبک‌های دریایی قرمز Red seaweeds	آگار Agar (agarose)	محصولات نانوائی، نوشیدنی‌ها و نوشابه‌ها Bakery products, beverages, and soft drinks	عامل تعدیل کننده بافت، غلیظ کننده، عامل کپسوله کننده، فعال کننده سطحی و ژل ساز Texture modifier, thickening, encapsulating agent, surface active agent, and gelling agent
	جلبک‌های دریایی قهوه‌ای Brown seaweeds	کاراژینان Carrageenan	مربا، ژله، آبنبات نرم، آمیوه‌ها، بستنی‌ها، روکش کیک، پودینگ‌ها، کاسترد و محصولات لبنی Jam, jelly, soft candies, fruit juices, ice-creams, icings, puddings, custard, and dairy products	عامل لخته کننده، غلیظ کننده، امولسیفایر، پایدار کننده و ژل ساز Coagulator, thickening, emulsifier, stabilizer, and gelling agent
میکروبی Microbial	جلبک‌های دریایی قهوه‌ای Brown seaweeds	آلژینات Alginate	محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها، سس‌ها، محصولات گوشتی و ماهی، نان و قنادی‌ها Milk products, beverages, dressings, meat and fish products, bakery, and confectioneries	عامل غلیظ کننده، ژل ساز، تثبیت کننده و معلق کننده Thickening, gelling, stabilizing, and suspending agent
	زانتوموناس کمپسترین Xanthomonas campestris	صمغ زانتان Xanthan gum	مواد غذایی بازسازی شده، محصولات گوشتی، شربت‌ها، سس سالاد، غذاهای عضلانی، پرکننده‌های نانوائی و دسرهای یخ زده لبنی Restructured foods, meat products, syrups, salad dressing, muscle foods, bakery fillings, and frozen dairy desserts	عامل پایدار کننده، امولسیون کننده، کلات کننده، پوشش دهنده، تعلیق کننده، غلیظ کننده و ژل ساز Stabilizer, emulsifier, chelating agent, encapsulation agent, suspension agent, thickening, and gelling agent
	آلکالیژنس فکالین Alcaligenes faecalis	کردلان Curdlan	سس سالاد، سالاد، سس‌ها، دسرها، محصولات نانوائی، دسرهای یخ زده لبنی و محصولات لبنی تخمیری Salad dressing, salad, gravies, desserts, bakery products, frozen dairy desserts, and cultured dairy products	عامل غلیظ کننده، تعلیق کننده، امولسیفایر، تثبیت کننده و چسباننده Thickener, suspension, emulsifier, stabilizer, and binding agent
	اسفینگوموناس الودئا Sphingomonas elodea	صمغ ژلان Gellan gum	محصولات گوشتی، خمیر ماهی، سوسیس، همبرگر و رشته‌ها Meat products, fish paste, sausages, hamburgers, and noodles	عامل پایدار کننده، اصلاح کننده بافت، شبه چربی‌ها و ژل ساز Stabilizer, texture modifier, fat mimetics, and gelling agent
			محصولات لبنی، پرکردنی‌های نانوائی، مربا، ژله، نوشیدنی‌ها، محصولات لبنی، دسرها و سس‌ها Dairy products, bakery fillings, jam, jelly, beverages, dairy products, desserts, and sauces	عامل غلیظ کننده، پایدار کننده، عامل چسبنده و ژل ساز Thickener, stabilizer, binding agent, and gelling agent

عامل پایدارکننده، غلیظ‌کننده، ژل‌ساز و کمک به هم زدن	محصولات نانوائی، شیرینی‌جات، سس‌ها و روکش‌های خوراکی	سلولز	استوباکتر و آگروباکتریوم
Stabilizer, thickening, gelling, and whipping aid	Bakery products, confectioneries, dressings, and edible coatings	Cellulose	Acetobacter and Agrobacterium
عامل غلیظ‌کننده و پایدارکننده	ژله، محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها و نوشیدنی‌های سلامت	هیالورونان	باسیلوس سوبتیلیس
Thickener and stabilizer	Jelly, dairy products, beverages, and health drinks	Hyaluronan	Bacillus subtilis
عامل غلیظ‌کننده، امولسیفایر، بافت‌دهنده و عامل ژل‌ساز	آدامس‌ها، مربا، ژله‌ها، آب‌نبات‌ها و بستنی	دکستران	لاکتوباسیلوس، لاکتوئیدس، استرپتوکوک موتانس
Thickener, emulsifier, texturizer, and gelling agent	Gums, jam, jellies, candies, and ice-cream	Dextran	Lactobacillus, Leuconostoc mesenteroides, Streptococcus mutans

نقش افزودنی‌های دیگر در بهبود قابلیت چاپ

افزودنی‌های دیگر، که یا شامل اجزای خالص غذایی مانند نشاسته هستند یا بخشی از مواد خوراکی مانند آرد برنج، آرد گندم، آرد گندم تصفیه‌شده، آرد ارزن و سایر مواد مشابه مبتنی بر غلات را دربرمی‌گیرند، می‌توانند با ایجاد اثرات هم‌افزایی، قابلیت چاپ غذاهای غیرقابل چاپ را بهبود دهند (Nachal, Moses, Karthik, & Anandharamakrishnan, 2019). جالب آن‌که این گروه از مواد غذایی، اگرچه در ظاهر ممکن است به‌تنهایی قابل چاپ به نظر برسند، اما به‌شدت ناپایدار بوده و سازه‌های سه‌بعدی ضعیفی تولید می‌کنند (Theagarajan, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). هنگامی که این مواد به‌عنوان ماده اصلی چاپ در نظر گرفته می‌شوند، از هیدروکلوئیدهای غذایی برای بهبود یکپارچگی ساختاری و پایداری مکانیکی مخلوط‌های چاپی استفاده می‌شود (Liu, Tang, Duan, & Qin, 2020a). از سوی دیگر، زمانی که این گروه به‌عنوان ماده اصلی چاپ به کار نرود— برای مثال در چاپ غذاهای غیرقابل چاپ مانند میوه‌ها، سبزیجات و فرآورده‌های گوشتی — می‌توان آن‌ها را به مواد اولیه چاپ افزود تا خواص رئولوژیکی ترکیب بهبود یافته و قابلیت چاپ‌پذیری مواد غیرقابل چاپ افزایش یابد (Keerthana, Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). برای نمونه، مطالعه‌ای درباره چاپ بخش‌های زرده و سفیده تخم‌مرغ با افزودن آرد برنج خام و بدون هیچ‌گونه پیش‌فرآیند، گزارش شده است. در این ترکیب، نشاسته برنج همراه با بخش‌های لیوپروتئینی زرده و سفیده تخم‌مرغ، در حضور آب خمیری تشکیل می‌دهد که رفتار شبه‌پلاستیک ماده اولیه را افزایش داده و امکان چاپ‌پذیری را فراهم می‌کند (Anukiruthika et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر، گوشت مرغ چرخ‌کرده همراه با آرد گندم تصفیه‌شده و مقدار کافی آب، یک پیش‌مخلوط و خمیر نیمه‌جامد تشکیل داد. امولسیون حاصل، جریان‌پذیری را بهبود بخشید و قابلیت چاپ گوشت مرغ را افزایش داد (Wilson, Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). رویکرد مشابهی نیز برای غنی‌سازی فیبر در گوشت چاپ سه‌بعدی، از طریق افزودن آرد ترکیبی

مبتنی بر ارزن و حبوبات به مرغ چرخ‌کرده، به کار گرفته شد (Wilson, Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2021). این رویکرد به‌طور قابل توجهی محتوای فیبر غذایی سازه مرغ سه‌بعدی را بهبود بخشید. در مطالعه‌ای دیگر نیز، پوست سیب‌زمینی غیرقابل چاپ با آرد گندم کامل چاپ شد (Madhumitha, Abinash, Rahul, & Gupta, 2021). این مبحث نشان می‌دهد که می‌توان از ضایعات حاصل از خطوط فرآوری مواد غذایی در چاپ سه‌بعدی با ارزش افزوده استفاده کرد.

مواد قابل جایگزین کاربردی در چاپ سه‌بعدی غذا

دهه حاضر با کاهش فزاینده منابع تجدیدپذیر روبرو است. این وضعیت، زنجیره تأمین غذا را با تهدیدی جدی مواجه کرده و پیامدهای قابل توجهی بر تولید غذا به دلیل شرایط آب و هوایی غیرقابل پیش‌بینی به همراه دارد (D'Amour et al., 2020). اخیراً، بخش امور اقتصادی و اجتماعی سازمان ملل متحد پیش‌بینی کرده است که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۸ میلیارد و تا سال ۲۱۰۰ به ۱۱/۲ میلیارد نفر خواهد رسید (United Nations, 2017). این روند افزایشی جمعیت، کمبود منابع غذایی را تشدید خواهد کرد و نیاز به توسعه فناوری‌های پایدار تولید غذا را ضروری می‌سازد.

با در نظر گرفتن این چالش‌ها، چاپ سه‌بعدی غذا به‌عنوان یک فناوری نوین، توجه پژوهشگران صنعت غذا را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. این رویکرد پایدار، راه‌حلی امیدوارکننده برای نگرانی‌های متعدد از جمله تغییرات آب و هوایی، رشد جمعیت، افزایش تقاضای غذا، هدررفت مواد غذایی و کمبود منابع طبیعی ارائه می‌دهد (Jayaprakash, Ituarte, & Partanen, 2019). استفاده از منابع غذایی غیرمعمول، کمتر کاوش‌شده و کمتر استفاده‌شده به‌عنوان ماده پایه در چاپ سه‌بعدی، راه را برای تولید غذاهای پایدار جدید هموار می‌سازد (Nachal et al., 2019).

استفاده بیش از حد از زمین و کاهش مراتع برای پرورش دام، به استثمار محیط‌زیست منجر شده است. علاوه بر این، کمبود پروتئین در

مواد اولیه غذایی جایگزین، دامنه وسیعی برای تجاری سازی دارند و امکان تولید غذاهای سفارشی با شکل، طعم، بافت و رنگ دلخواه را فراهم می کنند، ضمن اینکه کنترل دقیقی بر ارزش تغذیه ای آن ها وجود دارد. از این رو، افزایش آگاهی نسبت به پایداری محیطی، صنعت غذا را به سمت جستجوی مواد اولیه نوآورانه سوق می دهد (Prakash et al., 2019). چاپ سه بعدی راهی امیدوارکننده برای غنی سازی منابع غذایی با استفاده از مواد ارزان قیمت مانند حشرات، جلبک ها و ضایعات غذایی است که می توانند به شیوه ای جذاب و جالب ارائه شوند. با این حال، مطالعات بیشتری در زمینه استفاده از مواد اولیه جایگزین لازم است تا درک مصرف کنندگان نسبت به این منابع افزایش یابد. این امر به پذیرش حسی آن ها در اشکال جدید و نامحسوس کمک کرده و استانداردسازی ایمنی این محصولات را تسهیل خواهد کرد.

رژیم های غذایی گیاهی و وگان^۱، همچنان یک نگرانی بهداشتی مهم محسوب می شود. بنابراین، بررسی منابع جایگزین پروتئین برای رفع این چالش ها ضروری است. منابع جایگزین پروتئین شامل حشرات (شکل ۸)، لوبین ها، جلبک های دریایی و قارچ ها هستند که به عنوان منابع غنی پروتئین و فیبر شناخته می شوند (Sun et al., 2018b). چاپ سه بعدی، با درجه آزادی بالایی که در طراحی و تولید ارائه می دهد، می تواند به طور مؤثری برای چاپ این منابع غذایی نوآورانه و کمتر رایج به کار گرفته شود تا غذاهای مغذی تری تولید گردد. همچنین، جریان های پساب و ضایعات حاصل از خطوط فرآوری غذا، مانند پوست میوه و سبزیجات، ضایعات گوشت و قطعات ماهی، می توانند به طور مؤثری به عنوان منبع مواد اولیه در چاپ سه بعدی استفاده شوند (Ricci et al., 2019). این مواد را می توان پس از خشک کردن به صورت پودر درآورد، فرآوری کرد و با استفاده از روش چاپ مبتنی بر اکستروژن در فرمولاسیون غذا گنجانند.



شکل ۸- نمونه های هندسی چاپ شده سه بعدی از آرد حشرات (Susana, 2025)

Fig. 8. 3D geometry samples of insect flour (Susana, 2025)

چاپ مجدد سرد و تثبیت می شوند. این فرآیند گرم و سرد شدن، امکان رشد میکروارگانیسم ها را افزایش داده و ماندگاری محصولات را کاهش می دهد. استانداردسازی و بهینه سازی ویژگی های فیزیکی شیمیایی و رئولوژیکی مستلزم بکارگیری پیش پردازش (مانند خرد کردن، حرارت دهی، تنش برشی و...) است که باعث تغییر در ساختار مولکولی (مانند پیوندهای عرضی، اندازه ذرات، بافت فیبری) می شود. این تغییرات می تواند مانع حفظ ساختار از پیش تعیین شده شود و بافت ناخوشایندی برای مصرف کننده ایجاد کند. همچنین، این تغییرات می توانند بر طعم و جذابیت محصول اثر منفی بگذارند. بنابراین، برای هر جوهر خوراکی، نیاز به استانداردسازی مواد تشکیل دهنده و بهینه سازی پارامترهای چاپگر مخصوص به خود دارد. در ضمن بعضی محصولات به فرآیندهای

چالش ها و چشم انداز آینده

فناوری چاپ سه بعدی غذا، یکی از حوزه های نوظهور و پیشرو در صنعت فرآوری مواد غذایی است، هرچند هنوز در مراحل ابتدایی توسعه قرار دارد. این فناوری امکان تولید محصولات با اشکال متنوع را با استفاده از فرمولاسیون های ویژه مواد فراهم می کند و مزایای متعددی دارد، اما با چالش های فنی نیز روبرو است. این چالش ها را می توان از جنبه های فنی، ایمنی و قانونی، مشتری پسندی و اقتصادی بحث و بررسی کرد.

چالش های فنی: این روش نیازمند زمان طولانی و تجهیزات تخصصی است. مواد پوره ای (جوهرهای خوراکی) مورد استفاده، ضمن پایداری مناسب، فسادپذیر بوده و دوره نگهداری کوتاهی دارند و پیش از عبور از نازل، برای افزایش شکل پذیری گرم شده و سپس در بستر

(افرادی که رژیم غذایی بر پایه گیاهان دارند و حتی فرآورده های حیوانی نظیر لبنیات را هم استفاده نمی کنند).

1- Vegan

هزینه‌ی بالای فرآیند می‌تواند مشکلات قابل‌توجهی ایجاد کند. این فرآیند در حال حاضر نسبتاً کند است و قیمت بالای چاپگرهای سه‌بعدی نیز کاربرد آن‌ها را عمدتاً به حوزه‌های پژوهشی محدود کرده است، نه تولید در مقیاس صنعتی. با این حال، با پیشرفت فناوری، انتظار می‌رود چاپگرهای سه‌بعدی تجاری به‌تدریج در بازار در دسترس‌تر شوند و علاوه بر محیط‌های صنعتی، در آشپزخانه‌های خانگی و سازمان‌های کوچک نیز مورد استفاده قرار گیرند (Anandharamakrishnan et al., 2022; Hussain et al., 2022; Sundarsingh et al., 2024).

نتیجه‌گیری

چاپ سه‌بعدی مواد غذایی، به‌عنوان یک فرآیند رباتیک دیجیتال با رویکردهای پایدار در تولید غذا، توانسته است زنجیره تأمین سنتی مواد غذایی را متحول کند. کیفیت نهایی سازه‌های خوراکی چاپ‌شده، عمدتاً به ماهیت مواد اولیه‌ی به‌کاررفته بستگی دارد. قابلیت چاپ به مقاومت ذاتی ماده‌ی چاپ‌شده در برابر وزن خود، هنگام رسوب بر روی بستر چاپ اشاره دارد. میزان کربوهیدرات، لیپید، پروتئین و فیبر در ماده‌ی اولیه، بیشترین تأثیر را بر قابلیت چاپ دارد. مواد اولیه برای چاپ معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: قابل چاپ، غیرقابل چاپ و مواد جایگزین. با استفاده از پیش‌پردازش‌ها، خواص فیزیکوشیمیایی مواد اولیه تنظیم شده و آن‌ها را برای ساخت لایه به لایه مناسب می‌کنند. مطالعات پیرامون مواد قابل چاپ می‌تواند به نتایج چشمگیری در تبدیل رژیم غذایی معمول ما به دستورالعمل‌های چاپ دیجیتال منجر شود. دستیابی به قابلیت چاپ در مواد غذایی که به‌طور سنتی غیرقابل چاپ هستند، از طریق پیش‌فرآوری مناسب مواد اولیه امکان‌پذیر است. از طریق توجیه علمی و مطالعه‌ی دقیق عوامل مؤثر بر چاپ‌پذیری مواد طبیعی، می‌توان بر پیچیدگی‌های مرتبط با چاپ‌پذیری مواد غیرقابل چاپ غلبه کرد.

چاپ سه‌بعدی، به‌عنوان یک فناوری مستقل در صنعت غذا، پتانسیل ایجاد تحول از طریق طراحی، تولید، نوآوری و سفارشی‌سازی غذاها با استفاده از مواد قابل چاپ را دارد. استفاده از غذاها غیرقابل چاپ در فرآیند چاپ سه‌بعدی، طعم و تنوع جدیدی به غذاها می‌بخشد. ساخت سازه‌های سه‌بعدی با استفاده از مواد اولیه جایگزین و منابع نوآورانه‌ی غذایی، به‌طور قابل‌توجهی انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد و به‌عنوان راه‌حلی امیدوارکننده برای رفع گرسنگی جهانی، به‌ویژه سوءتغذیه و کمبودهای تغذیه‌ای در میان نوزادان و نوجوانان، مطرح است. علاوه بر این، چاپ مواد غذایی امکان ارزش‌آفرینی از ضایعات غذایی را فراهم کرده و تبدیل این ضایعات به ثروت، به ایجاد یک اقتصاد چرخشی سبزتر کمک می‌کند. در بلندمدت، پیش‌بینی می‌شود که چاپ سه‌بعدی با ادغام چندین مرحله در یک واحد

تکمیلی مانند پختن، جوشاندن، سرخ کردن، انجماد و بخارپز کردن، نیاز داشته که ممکن است کیفیت، محصولات نهایی را تخریب کنند.

جنبه‌های ایمنی و قانونی: تضمین ایمنی محصولات غذایی چاپ سه‌بعدی از همان ابتدای فرآیند تولید آغاز می‌شود. تماس احتمالی اجزای چاپگر با مواد اولیه یا غذای در حال تولید، نگرانی‌هایی در مورد آلودگی میکروبی و مهاجرت ترکیبات شیمیایی ایجاد می‌کند. این خطرات با بازرسی‌های دقیق و اجرای برنامه‌های منظم نظافت برای تمام سطوح در تماس با غذا، قابل کاهش است. سطوح تماس غذایی در چاپگرهای سه‌بعدی باید با استانداردهای مقرراتی مطابقت داشته باشند؛ به این معنی که باید ایمن، بادوام، مقاوم در برابر خوردگی، غیرجاذب و قابل بازرسی باشند. طراحی این سطوح باید امکان تمیزکاری آسان را فراهم کند و عاری از هرگونه شکاف، ترک یا زاویه‌ی داخلی تیز باشد. بزرگترین مانع توسعه‌ی چاپ سه‌بعدی غذا، همچنان در چارچوب‌های حقوقی و قانونی نهفته است که شامل مقررات ایمنی، الزامات برچسب‌گذاری و پذیرش مصرف‌کننده می‌شود. در حال حاضر، محصولات غذایی چاپ سه‌بعدی در اتحادیه اروپا به‌عنوان «غذای نوظهور» طبقه‌بندی شده و مشمول مقررات مربوطه هستند. این مقررات شامل تضمین ایمنی مصرف‌کننده، برچسب‌گذاری شفاف و جلوگیری از کاهش ارزش تغذیه‌ای نسبت به محصولات جایگزین است. سازمان غذا و داروی ایالات متحده^۱ تاکنون مقررات مشخصی برای چاپ سه‌بعدی غذا وضع نکرده است. علاوه بر این، مسائل مربوط به حقوق ثبت اختراع، حق نشر و برچسب‌گذاری نیز از موانع قابل توجه در این حوزه به شمار می‌روند.

پذیرش مشتری: با اینکه بخشی از جامعه نسبت به پذیرش غذای چاپ‌شده‌ی سه‌بعدی دیدگاه مثبتی دارند، بخش عمده‌ای از مردم همچنان درباره‌ی نقش، اهمیت و مصرف آن در زندگی روزمره مردد و نگران هستند. برخی از مصرف‌کنندگان، به‌دلیل فرآوری بیشتر مواد اولیه غذایی و تغییر بافت غذا، بر اولویت‌دادن به مصرف «غذای واقعی» نسبت به «غذای چاپی» تأکید دارند؛ با این حال، برخی افراد نیز پذیرش غذای چاپی را مطرح کرده‌اند، به‌ویژه به‌دلیل ظرفیت آن در ارتقای ارزش تغذیه‌ای و سازگار شدن با رژیم‌های غذایی و سلیقه‌های شخصی. برای مثال، می‌توان به تولید یک رژیم غذایی متعادل برای افراد اوتیسمی، افراد دارای مشکل بلع، و گروه‌های سنی مختلف اشاره کرد. انتظار می‌رود با پیشرفت بیشتر فناوری چاپ سه‌بعدی غذا، میزان پذیرش مصرف‌کنندگان نیز به‌تدریج افزایش یابد.

چالش‌های اقتصادی: از دیگر چالش‌های این حوزه می‌توان به هزینه‌های مالی بالا و قیمت زیاد محصولات نهایی اشاره کرد. در صورت تولید انبوه غذای چاپ‌شده‌ی سه‌بعدی، سرعت پایین چاپ و

منابع تأمین مالی

این پژوهش فاقد هرگونه تأمین مالی خارجی بوده است.

مشارکت نویسندگان

ح. لشکری: ایده پردازی، نگارش، بازبینی و ویرایش متن، نظارت.
ش. اسمعیل زاده: گردآوری مطالب، بازبینی و ویرایش متن.

تولیدی، شیوه‌های تولید غذا را بازتعریف کرده و زنجیره تأمین غذا را ساده‌تر نماید. با این حال، تحقیقات بیشتری باید بر روی قابلیت چاپ مواد غذایی معمولی منطقه‌ای انجام شود تا بتوان از تمام مزایای چاپ سه بعدی در بخش غذا بهره‌مند شد. در نهایت، چاپ سه بعدی به عنوان یک فناوری «چاپ و خوردن»، سازمان‌دهی توزیع غذا و زنجیره تأمین را دگرگون ساخته و به اقتصادی پایدار و چرخشی منجر خواهد شد.

References

1. Agunbiade, A., Song, L., Agunbiade, O., Ofoedu, C., Chacha, J., Duguma, H., ... & Guiné, R. (2022). Potentials of 3D extrusion-based printing in resolving food processing challenges: A perspective review. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13996>
2. Anandharamakrishnan, C., Moses, J.A., & Anukiruthika, T. (2022). *3D food printing*. Wiley. Hoboken. <https://lccn.loc.gov/2021040694>
3. Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends *Journal of Food Engineering*, 265, 109691. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109691>
4. Chen, H., Xie, F., Chen, L., & Zheng, B. (2019a). Effect of rheological properties of potato, rice and corn starches on their hot-extrusion 3D printing behaviors[J]. *Journal of Food Engineering*, 244, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.j-foodeng.2018.09.011>
5. Chen, J., Mu, T., Goffin, D., Blecker, C., Richard, G., Richel, A., & Haubruge, E. (2019b). Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, 261, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.016>
6. Co, E.D., & Marangoni, A.G. (2018). *Oleogels: an introduction*. In: *Edible Oleogels*. PP 1-29 in A.G. Marangoni & N. Garti eds. Elsevier, Canada. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814270-7.00001-0>
7. Cotabarren, I.M., Cruces, S., & Palla, C.A. (2019). Extrusion 3D printing of nutraceutical oral dosage forms formulated with monoglycerides oleogels and phytosterols mixtures. *Food Research International*, 126, 108676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108676>
8. D'Amour, C.B., Pandey, B., Reba, M., Ahmad, S., Creutzig, F., & Seto, K.C. (2020). Urbanization, processed foods, and eating out in India. *Global Food Security*, 25, 100361. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100361>
9. Daffner, K., Vadodaria, S., Ong, L., Nöbel, S., Gras, S., Norton, I., & Mills, T. (2020). Design and characterization of casein whey protein suspensions via the pH-temperature-route for application in extrusion-based 3D-Printing. *Food Hydrocolloids*, 112, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105850>
10. Dai, F.-J., & Chau, C.-F. (2017). Classification and regulatory perspectives of dietary fiber. *Journal of Food and Drug Analysis*, 25(1), 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.09.006>
11. Devi, A., & Khatkar, B.S. (2016). Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3633–3641. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2355-0>
12. Dick, A., Bhandari, B., & Prakash, S. (2019). Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef. *Meat Science*, 153, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.024>
13. Dong, X., Huang, Y., Pan, Y., Wang, K., Prakash, S., & Zhu, B. (2019). Investigation of sweet potato starch as structural enhancer for 3D printing of *Scomberomorus niphonius* surimi. *Journal of Texture Studies*, 50, 316–324. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12398>
14. Esmailzadeh, Sh. (2023). Metal additive manufacturing technology: A review of biomedical applications. *Chemistry & Nanochemistry*, 2(3), 25-41. <https://www.magiran.com/p2703519>
15. Esmailzadeh, Sh., Vaghefi, M., Esmailzadeh, B., & Tavallali, M.S. (2025). 3D printing technology and additive manufacturing: a review of biomedical application, *Razi Journal Medical Sciences*, 32(59), 1-17. <https://doi.org/10.47176/rjms.32.59>
16. Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Proto Typing*, 5, 57–64. <https://doi.org/10.1080/17452751003753212>

17. Huang, V.T., & Perdon, A.A. (2020). *Major changes in cereal biopolymers during ready-to-eat cereal processing*. PP 109–140 in A.A. Perdon, S.L. Schonauer and K.S. Poutanen eds. *Breakfast Cereals and How They Are Made*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812043-9.00006-0>
18. Hussain, S., Malakar, S., & Arora, V.K. (2022). Extrusion-based 3D food printing: Technological approaches, material characteristics, printing stability, and post-processing. *Food Engineering Reviews*, 14, 100–119. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09293-w>
19. Jayaprakash, S., Ituarte, I.F., & Partanen, J. (2019). *Prosumer-driven 3D food printing: role of digital platforms in future 3D food printing systems*. PP 331–354 in F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00011-0>
20. Karyappa, R., & Hashimoto, M. (2019). Chocolate-based ink three-dimensional Printing (Ci3DP). *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50583-5>
21. Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: a study on button mushroom. *Journal of Food Engineering*, 287, 110116. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110116>
22. Kim, H.W., Bae, H., & Park, H.J. (2018). Classification of the printability of selected food for 3D printing: development of an assessment method using hydrocolloids as reference material. *Journal of Food Engineering*, 215, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.017>
23. Lanaro, M., Desselle, M.R., & Woodruff, M.A. (2019). *3D printing chocolate: properties of formulations for extrusion, sintering, binding and ink jetting*. PP 151–173 In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*, Academic Press, United Kingdom. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00006-7>
24. Lashkari, H. (2025a). Recent advances in extrusion technology in the food industry. The Third International Conference and the Fourth National Conference on Agriculture, Environment, and Food Security, Jiroft. <https://civilica.com/doc/2347057>
25. Lashkari, H. (2025b). Encapsulation, a novel technology in food processing. The Third International Conference and the Fourth National Conference on Agriculture, Environment, and Food Security, Jiroft. <https://civilica.com/doc/2347156>
26. Lashkari, H., & Esmailzadeh, Sh., (2025c). Common 3D printer configurations in the food industry. *Chemestry & Nanochemistry*, 4(1), 33–47. <https://sanad.iau.ir/Journal/crn/Article/1207081>
27. Lee, J.H, Won, D.J., Kim, H.W., Park, H.J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *Journal of Food Engineering*, 256, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.-2019.03.014>
28. Li, G., Hu, L., Liu, J., Huang, J., Yuan, C., Takaki, K., & Hu, Y. (2022). A review on 3D printable food materials: types and development trends. *International Journal of Food Science and Technology*, 57, 164–172. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15391>
29. Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsa-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>
30. Liu, Y., Tang, T., Duan, S., & Qin, Z. (2020a). Effects of sodium alginate and rice variety on the physicochemical characteristics and 3D printing feasibility of rice paste. *LWT*, 127, 109360. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109360>
31. Lu, W., Nishinari, K., Matsukawa, S., & Fang, Y. (2020). The future trends of food hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 103, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105713>
32. Madhumitha, M., Abinash, V., Rahul, T., & Gupta, R.K.(2021). Valorization of food industry wastestreams using 3D printing: a study on noodles prepared from potato peel waste. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02675-2>
33. Mantihal, S., Prakash, S., & Bhandari, B. (2019a). Textural modification of 3D printed dark chocolate by varying internal infill structure. *Food Research International*, 121, 648–657. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.034>
34. Nachal, N., Moses, J., Karthik, K., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Applications of 3D printing in food industry: a review. *Food Engineering Reviews*, 11(3), 123–141. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09199-8>
35. Nazir, A., Asghar, A., & Maan, A.A. (2017). Food gels: gelling process and new applications. *Advances in Food Rheology and Its Applications*, 335–353. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100431-9.00013-9>
36. Oskay, W., & Edman, L. (2009). *The CandyFab Project*. Evil Scientist Laboratories. <https://candyfab.org/>
37. Pan, Y., Sun, Q., Liu, Y., Wei, S., Han, Z., Zheng, O., Ji, H., Zhang, B., & Liu, S. (2024) Investigation on 3D printing of shrimp surimi under different printing parameters and thermal processing conditions, *Current Research in Food Science*, 8, 100745. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100745>

38. Phan, M.M., & Stodolska, M. (2019). Food practices, dietary patterns, and leisure among Mexican Americans in the Midwestern US. *Annals of Leisure Research*, 23, 1–18. <https://doi.org/10.1080/11745398.2019.1571929>
39. Prakash, S., Bhandari, B.R., Godoi, F.C., & Zhang, M. (2019). *Future outlook of 3D food printing*. PP 373–381 In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00013-4>
40. Rando, P., & Ramaioli, M. (2020). Food 3d printing: effect of heat transfer on print stability of chocolate. *Journal of Food Engineering*, 294, 110415. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110415>
41. Rebaka, V.P., Rachamalla, A.K., Batra, S., & Subbiah, N. (2020). *State of the Art and New Perspectives in Oleogels and Applications*. PP 151–182 in Inamuddin, A. Asiri eds. *Sustainable Green Chemical Processes and their Allied Applications*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42284-4_6
42. Ricci, I., Derossi, A., & Severini, C. (2019). 3D printed food from fruits and vegetables. PP 117–149 in F.C. Godoi, B. R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00005-5>
43. Shah, P., Shah, V., Shrestha, S., & Mitra, P. (2024) A review on 3D food printing technology in food processing. *Journal of Food Industry*, 8(1), 17–34. <https://doi.org/10.5296/jfi.v8i1.22468>
44. Southerland, D., Walters, P., & Huson, D. (2011). *Edible 3D printing*. NIP & Digital Fabrication Conference. (2), 819–822. https://doi.org/10.2352/issn.2169-4451.2011.27.1.art00105_2
45. Sun, J., Zhou, W., Huang, D., & Yan, L. (2018a). *3D food printing: perspectives*. PP 725–755 In T. Gutierrez eds. *Polymers for Food Applications*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2_26
46. Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J.Y.H., & Hong, G.S. (2015). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1605–1615. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1528-6>
47. Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L.Y. (2018b). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
48. Sundarsingh, A., Zhang, M., Mujumdar, A.S., & Li, J. (2024). Research progress in printing formulation for 3D printing of healthy future foods. *Food and Bioprocess Technology*, 17, 3408–3439. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03265-0>
49. Susana Soares: Insects Au Gratin/Project. (2025). Available online: <https://www.susanasoares.com/index.php?id=82>
50. Takagishi, K., Suzuki, Y., & Umezui, S. (2018). The high precision drawing method of chocolate utilizing electrostatic ink-jet printer. *Journal of Food Engineering*, 216, 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.017>
51. Theagarajan, R., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D extrusion printability of rice starch and optimization of process variables. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1048–1062. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02453-6>
52. United Nations. (2017). World population projected to reach 9.8 billion in 2050 and 11.2 billion in 2100. Department of Economic and Social Affairs, United Nations. <https://doi.org/10.31899/pdr2022.1002>
53. Vancauwenberghe, V., Katalagarianakis, L., Wang, Z., & Meerts, M. (2017). Pectin based food-ink formulations for 3-D printing of customizable porous food simulants. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.011>
54. Wang, M.S., Li, D.N., Zang, Z. Sun, X., Tan, H., Si, X., Tian, J., Teng, W., Wang, J., Liang, Q., Bao, Y., Li, B., & Liu, R. (2022). 3D food printing: applications of plant-based materials in extrusion-based food printing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(26), 7184–7198. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1911929>
55. Warner, E.L., Norton, I.T., & Mills, T.B. (2019). Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications. *Journal of Food Engineering*, 246, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.033>
56. Wilms, P., Daffner, K., Kern, C., Gras, S.L., & Kohlus, R. (2021). Formulation engineering of food systems for 3d-printing applications— a review. *Food Research International*, 2, 110585. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110585>
57. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Customized shapes for chicken meat-based products: feasibility study on 3D-printed nuggets. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1968–1983. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02537-3>
58. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Preparation of fiber-enriched chicken meat constructs using 3D printing. *Journal of Culinary Science & Technology*, 127–138. <https://doi.org/10.1080/15428052.2021.1901817>

59. Yang, F., Zhang, M., Prakash, S., & Liu, Y. (2018a). Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.001>
60. Yegin, S., Kopec, A., Kitts, D.D., & Zawistowski, J. (2020). *Dietary fiber: a functional food ingredient with physiological benefits*. PP 531–555 in H.G. Preuss and D. Bagchi eds. *Dietary Sugar, Salt and Fat in Human Health*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816918-6.00024-X>
61. Zhao, Z.L., Wang, Q., Yan, B., Gao, W., Jiao, X.D., Huang, J., Zhao, J., Zang, H., Chen, W., & Damin, F. (2020). Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67, 102546. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102546>
62. Zinina, O., Merenkova, S., Tazeddinova, D., & Rebezov, M. (2019). Enrichment of meat products with dietary fibers: a review., *Agronomy Research*, 17(4), 1808–1822. <https://doi.org/10.15159/ar.19.163>

Review Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 431-448

A Comprehensive Review of the Application of Phase Change Materials in Food Packaging: Their Impact on Cold Chain Performance and Product Quality Preservation

H. Yazdanbakhsh¹, S. Alahmoradi¹, M.H. Moradiyan², M. Azizi-Lalabadi^{3*}

1- Student Research Committee, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

2- Department of Food Science and Technology, Faculty of Nutrition Science and Food Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3- Research Center of Oils and Fats, Health Technology Institute, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding Author Email: maryamazizi766@gmail.com)

Received: 09.06.2026

Revised: 06.08.2026

Accepted: 19.08.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Yazdanbakhsh, H., Alahmoradi, S., Moradiyan, M.H., & Azizi-Lalabadi, M. (2026). A comprehensive review of the application of phase change materials in food packaging: Their impact on cold chain performance and product quality preservation. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 431-448. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.99112.1586>

Introduction

Temperature control throughout the food supply chain plays a pivotal role in preserving product quality and safety as well as extending shelf life. In recent years, phase change materials (PCMs) have emerged as a promising component of intelligent packaging systems due to their ability to regulate temperature through the absorption and release of latent heat. This passive thermal management mechanism effectively minimizes temperature fluctuations, reduces reliance on active refrigeration systems, and enhances the overall thermal stability of food products during storage and transportation. In particular, temperature fluctuations during transportation, retail display, and temporary interruptions in refrigeration can accelerate undesirable physicochemical, microbiological, and sensory changes in perishable foods. Therefore, maintaining a stable thermal environment is essential for products such as dairy products, meat, seafood, fresh produce, and other temperature-sensitive foods. Unlike conventional cooling systems that continuously consume energy, PCM-based approaches can store excess thermal energy when the surrounding temperature increases and release the stored latent heat when the temperature decreases. This characteristic makes PCMs particularly attractive for passive thermal buffering and for mitigating short-term temperature deviations within the cold chain.

Materials and methods

This review was conducted through a comprehensive search of the scientific literature available in major databases, including Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar. Relevant studies investigating the application of phase change materials (PCMs) in food packaging and cold chain systems were identified using carefully selected keywords. The retrieved publications were screened and selected based on their relevance to PCM properties, incorporation strategies, thermal performance, and their role in preserving food quality during storage and transportation. The selected studies were then critically evaluated and synthesized to provide a comprehensive overview of the current state of knowledge, recent technological advances, existing challenges, and future research directions in this field. Particular attention was given to studies addressing the physicochemical characteristics of PCMs, including phase transition temperature, latent heat capacity, thermal stability, and compatibility with packaging matrices. In addition, reported effects on temperature regulation, product quality, storage stability, and cold-chain performance were considered in order to identify the practical



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.2026.99112.1586>

potential of these technologies. The available evidence was compared across different PCM types and packaging configurations to highlight the factors that determine their effectiveness under realistic food storage and transportation conditions.

Results and Discussion

The findings of recent studies indicate that current attention has primarily focused on the development of biocompatible and biodegradable PCMs, the enhancement of thermal conductivity through the incorporation of nanomaterials, and the improvement of physical stability using encapsulation and shape-stabilization technologies. Significant advances in microencapsulation and nanoencapsulation techniques, the use of polymeric and biopolymeric shell materials, and the development of stable composite structures have contributed to reducing PCM leakage, enhancing thermal and mechanical stability, improving heat storage efficiency, and maintaining long-term performance over repeated melting and freezing cycles.

Despite these considerable advancements, several challenges continue to hinder the large-scale industrial application of PCM-based technologies. High production costs, the risk of material leakage during phase transitions, the inherently low thermal conductivity of some PCMs, and the difficulty of selecting an appropriate operating temperature range remain among the major limitations that must be addressed for broader commercial implementation. Recent research also suggests that the selection of an appropriate PCM should be closely related to the temperature requirements of the target food product and the conditions encountered throughout the cold chain. Organic PCMs, including fatty acids and paraffin-based materials, have received considerable attention because of their relatively suitable phase transition characteristics and chemical stability. At the same time, bio-based and biodegradable materials are increasingly being investigated to reduce environmental concerns associated with conventional packaging systems. The use of encapsulated PCMs can further improve their compatibility with packaging matrices and reduce direct contact between the PCM and food, which is particularly important when considering food safety and regulatory requirements. Moreover, combining PCMs with polymers, biopolymers, nanomaterials, or other functional components may provide multifunctional packaging systems capable of simultaneously improving thermal regulation and mechanical or barrier properties.

Conclusion

Overall, this review provides a comprehensive overview of the current state of research and demonstrates that the development of sustainable, biocompatible, and cost-effective phase change materials (PCMs) can play a significant role in improving the performance of intelligent packaging systems, enhancing food safety, increasing the efficiency of the cold chain, and reducing the environmental impact of the packaging industry. The evidence reviewed in this study further indicates that the future development of PCM-based food packaging should move beyond simple thermal regulation toward integrated systems that combine effective heat management with sustainability, food safety, and improved packaging functionality. Greater emphasis on scalable encapsulation methods, biodegradable carrier materials, standardized performance evaluation, and validation under real cold-chain conditions will be essential for successful commercialization. Overall, continued interdisciplinary research involving food science, materials engineering, nanotechnology, and packaging technology can contribute to the development of reliable PCM-based solutions capable of reducing temperature-related quality losses and supporting a more sustainable and efficient food supply chain.

Keywords: Cold chain, Food quality, Phase change materials, Temperature control, Temperature fluctuation

مقاله مروری

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۴۴۸-۴۳۱

مروری جامع بر کاربرد مواد تغییر فاز در بسته‌بندی مواد غذایی: تأثیر آن‌ها بر کارایی زنجیره سرد، و حفظ کیفیت محصول

حنانه یزدان‌بخش^۱ - سودابه اله مرادی^۱ - محمد هادی مرادیان^۲ - مریم عزیزی لعل آبادی^{۳*} ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

چکیده

کنترل دما در طول زنجیره تأمین مواد غذایی نقش کلیدی در حفظ کیفیت، ایمنی و افزایش ماندگاری محصولات دارد. استفاده از مواد تغییر فاز (PCMs) به عنوان یکی از رویکردهای نوین در بسته‌بندی هوشمند، امکان تنظیم خودکار دما از طریق جذب و رهایش گرمای نهان را فراهم کرده و موجب کاهش نوسانات حرارتی، کاهش وابستگی به سیستم‌های سرمایشی فعال و بهبود پایداری حرارتی محصولات می‌شود. این بررسی از طریق جستجوی گسترده در متون علمی موجود در پایگاه‌های داده اصلی، از جمله ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Scopus و Google Scholar انجام شد. مطالعات مربوط به استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در بسته‌بندی مواد غذایی و کاربردهای زنجیره سرد با استفاده از کلمات کلیدی مرتبط شناسایی شدند. انتشارات بازایی شده بر اساس ارتباط آنها با ویژگی‌های PCM، روش‌های ترکیب، عملکرد حرارتی و نقش آنها در حفظ کیفیت مواد غذایی در طول نگهداری و حمل و نقل، بررسی و انتخاب شدند. سپس مطالعات انتخاب شده به صورت انتقادی ارزیابی و ترکیب شدند تا مروری جامع بر دانش فعلی، پیشرفت‌های اخیر و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده در این زمینه ارائه دهند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های اخیر عمدتاً بر توسعه PCMs های زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر، افزایش هدایت حرارتی از طریق افزودن نانومواد، و بهبود پایداری فیزیکی با استفاده از فناوری‌های کپسوله‌سازی و تثبیت شکل متمرکز بوده‌اند. در این میان، پیشرفت در روش‌های ریز کپسوله‌سازی و نانوکپسوله‌سازی، استفاده از پوسته‌های پلیمری و زیست‌پلیمری، و توسعه کامپوزیت‌های پایدار، موجب کاهش نشت PCM، افزایش پایداری حرارتی و مکانیکی، بهبود راندمان ذخیره‌سازی گرما و افزایش دوام عملکرد در چرخه‌های مکرر ذوب و انجماد شده است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی نظیر هزینه بالای تولید، احتمال نشت ماده در هنگام ذوب، محدودیت هدایت حرارتی برخی PCMs و انتخاب محدوده دمایی مناسب، همچنان از مهم‌ترین موانع کاربرد صنعتی این فناوری به شمار می‌روند. در مجموع، این مطالعه ضمن ارائه تصویری جامع از وضعیت کنونی پژوهش‌ها، نشان می‌دهد که توسعه مواد تغییر فاز پایدار، زیست‌سازگار و مقرون به صرفه می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای عملکرد بسته‌بندی‌های هوشمند، افزایش ایمنی مواد غذایی، بهبود کارایی زنجیره سرد و کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت بسته‌بندی ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: زنجیره سرد، کنترل دما، کیفیت غذا، مواد تغییر فاز، نوسانات حرارتی

۱- کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، مؤسسه تحقیقات تغذیه و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات روغن‌ها و چربی‌ها، پژوهشکده فناوری سلامت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: maryamazizi766@gmail.com)

مقدمه

کنترل دما یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده در حفظ کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی حساس به فساد، به‌ویژه گوشت، قارچ و فرآورده‌های لبنی، در طول مراحل نگهداری، حمل‌ونقل و توزیع است. این دسته از محصولات به‌دلیل فعالیت بالای میکروبی، واکنش‌های آنزیمی و حساسیت شدید به شرایط محیطی، به سرعت تحت تأثیر تغییرات دمایی قرار گرفته و دچار افت کیفیت می‌شوند (Abedi-Firoozjah *et al.*, 2024; Azizi-Lalabadi, Rafiei, Divband, & Ehsani, 2020). در این راستا، حتی نوسانات دمایی کوتاه‌مدت در زنجیره سرد می‌تواند منجر به افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها، تسریع فرآیندهای اکسیداسیون لیپیدی، تغییرات بافتی و در نهایت کاهش ارزش تغذیه‌ای و حسی محصولات غذایی گردد. از این‌رو، مدیریت دقیق و پایدار دما در زنجیره سرد به‌عنوان یک چالش اساسی در صنایع غذایی مطرح شده است (Bahrami & Sablani, 2025). در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش تقاضا برای مواد غذایی تازه و با کیفیت بالا، توسعه سیستم‌های بسته‌بندی پیشرفته با قابلیت کنترل فعال شرایط محیطی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در این میان، بسته‌بندی فعال و هوشمند به‌عنوان رویکردی نوین، فراتر از نقش سنتی بسته‌بندی (یعنی صرفاً ایجاد یک مانع فیزیکی)، عمل کرده و امکان تعامل با محیط و بهبود شرایط نگهداری محصول را فراهم می‌سازد. یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در این حوزه، بهره‌گیری از مواد تغییر فاز به‌منظور مدیریت حرارتی و کاهش نوسانات دمایی در سیستم‌های بسته‌بندی است (Al-Gunaid *et al.*, 2023).

مواد تغییر فاز موادی هستند که قادرند در دمای مشخصی با جذب یا آزادسازی گرمای نهان، بدون تغییر محسوس در دمای خود، انرژی حرارتی را ذخیره یا آزاد کنند. این ویژگی منحصر به فرد باعث شده است که PCMs به‌عنوان یکی از مؤثرترین گزینه‌ها برای تثبیت دما در سیستم‌های حساس به تغییرات حرارتی شناخته شوند. در کاربردهای بسته‌بندی غذایی، این مواد با جذب گرمای اضافی در زمان افزایش دما و آزادسازی آن در شرایط افت دما، نقش یک بافر حرارتی را ایفا کرده و از بروز شوک‌های دمایی جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، استفاده از PCMs می‌تواند به‌طور مستقیم در افزایش پایداری کیفیت محصولات غذایی در طول زنجیره سرد مؤثر باشد (Bhatlawande, Ghatge, Shinde, Anushree, & Patil, 2024; Tas & Unal, 2021). از منظر طبقه‌بندی، PCMs مورد استفاده در صنایع غذایی عمدتاً شامل پارافین‌ها، اسیدهای چرب، مواد یوتکتیک، هیدرات‌های نمکی، اتیلن

گلیکول و آب هستند. هر یک از این گروه‌ها دارای ویژگی‌های ترمودینامیکی خاصی از جمله دمای ذوب، ظرفیت گرمای نهان، پایداری حرارتی و سازگاری شیمیایی متفاوت هستند که انتخاب آن‌ها را برای کاربردهای مختلف بسته‌بندی تعیین می‌کند. برای مثال، اسیدهای چرب به‌دلیل زیست‌سازگاری بالا و سمیت پایین، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای مرتبط با مواد غذایی محسوب می‌شوند، در حالی که پارافین‌ها به‌دلیل پایداری حرارتی مناسب و قیمت پایین، کاربرد گسترده‌تری در سیستم‌های ذخیره انرژی دارند (Thanakkasaranee & Seo, 2021). با وجود مزایای قابل توجه، استفاده مستقیم از PCMs در سیستم‌های بسته‌بندی با چالش‌های متعددی همراه است. مهم‌ترین محدودیت‌ها شامل نشت مواد در حالت مایع، کاهش پایداری مکانیکی، افت راندمان انتقال حرارت و ناسازگاری با برخی ماتریس‌های بسته‌بندی می‌باشد. این چالش‌ها موجب شده‌اند که استفاده از PCMs به شکل خالص در کاربردهای عملی محدود گردد و نیاز به راهکارهای بهبود عملکرد آن‌ها احساس شود. در پاسخ به این محدودیت‌ها، رویکرد کپسوله‌سازی به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای افزایش پایداری و کارایی PCMs معرفی شده است. در این روش، مواد تغییر فاز درون یک پوشش محافظ قرار گرفته و از تماس مستقیم با محیط اطراف جلوگیری می‌شود. این ساختار نه تنها از نشتی فاز مایع جلوگیری می‌کند (Bayram, Ozkan, Kostka, Capanoglu, & Esatbeyoglu, 2021; Jafarpour, Fathi, & Soltanizadeh, 2023)، بلکه موجب بهبود پایداری حرارتی، افزایش سطح تماس برای انتقال حرارت و کنترل بهتر رفتار حرارتی سیستم می‌گردد. در میان روش‌های مختلف کپسوله‌سازی، تکنیک الکتروریسی به‌دلیل توانایی تولید نانوالیاف با سطح ویژه بالا، تخلخل مناسب و قابلیت بارگذاری مؤثر مواد فعال، توجه ویژه‌ای در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است (Azizi-Lalabadi, Rahimzadeh-Sani, Feng, Hosseini, & Jafari, 2023; Swetha *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2022). الکتروریسی امکان طراحی ساختارهای نانوالیافی پیوسته و یکنواخت را فراهم می‌سازد که می‌توانند به‌عنوان ماتریس‌های مناسب برای بارگذاری PCMs عمل کنند. این ساختارها علاوه بر بهبود انتقال حرارت، امکان تنظیم خواص مکانیکی، افزایش انعطاف‌پذیری و طراحی بسته‌بندی‌های سبک و قابل حمل را فراهم می‌کنند. همچنین، استفاده از نانوالیاف موجب افزایش نسبت سطح به حجم شده و در نتیجه راندمان تبادل حرارتی در سیستم‌های بسته‌بندی بهبود می‌یابد (Hu *et al.*, 2025; Mehling, Brütting, & Haussmann, 2022).

PCMs آلی

PCMs آلی مانند پارافین‌ها، اسیدهای چرب و پلی‌اتیلن گلیکول به دلیل پایداری شیمیایی، غیرخورنده بودن و عدم جدایش فازی، کاربرد گسترده‌ای در مدیریت حرارتی دارند. اگرچه رسانایی حرارتی آن‌ها پایین است، اما ادغام آن‌ها با سایر PCMs یا استفاده هم‌زمان از چند نوع PCMs مختلف می‌تواند این ویژگی را بهبود بخشد. به دلیل هزینه نسبتاً پایین و گستره وسیع دمای تغییر فاز، PCMs آلی گزینه مناسبی برای کاربرد در شرایط نزدیک به دمای محیط به شمار می‌روند (Png et al., 2022). یکی از چالش‌های مهم PCMs آلی، نشتی و هدایت حرارتی پایین است که معمولاً با افزودن موادی مانند گرافن یا سیلیکا پیش از فرآیند کپسوله‌سازی برطرف می‌شود (Al-Gunaid et al., 2023). مثال‌های متعددی از کاربرد این دسته گزارش شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارافین به دلیل پایداری شیمیایی، خاصیت غیرخورندگی و ویژگی‌های مناسب در تغییر فاز، یکی از رایج‌ترین PCMs محسوب می‌شود. به عنوان مثال، پاهاملی و همکاران (Pahamli & Valipour, 2021) از پارافین در زنجیره سرد استفاده کردند. برای رفع مشکل نشتی و هدایت حرارتی پایین، ۱ درصد وزنی گرافن به پارافین افزوده شد. نتایج نشان داد که این ترکیب توانست دمای محصولات فسادپذیر را در حین حمل‌ونقل تثبیت کرده و علاوه بر افزایش ماندگاری، کیفیت محصول را نیز حفظ کند. با وجود مزایای متعدد، پارافین به دلیل ماهیت هیدروکربنی خود از هدایت حرارتی نسبتاً پایینی برخوردار است و در صورت عدم تثبیت ساختاری، هنگام ذوب ممکن است دچار نشت شود. از این رو، در سال‌های اخیر استفاده از مواد کربنی، نانوذرات معدنی و پلیمرهای متخلخل برای افزایش هدایت حرارتی و تثبیت شکل پارافین به یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهشی در توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند تبدیل شده است (Hassoun, Dankar, Bhat, & Bouzembrak, 2024). توانایی پارافین در تنظیم دما ناشی از آن است که با افزایش دما و عبور از نقطه ذوب، ذوب شده و گرمای اضافی را جذب می‌کند و همچنین در هنگام کاهش دما با انجماد انرژی را آزاد می‌سازد (Duquesne et al., 2021). اتیلن گلیکول نیز به دلیل پایداری شیمیایی، غیرخورنده بودن، غیرسمی بودن و قابلیت تنظیم نقطه ذوب از طریق تغییر وزن مولکولی، کاربرد گسترده‌ای در ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی دارد (Zhao et al., 2022). در مطالعه‌ای توسط داراداری و همکاران (Dardari et al., 2025)، پلی‌اتیلن گلیکول به عنوان PCM به ترکیب PVA/کاراژینان در بسته‌بندی بستنی اضافه شد. نتایج نشان داد که ایلاف حاوی PCM عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های بدون آن داشتند، زیرا ظرفیت بافری حرارتی آن‌ها نوسانات دمایی را کاهش داده و کیفیت محصولاتی مانند

در کنار روش‌های ساخت، انتخاب ماتریس پلیمری مناسب نقش کلیدی در عملکرد نهایی سیستم‌های حاوی PCMs دارد. پلیمرهای زیستی نظیر کیتوزان، پلی‌وینیل الکل^۱، پلی‌لاکتیک اسید^۲، آلرینات و نشاسته به دلیل ویژگی‌هایی همچون زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری، در دسترس بودن و قابلیت پردازش مناسب، به طور گسترده در طراحی این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پلیمرها علاوه بر ایفای نقش به عنوان پوشش محافظ، می‌توانند با PCMs برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی ایجاد کرده و موجب بهبود پایداری ساختاری و عملکرد حرارتی سیستم شوند (Zhao et al., 2025). ترکیب PCMs با پلیمرهای زیستی نه تنها به بهبود خواص حرارتی و مکانیکی منجر می‌شود، بلکه زمینه را برای توسعه بسته‌بندی‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست فراهم می‌سازد. این رویکرد با اهداف توسعه پایدار و کاهش وابستگی به پلیمرهای نفتی نیز همسو بوده و از منظر زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، امکان طراحی سیستم‌های چندمنظوره که هم‌زمان دارای ویژگی‌های محافظتی، حرارتی و حتی ضد میکروبی باشند، از دیگر مزایای این ترکیب به شمار می‌رود (Al-Gunaid et al., 2023; Png et al., 2022). به طور کلی، PCMs کپسوله‌شده به عنوان یک فناوری نوظهور، رویکردی مؤثر برای مدیریت حرارتی در بسته‌بندی مواد غذایی و بهبود عملکرد زنجیره سرد ارائه می‌دهند. این سیستم‌ها با کاهش نوسانات دمایی، نقش مهمی در حفظ کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی حساس ایفا می‌کنند. با این حال، همچنان چالش‌هایی از جمله بهینه‌سازی عملکرد حرارتی، افزایش مقیاس‌پذیری صنعتی، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود یکپارچگی با ساختارهای بسته‌بندی وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر است. بر این اساس، هدف این مطالعه ارائه یک مرور جامع بر نقش مواد تغییر فاز کپسوله‌شده در بسته‌بندی مواد غذایی، با تمرکز بر مکانیزم‌های عملکرد، انواع مواد، روش‌های کپسوله‌سازی و ادغام آن‌ها با پلیمرهای زیستی است. همچنین، این مطالعه تأثیر این سیستم‌ها را بر بهبود کنترل دما، کاهش نوسانات حرارتی و ارتقای کیفیت، ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی در طول زنجیره سرد مورد بررسی قرار می‌دهد.

انواع PCMs

PCMs انواع متفاوتی دارند نظیر PCMs آلی، PCMs غیر آلی و اسیدهای چرب که در ادامه هر کدام از آن‌ها به طور مجزا بررسی خواهند شد همچنین در جدول ۱ به بررسی چند نمونه از PCMs و ویژگی‌هایشان می‌پردازیم.

1- Polyvinyl alcohol (PVA)

2- Polylactic acid (PLA)

کاهش احتمال نشت می‌شوند. در نتیجه، عملکرد بسته‌بندی در برابر نوسانات دمایی بهبود یافته و قابلیت استفاده از این مواد در مقیاس صنعتی افزایش می‌یابد.

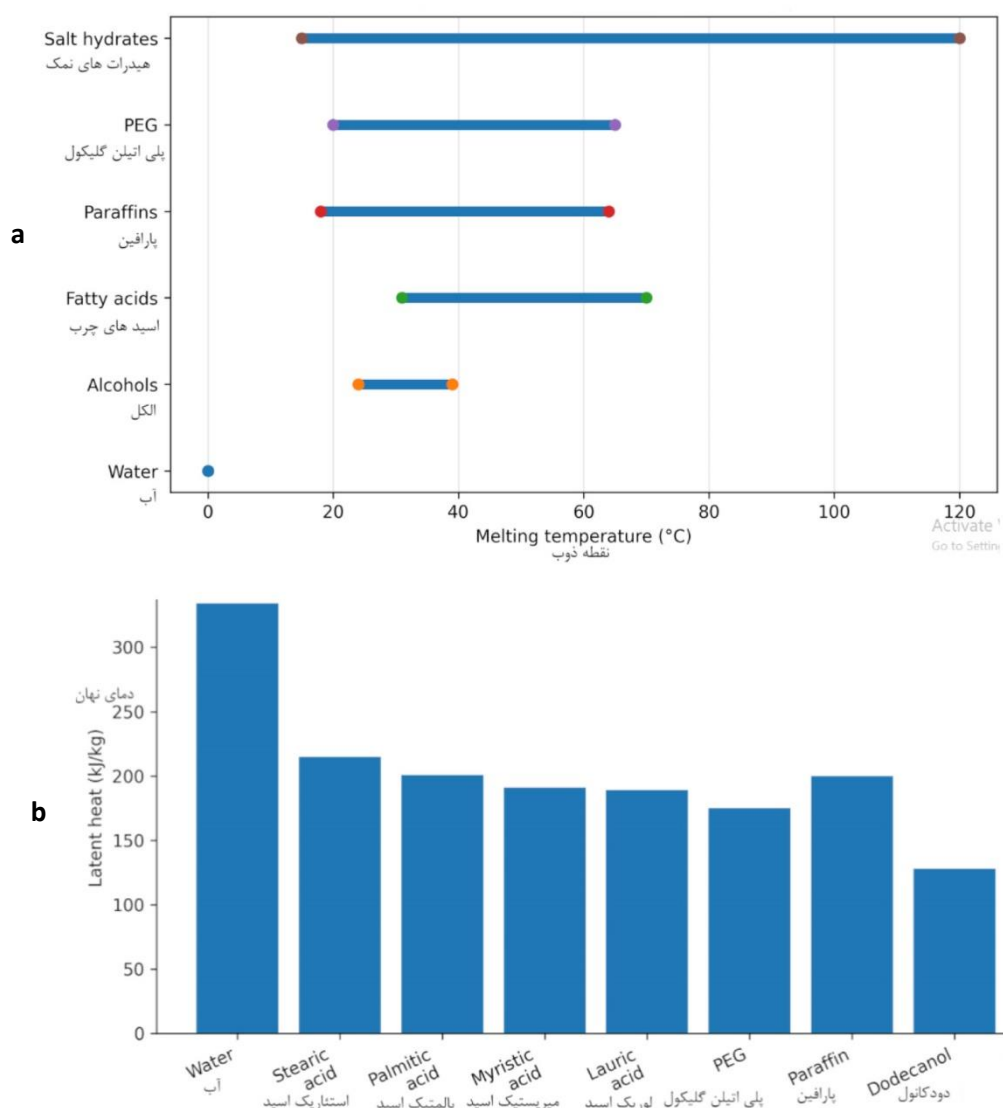
PCMs غیر آلی

PCMs غیر آلی شامل نمک‌های هیدراته و فلزات ذوب‌شونده هستند. نمک‌های هیدراته می‌توانند در اثر واکنش شیمیایی بین کریستال خشک و محلول آبی، حرارت تولید یا جذب کنند و همچنین کاربرد گسترده‌ای در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در دماهای پایین دارند. این PCMs دارای ویژگی‌هایی مانند محدوده دمایی وسیع، تغییر فاز سریع، پایداری و رسانایی حرارتی بالا می‌باشند. فلزات با دمای ذوب پایین مانند بیسموت، ایندیوم، قلع، کادمیوم و سرب نیز به‌عنوان PCMs غیر آلی هستند که در بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند اما چون معمولاً این فلزات کمی سمی هستند، استفاده از آن‌ها محدود است. ضعف دیگر آن‌ها اثرات نامتقارن و سوپرکولینگ است که نیاز به افزودنی‌های هسته‌زا و مواد غلیظ‌کننده دارند تا عملکرد چرخه‌ای حرارت حفظ شده و از دست رفتن آب جلوگیری شود (Sarkar, Mestry, & Mhaske, 2022).

استات سدیم تری هیدرات نوعی PCMs است که می‌تواند انرژی حرارتی را ذخیره کند، در مطالعه‌ای که از لیو و همکاران (Liu et al., 2022) آمده است، نقل می‌کند که افزودن استات سدیم تری هیدرات به بسته‌بندی گوشت و همچنین اضافه کردن آکریل آمید و نشاسته آبی به آن جهت بهبود انعطاف‌پذیری و افزودن گرافیت به فیلم تهیه شده برای جلوگیری از سرمایش بیش از حد، توانستند حرارت نهان داخل بسته‌بندی را به ۱۳۴ ژول بر گرم برسانند. کلسیم هیدراته ماده‌ای است که می‌تواند به‌عنوان PCM در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده شود، نبی و نورانی (Nabi & Nourani, 2023) این ماده را به ماتریس ژل آلزینات کپسوله کردند و نتایج به‌دست آمده گویای این بود که کلسیم هیدراته سبب می‌شود که ۵-۷ ساعت بافت گوشت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حفظ شود. آب، به‌عنوان یک ماده تغییر فاز غیر آلی، در بسته‌بندی مواد غذایی به کار می‌رود و توانایی ذخیره و آزادسازی گرمای نهان در طی فرآیندهای ذوب و انجماد را دارد. این ویژگی به کاهش نوسانات دمایی کمک کرده و دمای محصول را در محدوده‌ای پایدار نگه می‌دارد، که در نتیجه کیفیت و ماندگاری محصولات در طول زنجیره سرد بهبود می‌یابد. برای افزایش کارایی و جلوگیری از نشت، آب معمولاً در قالب سیستم‌های کپسوله‌شده یا در ماتریس‌های پلیمری ادغام می‌شود.

بستنی را حفظ می‌کند (Dardari et al., 2025; Zhang, Dai, & Yang, 2025). تترادکانول یکی دیگر از PCMs آلی است که در طیف FTIR پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی و بین مولکولی از خود نشان می‌دهد. کپسوله‌سازی پلیمری تأثیر اندکی بر این پیوندها دارد اما پایداری حرارتی و توانایی ذخیره و آزادسازی حرارت آن حفظ می‌شود و همین امر استفاده از آن در بسته‌بندی را امکان‌پذیر می‌سازد (Pielichowska & Pielichowski, 2023).

نبی و نورانی (Nabi & Nourani, 2023) تترادکان را در پوشش آلزینات کلسیم کپسوله کرده و آن را برای بسته‌بندی گوشت به کار گرفتند. این بسته‌بندی موجب شد که افزایش دمای گوشت طی نگهداری به تأخیر افتاده و در نتیجه، کاهش وزن و افت کیفیت بافت به میزان قابل‌توجهی پس از ۵-۷ ساعت ذخیره‌سازی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرد. این خاصیت ناشی از توانایی تترادکان در جذب حرارت اضافی در زمان افزایش دما و آزادسازی آن در زمان افت دما است که نوسانات حرارتی را کنترل کرده و کیفیت محصول را حفظ می‌کند (Zhang et al., 2024). دودکانول، یک الکل چرب است که به‌عنوان PCM برای تنظیم دما مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده هنگام افزایش دما گرمای اضافی را جذب کرده و در زمان سرد شدن آن را آزاد می‌کند. دودکانول از نظر شیمیایی پایدار، غیرخورنده بوده و با کپسوله‌سازی می‌توان هدایت حرارتی آن را ارتقا داده و مشکل نشتی را برطرف کرد (Jain, Paliwal, & Jain, 2024). برای نمونه، بهاتلوانده و همکاران (Bhatlawande et al., 2024) دودکان را از طریق الکتروروسی در نانوالیاف زئین ادغام کردند تا یک پوشش هوشمند برای بسته‌بندی شیر ایجاد شود. میزان دودکان در الیاف تا ۵۵٪ افزایش یافته و توانست ظرفیتی معادل ۲۵ J/g انرژی ذخیره کند. این پوشش‌ها با تنظیم دمای بسته‌بندی، کیفیت شیر را در طول زنجیره سرد حفظ کردند و فساد شیر را به مدت ۲۴-۷۲ ساعت به تعویق انداختند. به‌طور کلی، استفاده از PCMs آلی با امکان ذخیره و آزادسازی گرمای نهان، موجب تنظیم دما و کاهش نوسانات حرارتی می‌شود. این ویژگی‌ها به حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری محصولات کمک می‌کنند. همچنین، کپسوله‌سازی به همراه افزودنی‌هایی مانند گرافن یا سیلیکا، مشکلاتی نظیر نشتی و هدایت حرارتی پایین را برطرف کرده و عملکرد این مواد را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌دهد (Chalivendula & Tarigonda, 2025; Zare & Mikkonen, 2023). بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که روند تحقیقات از استفاده از PCMs آلی خالص به سمت توسعه سامانه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی حرکت کرده است. این سامانه‌ها علاوه بر افزایش ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی، موجب بهبود هدایت حرارتی، افزایش استحکام مکانیکی و



شکل ۱- a. مقایسه محدوده دمای ذوب گروه‌های مختلف PCM / b. مقایسه گرمای نهان مواد تغییر فاز

Fig. 1. a. Comparison of melting temperature ranges of different PCM groups/ b. Comparison of latent heat of phase change materials

میکروکپسول‌های دوتایی PCMs به‌کار رفته است تا ویژگی‌های حرارتی و پایداری شکل آن‌ها را بهبود دهد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) با افزودن CdS به ماتریس پلیمری ملامین-فرمالدهید باعث افزایش پایداری حرارتی شدند. به‌طوری‌که این میکروکپسول‌ها حتی پس از ۱۰۰ چرخه حرارتی هم پایداری حرارتی را حفظ کردند. همچنین پس از حرارت‌دهی به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد هیچ نشستی مشاهده نشد. به‌طور کلی، PCMs غیرآلی با قابلیت ذخیره و آزادسازی گرمای نهان، نقش مؤثری در کنترل دما و کاهش نوسانات حرارتی در بسته‌بندی مواد غذایی دارند (Bahrami

این رویکرد به‌عنوان یک راهکار پایدار و مؤثر برای مدیریت حرارتی فعال در بسته‌بندی مواد غذایی شناخته می‌شود (Liu et al., 2023). وانگ و همکاران (Wang, Xu, & Wang, 2024) از آب به‌عنوان PCM در بسته‌بندی میوه‌جات که از ترکیب PVA و پلی آکرلیک اسید ساخته شده بود استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این سامانه موجب افزایش ظرفیت گرمای نهان تا حدود ۱۸۰-۲۲۰ J/g، کاهش نشستی بیش از ۹۵٪ و افزایش ماندگاری میوه از ۶ به ۱۰ روز شد که ناشی از کنترل تبادل حرارتی و حفظ رطوبت در ساختار نانوالیافی بود. سولفید کادمیوم (CdS) به‌عنوان یک ماده غیرآلی در ساخت

(Sablani, 2025). به منظور مقایسه ویژگی‌های حرارتی مواد تغییر فاز، شکل ۱ محدوده دمای ذوب و ظرفیت گرمای نهان PCM های پر کاربرد را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، تفاوت در این ویژگی‌ها، انتخاب PCM مناسب را بر اساس دمای نگهداری و نوع محصول غذایی ضروری می‌سازد.

اسیدهای چرب

اسیدهای چرب یک دسته از PCMs است که می‌توانند انرژی حرارتی را ذخیره کنند. یکی از مزایای اصلی آن‌ها دسترسی به منابع زیستی و مصنوعی است. اکثر این ترکیبات حاصل از هیدروکربن‌های اسیدهای چرب غیراشباع هستند که این فرآیند می‌تواند پایداری این مواد را در طول چرخه‌های مکرر تغییر فاز با جلوگیری از اکسیداسیون حفظ کند. اسیدهای چرب با وجود هزینه پایین و تغییرات اندک در برابر تغییر فاز دارای یکسری چالش‌ها هستند، مثلاً در صورتی که کپسوله‌سازی به خوبی انجام نشود ممکن است سبب نشتی شود که در این صورت با افزودن مواد کربنی مثل گرافن می‌توان از این اتفاق جلوگیری کرد (Al-Ahmed et al., 2021).

اسید لوریک نوعی PCM است که به واسطه دمای ذوب پایین و گرمای نهان بالای آن در بسته‌بندی مواد غذایی از جمله در زنجیره سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. وناپوسا و همکاران (Vennapusa, Singh, & Chattopadhyay, 2022) اسید لوریک را با دمای ذوب ۴۵/۲ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ۱۸۹/۴۳ کیلوژول بر کیلوگرم به عنوان PCM در قالب ۶ پاکت پلی‌اتیلنی ۴۰ گرمی به دیواره‌های داخلی یک جعبه کارتنی متصل کردند. این بسته‌بندی توانست دمای ۱۵۰ گرم شیر را به مدت ۱۶۰ دقیقه در بازه دمایی مطلوب نگه دارد. این روش نشان‌دهنده پتانسیل بالای PCMs در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی برای حفظ دما و کیفیت محصول است. کاپریک اسید به دلیل داشتن خواص ضد باکتریایی و ضد قارچی، در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود تا از رشد میکروارگانیسم‌ها در محصولات جلوگیری کرده و ماندگاری محصول را افزایش دهد (Zahid, Farooq, & Farhan, 2023). وناپوسا و همکاران (Vennapusa, Singh, & Chattopadhyay, 2022) از کاپریک اسید با پرلیت منبسط شده به عنوان PCM استفاده کردند. این ماده می‌تواند گرما را تا ۸۱ کیلوژول بر کیلوگرم ذخیره کند. ۵۸/۶ گرم از وزن این ماده را کاپریک اسید تشکیل داده است. وقتی ۲۰۰ گرم از این ماده را داخل بسته‌بندی گذاشتند توانست دمای ۳۶۰ گرم شکلات را به مدت ۳۴۹ دقیقه زیر ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهدارد. این یعنی بسته‌بندی توانست از گرم شدن شکلات جلوگیری کند. علاوه بر این توانست کیفیت شکلات را در طول حمل و نقل حفظ کند (Vennapusa, Konala, Dixit, 2023).

(Chattopadhyay, 2020). پالمیتیک اسید یکی دیگر از PCMs محسوب می‌شود که به دلیل گرمای نهان بالا و دمای ذوب در محدوده مناسب برای حفظ دمای محصولات غذایی استفاده می‌شود. طبق مطالعات زارع و همکاران (Zare & Mikkonen, 2023) افزودن پالمیتیک اسید به ماتریس پلیمری PVA و پلی آکرلیک اسید در بسته‌بندی میوه‌جات سبب پایدار نگه داشتن دمای داخل بسته‌بندی شده و از نوسانات حرارتی جلوگیری می‌کند که منجر به حفظ تازگی و کیفیت میوه در طول نگهداری می‌شود. به طور کلی، ادغام PCMs آلی مانند لوریک، کاپریک و پالمیتیک اسید در بسته‌بندی با ماتریس‌های پلیمری زیستی، نوسانات حرارتی را کاهش داده، دمای محصول را پایدار نگه می‌دارد و کیفیت و ماندگاری مواد غذایی فسادپذیر را افزایش می‌دهد (Deka et al., 2026).

خواص فیزیکی PCMs

خواص فیزیکی PCMs شامل گرمای نهان، دمای ذوب و انجماد و پایداری حرارتی می‌باشد که در شکل ۲ نمایش داده شده است و در ادامه هر یک از آن‌ها به طور مجزا توضیح داده می‌شود و در جدول ۲ خلاصه‌ای از خواص فیزیکی این مواد آورده شده است.

گرمای نهان PCMs

گرمای نهان میزان انرژی حرارتی گفته می‌شود که یک ماده در طول تغییر فاز مانند ذوب، انجماد و تبخیر، بدون اینکه دمای آن تغییر کند، دریافت یا آزاد می‌کند. PCMs می‌توانند گرمای اضافی محیط را در هنگام افزایش دما جذب کرده و هنگام کاهش دما مجدداً آن را آزاد کنند که این فرآیند موجب کاهش نوسانات دمایی و حفظ دمای مطلوب به مدت قابل قبولی می‌شود. به همین دلیل گرمای نهان یکی از مهم‌ترین پارامترهای انتخاب PCM محسوب می‌شود و در رابطه با بسته‌بندی مواد غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شکل ۲) (Rahimi-Khoigani & Hamdami, 2025). گرمای نهان PCMs نقش کلیدی در تثبیت دمای محصولات غذایی دارد. مطالعه‌ای که از رحیمی و همکاران (Rahimi-Khoigani & Hamdami, 2023) آمده است، عنوان می‌کند که وقتی تترادکان با گرمای نهان ۲۰۶/۳ کیلوژول بر کیلوگرم به بسته‌بندی قارچ اضافه شد توانست دمای این ماده غذایی را ۲-۳ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از بسته‌بندی بدون PCMs حفظ کند. استفاده از این PCMs همراه با طراحی بهینه بسته‌بندی توانست نوسانات حرارتی را کاهش داده و همچنین روی کیفیت و ماندگاری قارچ اثر مثبت بگذارد.

جدول ۱- انواع مواد تغییر فاز (PCMs) و کاربردهایشان در صنایع غذایی، پلی‌وینیل الکل (PVA)، پلی‌اکریل آمید (PAA)، پلی‌پروپیلن (PP)
 Table 1- Types of phase change materials (PCMs) and their applications in the food industry, polyvinyl alcohol (PVA), polyacrylamide (PAA), polypropylene (PP)

Source منبع	Results نتایج	Matrix ماتریس	Encapsulation method روش کپسوله‌سازی	PCM مواد تغییر فاز	Food product محصول غذایی
(Jafarpour <i>et al.</i> , 2023)	افزایش زمان نگهداری حدود ۱۱ TVB-N / ساعت؛ کاهش ۳۱٪ Extended cold storage by ~11 h; 31% lower TVB-N کاهش ۲۲٪ افت وزن؛ افزایش	ملامین-فرمالدهید Melamine- Formaldehyde	پلیمریزاسیون امولسیون Emulsion Polymerization	ان-اکتادکان n-Octadecane	فیله سالمون تازه Fresh Salmon Fillets
(Rivera & Moraga, 2024a, 2024b)	کاهش ۲۲٪ افت وزن؛ افزایش lower weight loss; Shelf life +4 days	Polyurea پلی‌یوریا	پلیمریزاسیون بین‌سطحی Interfacial Polymerization	ان-هگزادکان n-Hexadecane	توت‌فرنگی Fresh Strawberries
(Wang <i>et al.</i> , 2023)	حفظ دما کمتر از ۶ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹ ساعت Temperature below 6°C for 9 h	مالتودکسترین-صمغ Maltodextrin- gum Arabic	خشک کردن پاششی Spray drying	موم پارافین Paraffin wax	شیر تازه Fresh milk
(Chen <i>et al.</i> , 2022)	کاهش ۳۸٪ نوسانات دمایی 38% Lower Temperature fluctuation	ژلاتین-صمغ عربی Gelatin-gum Arabic	کمپلکس کواسرواسیون Complex Coacervation	یوتکتیک اسید کاپریک-لوریک Capric-lauric acid Eutectic	بستی Ice cream
(Jafarpour <i>et al.</i> , 2023; Zhang <i>et al.</i> , 2024)	افزایش ۱۵ ساعت حفظ سرما؛ کاهش ۲۸٪ اکسیداسیون چربی 15h longer cooling; 28% lower lipid oxidation	پلی‌متیل متاکریلات PMMA	پلیمریزاسیون درجا In-situ Polymerization	ان-ایکوزان n-Eicosane	گوشت گاو تازه Fresh beef
(Pasha, 2026)	کاهش ۴۱٪ نوسان دمایی 41 % lower thermal fluctuation	نانوالیاف PLA PLA Nanofibers	الکتروپسینی Electrospinning	RT5 پارافین RT5 Paraffin	ماست Yogurt
(Yenare <i>et al.</i> , 2026)	پایداری حرارتی تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد Thermal stability up to 32°C	چربی گیاهی هیدروژنه Hydrogenated vegetable fat	اسپری چیلینگ Spray Chilling	اسید استئاریک Stearic acid	شکلات Chocolate
(Harini, Sunil, & Natarajan, 2026)	کاهش ۳۵٪ TVB-N؛ افزایش ماندگاری ۳ روز 35% lower TVB-N; Shelf life +3 days بهبود ۲۶٪ حفظ بافت؛ کاهش آسیب	نانوبلورهای سلولز Cellulose nanocrystals	امولسیون پیکرینگ Pickering emulsion	ان-هگزادکان n-Hexadecane	ماهی تازه Fresh fish
(Harini <i>et al.</i> , 2026)	چرخه انجماد-ذوب 26% better texture retention; Reduced freeze- thaw damage	ایزوله پروتئین آب‌پنیر Whey Protein isolate	خشک کردن پاششی Spray drying	اسید کاپریک Capric acid	میگوی منجمد Frozen shrimp

توانست نوسانات دمایی را کاهش دهد و دمای داخل بسته‌بندی را در محدوده مطلوب نگه دارد. استفاده از PCM باعث شد که تازگی و کیفیت میوه‌ها در طول زنجیره سرد افزایش یابد و از فساد ناشی از تغییرات دمای محیط جلوگیری شود (Bahrami & Sablani, 2025). در نتیجه گرمای نهان بالای PCMs با جذب و آزادسازی کنترل‌شده انرژی حرارتی، نوسانات دمایی را کاهش داده و به حفظ کیفیت و ماندگاری محصولات غذایی حساس به دما کمک می‌کند (Zare & Mikkonen, 2023).

پالمیتیک اسید یکی دیگر از PCMs مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی است که به واسطه دمای ذوب حدود ۶۳ °C و گرمای نهان ۲۰۰ kJ/kg می‌تواند به مطلوب بودن بسته‌بندی کمک کند. PCM پالمیتیک با ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان بالا، در بسته‌بندی فعال می‌تواند به‌عنوان یک دماپا فر حرارتی عمل کند و عمر مفید و کیفیت محصولات غذایی حساس به دما را بهبود دهد. همچنین بهرامی و سبلانی (Bahrami, & Sablani *et al.*, 2025) اسید پالمیتیک را به‌عنوان PCMs به PVA داخل بسته‌بندی میوه‌جات استفاده کردند و نتایج به این صورت بود که این بسته‌بندی به کار رفته برای میوه‌ها

دمای ذوب و انجماد

دمای ذوب و انجماد یک PCM دمایی است که در آن ماده از حالت جامد به مایع یا بالعکس تغییر فاز می‌دهد. این دما باید در محدوده‌ای انتخاب شود که با کاربرد موردنظر مطابقت داشته باشد (Nabi & Nourani, 2023). دمای ذوب بالاتر از این محدوده ممکن است باعث ذوب سریع و کاهش کیفیت محصول شود و دمای ذوب پایین‌تر ممکن است PCM در شرایط محیطی فعال نشود (Dardari et al., 2025). در این راستا مطالعاتی صورت گرفته است که در غالب مثال ارائه می‌شود. گلیسیرین یک PCM غیرسمی و پایدار است که با ذخیره و آزادسازی گرمای نهان می‌تواند دمای داخلی بسته‌بندی مواد غذایی حساس به دما را تثبیت کرده و تازگی و کیفیت محصول را حفظ کند. نقطه ذوب گلیسیرین ۱۷-۱۸ درجه سلسیوس می‌باشد این دمای نسبتاً پایین باعث می‌شود گلیسیرین بتواند در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی یا محصولات سرد، به‌عنوان ذخیره‌کننده و آزادکننده گرمای نهان عمل کند. طبق مطالعات پیرا و همکاران (Pereira et al., 2024) با اضافه کردن گلیسیرین به‌عنوان PCM به سلولز استات در بسته‌بندی روغن جامد استفاده شد و نتایج نشان داد که نوسانات دمایی داخل بسته‌بندی کاهش یافته و دمای محصول در محدوده مطلوب حفظ شد. این امر منجر به افزایش کیفیت و تازگی روغن در طول ذخیره‌سازی شد و نشان داد که استفاده از گلیسیرین به‌عنوان PCM می‌تواند پایداری حرارتی بسته‌بندی را بهبود بخشیده و عمر مفید محصول را طولانی‌تر کند. پس استفاده از PCMs با دمای ذوب مناسب می‌تواند دمای داخلی بسته‌بندی مواد غذایی حساس به دما را پایدار نگه داشته و کیفیت و عمر مفید محصول را افزایش دهد (Bahrami & Sablani, 2025).

هدایت حرارتی و پایداری چرخه ای

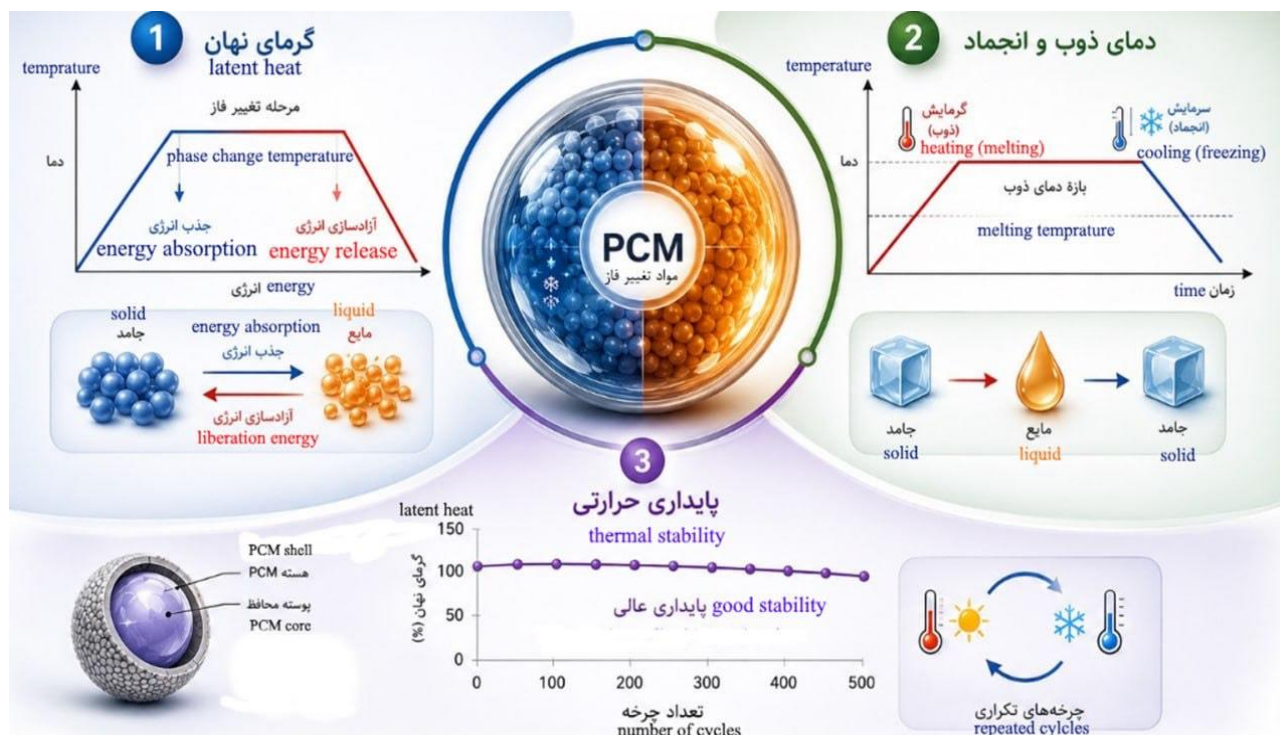
هدایت حرارتی و پایداری چرخه‌ای از پارامترهای حیاتی تعیین‌کننده عملکرد PCM در کاربردهای بسته‌بندی هوشمند هستند. هدایت حرارتی بیانگر توانایی ماده در انتقال گرما است و به‌طور مستقیم بر نرخ ذوب و انجماد و کارایی جذب و رهایش حرارت تأثیر می‌گذارد. پایداری چرخه‌ای نشان‌دهنده ظرفیت PCM برای تحمل تکرار چرخه‌های حرارتی بدون کاهش قابل توجه در گرمای نهان، دمای تغییر فاز یا

یکپارچگی ماده است. هر دو ویژگی برای تضمین کنترل حرارتی پایدار و عملکرد طولانی‌مدت PCM ضروری‌اند. استفاده از روش‌هایی نظیر کپسوله‌سازی و تثبیت شکل موجب ارتقای این ویژگی‌ها و بهبود دوام و قابلیت اطمینان سیستم‌های بسته‌بندی مبتنی بر PCM در شرایط چرخه‌ای می‌شود (Bahrami & Sablani, 2025). در یک مطالعه اخیر، PCM های پارافینی کپسوله‌شده به ماتریس پلی‌اتیلن ترفتالات^۱ افزوده شدند تا فیلم‌های بسته‌بندی هوشمند با قابلیت کنترل حرارتی تولید گردد. نتایج ارتوگرا و همکاران (Güngör Ertuğral & Alkan, 2021) نشان داد که این ترکیب نه تنها توانست دمای داخلی بسته‌بندی را در محدوده مطلوب پایدار نگه دارد، بلکه فرآیندهای ذوب و انجماد را با کارایی بالایی انجام داد. علاوه بر این، پایداری چرخه‌ای بالا تضمین کرد که پس از بیش از ۵۰۰ چرخه حرارتی، ظرفیت گرمای نهان و عملکرد حرارتی PCM به‌طور قابل توجهی کاهش نیابد. این یافته‌ها اهمیت بالای استفاده از PCM های کپسوله‌شده در طراحی بسته‌بندی‌های هوشمند را برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند که چنین سیستم‌هایی می‌توانند ماندگاری محصولات غذایی را افزایش داده و قابلیت اطمینان بسته‌بندی را در طول زنجیره سرد بهبود بخشند. لیو و همکاران (Liu et al., 2023)، اسید لوریک به‌عنوان PCM انتخاب کردند و در ترکیب با ماتریس پشتیبان خاکستر پروازی اصلاح‌شده و گرافن به‌صورت کامپوزیت شکل‌پایدار تولید کردند. نتایج نشان داد که این PCM ترکیبی دارای نقطه ذوب حدود ۴۵/۳۸ درجه سلسیوس و گرمای نهان ذوب تقریباً ۱۸۵-۱۹۰ ژول بر گرم بود. علاوه بر این، افزودن گرافن موجب شد زمان ذوب و انجماد به‌ترتیب تا حدود ۶۱٪ و ۸۰٪ کاهش یابد، که نشان‌دهنده بهبود چشمگیر هدایت حرارتی و سرعت انتقال حرارت است. این مطالعه تأکید می‌کند که انتخاب دقیق PCM و ادغام آن با ماتریس‌های پشتیبان و نانومواد رسانا می‌تواند نه تنها کنترل حرارتی مؤثر را برای کاربردهایی مانند بسته‌بندی فراهم کند، بلکه دوام حرارتی و پایداری چرخه‌ای ماده را نیز افزایش دهد (Liu et al., 2023). در نتیجه هدایت حرارتی و پایداری چرخه تأثیر به خصوصی در کنترل نوسانات دمایی دارد.

جدول ۲- ویژگی‌های حرارتی و کاربردهای بسته‌بندی برخی از مواد تغییر فاز

Table 2- Thermal properties and packaging applications of some phase change materials

منبع Source	محدودیت اصلی Main limitation	کاربرد Application	دمای انتقال Glass transition temperature (T _g)	گرمای نهان Latent Heat (kJ/kg)	دمای ذوب Melting temperature (°C)	نوع PCM PCM Type
Vennapusa, Singh, & (Chattopadhyay, 2022)	leakage, low thermal conductivity نشت در حالت ذوب، هدایت حرارتی پایین	Maintaining milk temperature within the cold chain at 3–4°C حفظ دمای شیر در زنجیره سرد در بازه ۳–۴ درجه سانتی گراد	68	189.43	45.2	Lauric acid لوریک اسید
Qazanfarzadeh, Kadivar, (Shekarchizadeh, & Porta, 2021)	Leakage after melting نشت در حالت ذوب	Preventing chocolate overheating and controlling thermal fluctuations جلوگیری از گرم شدن شکلات و کنترل گرما	72	81	33-31	Capric acid کاپریک اسید
Carvalho, de Carvalho, & (Conte-Junior, 2025)	High melting temperature; unsuitable for refrigerated foods دمای ذوب بالا؛ نامناسب برای زنجیره سرد	Preserving fruit temperature and reducing temperature fluctuations حفظ کردن دمای میوه و جلوگیری از نوسانات دما	64	201-200	64-62	Palmitic acid پالمیتیک اسید
Chen, Chang, & Zhang, (2021)	limited operating temperature range محدوده دمای کاری محدود	Utilized in eutectic mixtures with lauric acid for cold-chain preservation ترکیب با لوریک اسید در یوتکتیک‌ها و حفظ زنجیره سرد	66	191	54	Myristic acid میریسینیک اسید
(Song <i>et al.</i> , 2021)	Very high melting temperature دمای ذوب بسیار بالا	Eutectic formulations for temperature regulation in meat packaging یوتکتیک‌ها برای تنظیم دما، بسته‌بندی گوشت	60	215	70	Stearic acid استئاریک اسید
(Al-Gunaid <i>et al.</i> , 2023)	Leakage during repeated cycles نشت در چرخه‌های مکرر	Encapsulation within alginate coatings for meat packaging applications کیسوله سازی در پوشش آلژینات برای بسته بندی گوشت	78	160	39-38	Tetradecanol تترا دکانول
Singh, Parvate, Dixit, & (Chattopadhyay, 2020)	Low thermal conductivity, leakage هدایت حرارتی پایین، نشت	Electrospun zein nanofibers for milk packaging systems الکتروپرسی در نانوالیاف زئین برای بسته‌بندی شیر	83	130-125	25-24	Dodecanol دودکانول
Antunes, Silva, & Gaspar, (2025)	Volume expansion during freezing انبساط حجمی هنگام انجماد	Fruit packaging: high latent heat storage capacity and leakage prevention بسته‌بندی میوه جات، ظرفیت گرمای نهان بالا، جلوگیری از نشت	137	334	0	Water آب



شکل ۲- خواص فیزیکی مواد تغییر فاز
Fig. 2. Physical properties of phase change material

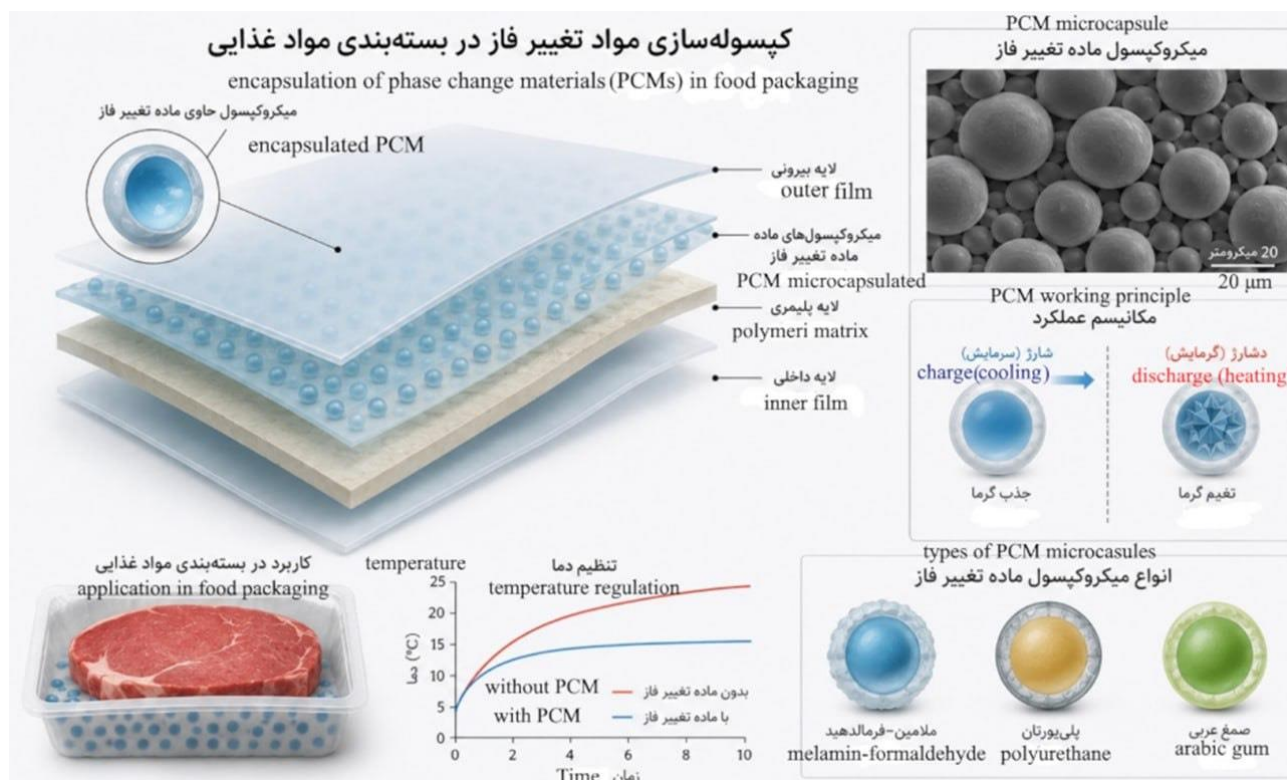
کپسوله سازی

PCMs به دلیل قابلیت ذخیره و رهایش گرما، گزینه‌ای ایده‌آل برای بسته‌بندی هوشمند محسوب می‌شوند، اما محدودیت‌هایی مانند هدایت حرارتی پایین، نشت ماده در حالت ذوب و کاهش پایداری چرخه‌ای نیازمند راهکارهای بهبود عملکرد هستند. برای بهبود عملکرد مواد تغییر فاز PCM در بسته‌بندی هوشمند، راهکارهای متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. کپسوله‌سازی PCM ها درون پوسته‌های پلیمری یا معدنی موجب جلوگیری از نشت و افزایش پایداری چرخه‌ای می‌شود، در حالی که تثبیت شکل با ادغام PCM ها در ماتریس‌های پلیمری یا کامپوزیتی امکان حفظ ساختار ماده حتی در حالت ذوب را فراهم می‌کند. علاوه بر این، افزودن نانوذرات رسانا نظیر گرافن یا اکسید فلزات موجب افزایش هدایت حرارتی و تسریع فرآیندهای ذوب و انجماد می‌شود. ترکیب PCM با پلیمرهای زیست‌پایه و استفاده از اصلاح سطح یا افزودنی‌های عملکردی نیز می‌تواند کنترل حرارت، دوام چرخه‌ای و سازگاری با بسته‌بندی پایدار را ارتقا دهد (Jafarpour et al., 2023). به‌طور کلی، بهره‌گیری همزمان از این روش‌ها، عملکرد حرارتی و قابلیت اطمینان PCM ها در کاربردهای بسته‌بندی هوشمند را به شکل قابل توجهی بهبود می‌بخشد، یکی از روش‌های کاربردی و مؤثر که استفاده می‌شود کپسوله‌سازی است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. کپسوله‌سازی به‌عنوان یکی از روش‌های کلیدی و متداول برای

ارتقای عملکرد PCM در بسته‌بندی هوشمند شناخته می‌شود، که طی آن PCM درون پوسته‌ای از جنس پلیمر یا مواد معدنی محصور می‌گردد. این تکنیک علاوه بر جلوگیری از نشت ماده در حالت ذوب، موجب افزایش پایداری چرخه‌ای PCM و حفظ یکپارچگی فیزیکی آن طی چرخه‌های متعدد حرارتی می‌شود. همچنین، کپسوله‌سازی امکان ادغام PCM با ماتریس‌های بسته‌بندی مختلف را فراهم می‌آورد و به بهبود قابلیت کنترل دما، افزایش دوام حرارتی و ارتقای کارایی کلی سیستم بسته‌بندی کمک می‌کند. کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز به دو روش اصلی ریزکپسوله‌سازی و نانوکپسوله‌سازی انجام می‌شود که هر دو با هدف جلوگیری از نشت، افزایش پایداری چرخه‌ای و بهبود عملکرد حرارتی به کار می‌روند. در این روش‌ها، ماده تغییر فاز درون پوسته‌هایی از پلیمرهای طبیعی، پلیمرهای سنتزی یا مواد معدنی محصور می‌شود که علاوه بر جلوگیری از نشت، موجب افزایش استحکام و دوام حرارتی سامانه می‌شوند. مواد مورد استفاده برای تشکیل پوسته کپسول نقش مهمی در جلوگیری از نشت و افزایش پایداری ماده تغییر فاز دارند. از رایج‌ترین مواد پوششی می‌توان به پلیمرهای طبیعی مانند آلژینات، کیتوسان، ژلاتین و مشتقات سلولز، پلیمرهای سنتزی مانند پلی‌وینیل الکل، پلی‌یورتان و پلی‌یوریا و همچنین مواد معدنی نظیر سیلیکا و رس‌های لایه‌ای اشاره کرد. انتخاب جنس پوسته بر اساس نوع ماده تغییر فاز، دمای کاری و شرایط نگهداری محصول غذایی انجام

جلوگیری از نشت ماده در هنگام ذوب، موجب افزایش سطح تماس، بهبود انتقال حرارت، تسریع جذب و آزادسازی گرمای نهان و افزایش پایداری چرخه‌ای می‌شود. از این رو، الکترورسی یکی از روش‌های امیدبخش برای توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند با قابلیت کنترل مؤثر نوسانات دمایی محسوب می‌شود (شکل ۳) (Aguilar, Gaspar, & da Silva, 2023; Jafarpour et al., 2023). بدین وسیله مطالعاتی در این باره مورد بررسی قرار می‌گیرد.

می‌شود (Jafarpour et al., 2023). به‌طور کلی، استفاده از کپسوله‌سازی یکی از مؤثرترین راهکارها برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی PCM در کاربردهای صنعتی و بسته‌بندی مواد حساس به دما محسوب می‌شود و همچنین نشتی را به حداقل می‌رساند. در سال‌های اخیر، الکترورسی به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های کپسوله‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، ماده تغییر فاز درون نانوالیاف پلیمری یا در هسته الیاف هم‌محور قرار می‌گیرد و به‌وسیله یک لایه پلیمری احاطه می‌شود. این ساختار علاوه بر



شکل ۳- کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز در ماتریس پلیمری
Fig. 3. Encapsulation of phase change materials in a polymer matrix

در مطالعه‌ای دیگر زو و همکاران (Xu, Zhou, Zhang, Zhai, & Zhang, 2023) گزارش کردند که استفاده از پلیمر HDPE¹ حاوی RT8HC² توانست دمای میوه را تا ۸ ساعت زیر ۱۰ درجه سلسیوس حفظ کند، در حالی که این زمان در نمونه کنترل تنها ۲/۵ ساعت بود. دلیل این تغییر، گرمای نهان ذوب بالای RT8HC یعنی می‌تواند مقدار زیادی گرما را بدون افزایش محسوس دمای خود جذب کند. باعث جلوگیری از نشت در هنگام ذوب و افزایش پایداری در چرخه‌های حرارتی می‌شود، در نتیجه کنترل دما دقیق‌تر انجام شده، نوسانات دمایی کاهش می‌یابد و در نهایت زمان ماندگاری محصول افزایش پیدا

لیو و همکاران (Liu et al., 2022) با استفاده از استات سدیم تری‌هیدرات کپسوله‌شده در بسته‌بندی گوشت در ماتریس PAA و نشاسته گزارش کردند که سامانه طراحی‌شده دارای گرمای نهان ۱۳۴ ژول بر گرم بود و توانست دمای گوشت را در محدوده مناسب نگه دارد. در نتیجه، نمونه‌های گوشت تا ۲ روز بیشتر نسبت به شاهد کیفیت قابل قبول خود را حفظ کردند. دلیل این موضوع، کاهش شوک دمایی و جلوگیری از رشد سریع میکروبی بود و همچنین کپسوله‌سازی استات سدیم تری‌هیدرات در ماتریس PAA باعث جلوگیری از نشت فاز مایع هنگام ذوب و افزایش پایداری حرارتی ماده شد (Liu et al., 2022).

2- Rubitherm (RT8HC)

1- High density polyethylene (HDPE)

چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود کاربردهای گسترده و مزایای عملکرد PCMs در سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند، همچنان چالش‌های علمی و فنی قابل توجهی در مسیر به‌کارگیری صنعتی آن‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، هزینه بالای سنتز و فراوری PCM ها است، به‌ویژه در مورد ترکیباتی که نیازمند اصلاح شیمیایی یا استفاده از نانو ساختارها برای بهبود هدایت حرارتی هستند. چنین فرآیندهایی نه تنها هزینه تولید را افزایش می‌دهند، بلکه مقیاس‌پذیری صنعتی را نیز با مشکل مواجه می‌سازند. از سوی دیگر، پایداری فیزیکی پایین و احتمال نشت PCM در طی چرخه‌های ذوب و انجماد یکی از مسائل اساسی در طراحی سیستم‌های بسته‌بندی است، زیرا نشت حتی در مقادیر کم می‌تواند سبب از دست رفتن ظرفیت حرارتی و آلودگی محصول شود (Tony, 2021). در همین راستا، توسعه راهکارهایی مانند کپسوله‌سازی، تثبیت شکل و اصلاح سطح برای جلوگیری از نشت مورد توجه قرار گرفته است، هرچند این روش‌ها نیز ممکن است موجب افزایش هزینه و پیچیدگی فرآیند شوند. چالش دیگر، انتخاب PCM با محدوده دمایی انتقال فاز مناسب است؛ به‌گونه‌ای که دمای ذوب آن با شرایط نگهداری ماده غذایی هدف هم‌خوانی داشته باشد تا عملکرد حرارتی مؤثر حاصل شود. بنابراین، بهبود ویژگی‌های ترمودینامیکی، افزایش پایداری فیزیکی و کاهش هزینه تولید از محورهای اصلی تحقیقات جاری برای توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند مبتنی بر PCMs به‌شمار می‌رود (Dardari et al., 2025).

نتیجه‌گیری

در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که PCMs یکی از امیدوارکننده‌ترین راهکارها برای توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند با قابلیت مدیریت حرارتی در زنجیره تأمین مواد غذایی هستند. این مواد با کاهش نوسانات دمایی، نقش مؤثری در حفظ کیفیت، افزایش ایمنی و افزایش ماندگاری محصولات فسادپذیر ایفا کرده و در عین حال می‌توانند مصرف انرژی و ضایعات غذایی را کاهش دهند. بررسی مطالعات نشان داد که در میان PCM های آلی، پارافین‌ها، اسیدهای چرب به‌ویژه لوریک، کاپریک و پالمیتیک اسید و نیز پلی‌اتیلن گلیکول، به‌دلیل پایداری شیمیایی، ظرفیت مناسب ذخیره گرمای نهان و سازگاری با سامانه‌های بسته‌بندی، بیشترین کاربرد را داشته‌اند. در مقابل، PCM های غیرآلی مانند نمک‌های هیدراته و استات سدیم تری‌هیدرات، اگرچه هدایت حرارتی و ظرفیت ذخیره انرژی بالاتری دارند، اما چالش‌هایی نظیر سوپرکولینگ، جدایش فازی و کاهش

می‌کند (Xu et al., 2023). سانگ و همکاران (Song, Guo, He, & Zhang, 2024) از پارافین با دمای ذوب ۴ درجه سلسیوس در قفسه‌های سردخانه نگهداری سیب با بسته‌بندی پلی‌پروپیلن^۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد نوسانات دمایی ۳۱٪ کاهش یافت و مدت نگهداری سیب از ۹۰ روز به ۱۱۲ روز افزایش یافت. دلیل این افزایش ماندگاری گرمای نهان بالای پارافین بود که هنگام افزایش دما ذوب شده و مقدار زیادی گرما را جذب می‌کند بدون آن که دمای اطراف به سرعت افزایش یابد که این ویژگی باعث کاهش نوسانات دمایی، حفظ زنجیره سرد، کاهش رشد میکروبی، کند شدن واکنش‌های فساد و در نهایت افزایش ماندگاری می‌شود و همچنین مزیت کپسوله کردن پارافین نسبت به حالت معمولی این است که باعث جلوگیری از نشت در هنگام ذوب و افزایش پایداری در چرخه‌های حرارتی می‌شود، در نتیجه کنترل دما دقیق‌تر انجام شده، نوسانات دمایی کاهش می‌یابد و در نهایت زمان ماندگاری محصول افزایش پیدا می‌کند (Song et al., 2024).

پلی‌اتیلن گلیکول^۲ یک ماده تغییر فاز از نوع پلی‌اتیلن گلیکول با وزن مولکولی متوسط است که دارای گرمای نهان ذوب بالا و رفتار ذوب/انجماد برگشت‌پذیر می‌باشد. این PCM هنگام افزایش دما، انرژی حرارتی را به‌جای بالا رفتن سریع دما صرف تغییر فاز از جامد به مایع می‌کند، بنابراین نقش یک بافر حرارتی را ایفا کرده و از نوسانات دمایی جلوگیری می‌کند. وو و همکاران (Wu et al., 2026) از PEG به‌عنوان PCM درون ماتریس PVA استفاده کردند و آن را با روش الکتروروسی کپسوله‌سازی نمودند. در این فرآیند، محلول حاوی PVA و PEG تحت میدان الکتریکی قوی از نازل کشیده شد و با تبخیر حلال، نانوفیبرهایی تشکیل شد که در آن‌ها PEG به‌صورت محبوس فیزیکی در ساختار الیاف قرار گرفت. این نوع کپسوله‌سازی موجب جلوگیری از نشت ماده تغییر فاز، افزایش پایداری حرارتی و توزیع یکنواخت PCM در شبکه پلیمری شد و در نتیجه توانایی سیستم در تنظیم و تثبیت دما بهبود یافت و دمای محصول برای مدت طولانی‌تری (حدود ۴ تا ۶ ساعت) در محدوده مطلوب حفظ گردید (Wu et al., 2026). به‌طور کلی در مجموع، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که کپسوله‌سازی مواد تغییر فاز در ماتریس‌های پلیمری با جلوگیری از نشت فاز مایع، افزایش پایداری چرخه‌ای و بهبود انتقال کنترل شده گرما، موجب عملکرد مؤثرتر این مواد در تنظیم دمای بسته‌بندی می‌شود. این ویژگی‌ها با کاهش نوسانات حرارتی و حفظ شرایط بهینه نگهداری، به‌طور مستقیم در بهبود کیفیت محصول و افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی نقش دارند (Bidiyasar, Kumar, & Jakhar, 2024; Yuan et al., 2024).

2- Polyethylene glycol (PEG)

1- Polypropylene (PP)

از سوی دیگر، بررسی ایمنی تماس مستقیم PCM ها با مواد غذایی، ارزیابی مهاجرت احتمالی ترکیبات، تدوین استانداردهای قانونی و انجام مطالعات اقتصادی برای امکان‌سنجی تولید در مقیاس صنعتی، از الزامات تجاری‌سازی این فناوری است. علاوه بر این، ادغام PCM ها با فناوری‌های نوین مانند حسگرهای هوشمند، شاخص‌های زمان-دما، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی می‌تواند نسل جدیدی از بسته‌بندی‌های هوشمند را ایجاد کند که علاوه بر کنترل فعال دما، قابلیت پایش لحظه‌ای شرایط نگهداری، پیش‌بینی فساد محصول و مدیریت هوشمند زنجیره سرد را نیز داشته باشند. تحقق این اهداف می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی، افزایش ماندگاری مواد غذایی، کاهش ضایعات و توسعه پایدار صنعت بسته‌بندی ایفا کند.

منابع تأمین مالی

بودجه این کار توسط کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، با کد رهگیری ۵۰۰۷۱۳۶ تأمین شده است.

میزان مشارکت نویسندگان

حنانه یزدانبخش: مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، نوشتن پیش‌نویس اصلی. **سودابه اله مرادی:** نوشتن پیش‌نویس اصلی. **محمدهادی مرادیان:** بررسی و ویرایش متن. **مریم عزیزی لعل آبادی:** مفهوم‌سازی، تأمین مالی، مدیریت پروژه، نظارت، منابع، بررسی و ویرایش متن.

سپاسگزاری

کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه با شماره گرنت ۵۰۰۷۱۳۶، مجوز و بودجه این مطالعه را اعطا کرد.

پایداری چرخه‌ای، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود کرده است. مطالعات همچنین نشان دادند که استفاده از سامانه‌های کامپوزیتی، کپسوله‌سازی میکرو و نانو، فناوری الکتروریسی و به‌کارگیری نانوذرات رسانای حرارتی، مؤثرترین راهکارها برای رفع محدودیت‌های PCM ها از جمله نشت، هدایت حرارتی پایین و افت عملکرد در چرخه‌های حرارتی هستند. این راهبردها امکان به‌کارگیری موفق PCM ها را در فیلم‌ها، پوشش‌ها و نانوالیاف بسته‌بندی فراهم کرده و عملکرد آن‌ها را در شرایط واقعی زنجیره سرد بهبود بخشیده‌اند. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، هنوز چالش‌هایی نظیر بهبود پایداری بلندمدت، افزایش زیست‌سازگاری، کاهش هزینه تولید و ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها در مقیاس صنعتی باقی مانده است. از این‌رو، پژوهش‌های آینده باید بر توسعه PCM های پایدار و مقرون‌به‌صرفه، طراحی سامانه‌های چندعملکردی و ادغام آن‌ها با فناوری‌های هوشمند نظیر حسگرهای دما و شاخص‌های زمان-دما متمرکز شوند. چنین رویکردی می‌تواند زمینه توسعه نسل جدید بسته‌بندی‌های هوشمند را فراهم کرده و نقش مهمی در ارتقای ایمنی مواد غذایی، کاهش ضایعات و دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا کند.

روندهای آتی و پیشنهاد‌های پژوهشی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه مواد تغییر فاز برای بسته‌بندی هوشمند، هنوز فاصله قابل توجهی میان نتایج آزمایشگاهی و کاربرد صنعتی این فناوری وجود دارد. از این‌رو، پژوهش‌های آینده باید بر طراحی PCM های زیست‌پایه با دمای تغییر فاز قابل تنظیم، افزایش هدایت حرارتی بدون کاهش ظرفیت گرمایی نهان و توسعه سامانه‌های شکل‌پایدار با مقاومت چرخه‌ای بالا متمرکز شوند. همچنین، بهینه‌سازی روش‌های ریزکپسوله‌سازی، نانوکپسوله‌سازی و الکتروریسی به‌منظور کاهش نشت و افزایش دوام عملکرد، از مهم‌ترین اولویت‌های پژوهشی محسوب می‌شود.

References

1. Abedi-Firoozjah, R., Azimi-Salim, S., Afrah, A., Yekta, R., Assadpour, E., Azizi-Lalabadi, M., & Jafari, S.M. (2024). Freshness/spoilage monitoring of protein-rich foods by betacyanin-loaded gelatin/carboxymethyl cellulose halochromic labels. *Future Foods*, 10, 100458. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100458>
2. Aguiar, M., Gaspar, P.D., & da Silva, P.D. (2023). Thermal management of short-range distribution of perishable food products using phase change materials in packaging: Real-time field data acquisition. *Energies*, 16(13), 5191. <https://doi.org/10.3390/en16135191>
3. Al-Ahmed, A., Mazumder, M.A.J., Salhi, B., Sari, A., Afzaal, M., & Al-Sulaiman, F.A. (2021). Effects of carbon-based fillers on thermal properties of fatty acids and their eutectics as phase change materials used for thermal energy storage: a review. *Journal of Energy Storage*, 35, 102329. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102329>
4. Al-Gunaid, T., Sobolčiak, P., Chriaa, I., Karkri, M., Mrlik, M., Ilčíková, M., . . . Krupa, I. (2023). Phase change materials designed from Tetra Pak waste and paraffin wax as unique thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 64, 107173. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107173>
5. Antunes, J.L., Silva, P.D., & Gaspar, P.D. (2025). Thermal behavior of alveoli with phase change materials in fruit packaging. *Applied Sciences*, 15(4), 1924. <https://doi.org/10.3390/app15041924>

6. Azizi-Lalabadi, M., Rahimzadeh-Sani, Z., Feng, J., Hosseini, H., & Jafari, S.M. (2023). The impact of essential oils on the qualitative properties, release profile, and stimuli-responsiveness of active food packaging nanocomposites. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(13), 1822-1845. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1971154>
7. Azizi-Lalabadi, M., Rafiei, L., Divband, B., & Ehsani, A. (2020). Active packaging for Salmon stored at refrigerator with Polypropylene nanocomposites containing 4A zeolite, ZnO nanoparticles, and green tea extract. *Food Science & Nutrition*, 8(12), 6445-6456. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1934>
8. Bahrami, S., & Sablani, S.S. (2025). Phase change materials in food packaging: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 18(4), 3100-3123. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03564-0>
9. Bayram, B., Ozkan, G., Kostka, T., Capanoglu, E., & Esatbeyoglu, T. (2021). Valorization and application of fruit and vegetable wastes and by-products for food packaging materials. *Molecules*, 26(13), 4031. <https://doi.org/10.3390/molecules26134031>
10. Bhatlawande, A.R., Ghatge, P.U., Shinde, G.U., Anushree, R., & Patil, S.D. (2024). Unlocking the future of smart food packaging: biosensors, IoT, and nano materials: AR Bhatlawande et al. *Food Science and Biotechnology*, 33(5), 1075-1091. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01486-9>
11. Bidiyasar, R., Kumar, R., & Jakhar, N. (2024). A critical review of polymer support-based shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage applications. *Energy Storage*, 6(4), e639. <https://doi.org/10.1002/est2.639>
12. Carvalho, L.G., de Carvalho, A.P.A., & Conte-Junior, C.A. (2025). Bioactive compounds, antimicrobial properties of Açai (*Euterpe oleracea* mart.) and its processing residues—insights for smart packaging and green chemistry. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 65, 103540. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103540>
13. Chalivendula, S.R., & Tarigonda, H. (2025). Recent advances in organic phase change materials for thermal energy storage: a review on sustainable development applications. *International Journal of Thermophysics*, 46(6), 88. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03559-9>
14. Chen, H., Xuan, J., Deng, Q., & Gao, Y. (2022). WOOD/PCM composite with enhanced energy storage density and anisotropic thermal conductivity. *Progress in Natural Science: Materials International*, 32(2), 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.01.002>
15. Chen, Q., Chang, C., & Zhang, L. (2021). Surface engineering of cellulose film with myristic acid for high strength, self-cleaning and biodegradable packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, 269, 118315. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118315>
16. Dardari, O., Sair, S., El Idrissi, A., Benjelloun, G.R., Ait Ousaleh, H., Maati, H., . . . Amadine, O. (2025). Development of temperature-regulating CR/PVA bionanocomposite films with phase change materials and antibacterial properties for ice cream packaging. *Food Chemistry*, 480, 1434. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143492>
17. Deka, H., Naseem, A., Bhansali, A.A., Mabood, M.F., Gangawane, K.M., & Sablani, S.S. (2026). Phase change materials-based biodegradable packaging for perishable food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 25(1), e70404. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70404>
18. Duquesne, M., Mailhé, C., Doppiu, S., Dauvergne, J.-L., Santos-Moreno, S., Godin, A., . . . Palomo del Barrio, E. (2021). Characterization of fatty acids as biobased organic materials for latent heat storage. *Materials*, 14(16), 4707. <https://doi.org/10.3390/ma14164707>
19. Güngör Ertuğral, T., & Alkan, C. (2021). Synthesis of thermally protective PET-PEG multiblock copolymers as food packaging materials. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9_suppl), S1125-S1133. <https://doi.org/10.1177/09673911211045683>
20. Harini, R., Sunil, C., & Natarajan, V. (2026). Mechanistic suppression of spoilage in Indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) using phase change materials: An integrated volatile and metabolite profiling approach. *Journal of Food Science*, 91(7), e71255. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.71255>
21. Hassoun, A., Dankar, I., Bhat, Z., & Bouzembrak, Y. (2024). Unveiling the relationship between food unit operations and food industry 4.0: A short review. *Heliyon*, 10(20). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39388>
22. Hu, C., Yao, C., Sun, Y., Chen, Z., Zhu, X., Wang, S., . . . Huang, C. (2025). Electrostatic spinning packaging for food temperature management—phase change energy storage and radiative cooling characteristics. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(3), 255. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01332-y>
23. Jafarpour, M., Fathi, M., & Soltanizadeh, N. (2023). Encapsulation of polyethylene glycol as a phase change material using alginate microbeads to prevent temperature fluctuation-Case study: Fish packaging. *Food Hydrocolloids*, 134, 108029. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108029>
24. Jain, N.K., Paliwal, D., & Jain, P. (2024). Experimental investigation of dodecanoic acid-tetradecanoic acid-dodecanol ternary mixture based nanoparticle enriched-phase change material for food preservation applications.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 09544089241285099. <https://doi.org/10.1177/09544089241285099>
25. Liu, P., Chen, X., Li, Y., Cheng, P., Tang, Z., Lv, J., . . . & Wang, G. (2022). Aerogels meet phase change materials: fundamentals, advances, and beyond. *ACS Nano*, 16(10), 15586-15626. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c05067>
 26. Liu, P., Cui, X., Wang, Y., Zhang, Z., Rao, J., Jiang, S., & Gu, X. (2023). Preparation and characterization of lauric acid/modified fly ash/graphene composite as low-cost and eco-friendly phase change materials for thermal energy storage. *Energies*, 16(15), 5666. <https://doi.org/10.3390/en16155666>
 27. Liu, Q., Zhang, J., Liu, J., Sun, W., Xu, H., & Liu, C. (2023). Self-healed inorganic phase change materials for thermal energy harvesting and management. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119423. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119423>
 28. Mehling, H., Brütting, M., & Haussmann, T. (2022). PCM products and their fields of application-An overview of the state in 2020/2021. *Journal of Energy Storage*, 51, 104354. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104354>
 29. Nabi, L., & Nourani, M. (2023). Biodegradable form stable phase change material for cold storage packaging of meat. *Meat Science*, 201, 109188. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109188>
 30. Pahanli, Y., & Valipour, M.S. (2021). Application of phase change materials in refrigerator and freezer appliances: A comprehensive review. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 8(1), 87-104. <https://doi.org/10.22075/jhmtr.2021.21860.1316>
 31. Pasha, A.M. (2026). Phase-change material-based thermal management for energy-efficient and sustainable food preservation systems. <https://doi.org/10.11648/j.ajmme.20261001.11>
 32. Pereira, A., Marques, M.A., Alves, J., Morais, M., Figueira, J., Pinto, J.V., & Moreira, F.T. (2024). Irreversible colorimetric bio-based curcumin bilayer membranes for smart food packaging temperature control applications. *RSC Advances*, 14(13), 8981-8989. <https://doi.org/10.1039/d4ra01411a>
 33. Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2023). *Multifunctional phase change materials: fundamentals, properties and applications*: Elsevier.
 34. Png, Z.M., Soo, X.Y.D., Chua, M.H., Ong, P.J., Suwardi, A., Tan, C.K.I., . . . & Zhu, Q. (2022). Strategies to reduce the flammability of organic phase change Materials: A review. *Solar Energy*, 231, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.057>
 35. Qazanfarzadeh, Z., Kadivar, M., Shekarchizadeh, H., & Porta, R. (2021). Secalin films acylated with capric acid chloride. *Food Bioscience*, 40, 100879. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100879>
 36. Rahimi-Khoigani, S., & Hamdami, N. (2023). Effect of improved latent heat storage system on the temperature fluctuations and quality of foods. *Food Control*, 146, 109542. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109542>
 37. Rahimi-Khoigani, S., & Hamdami, N. (2025). Optimization of latent heat storage system performance in food packaging. *Journal of Food Engineering*, 398, 112604. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112604>
 38. Rivera, D.R., & Moraga, N.O. (2024a). Energy analysis of convective freezer cabinet with PCMs and salmon-fillet during charging, discharging and normal operation processes by CFD modeling. *Journal of Energy Storage*, 83, 110558. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110558>
 39. Sarkar, S., Mestry, S., & Mhaske, S. (2022). Developments in phase change material (PCM) doped energy efficient polyurethane (PU) foam for perishable food cold-storage applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104620>
 40. Singh, J., Parvate, S., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2020). Facile synthesis of microencapsulated 1-dodecanol (PCM) for thermal energy storage and thermal buffering ability in embedded PVC film. *Energy & Fuels*, 34(7), 8919-8930. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01019>
 41. Song, D.-H., Hoa, V.B., Kim, H.W., Khang, S.M., Cho, S.-H., Ham, J.-S., & Seol, K.-H. (2021). Edible films on meat and meat products. *Coatings*, 11(11), 1344. <https://doi.org/10.3390/coatings11111344>
 42. Song, L., Guo, W., He, Z., & Zhang, P. (2024). Thermal, economic and food preservation performances of a refrigerated warehouse equipped with on-shelf phase change material. *International Journal of Refrigeration*, 165, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.002>
 43. Swetha, T.A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., . . . & Arun, A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA)-Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123715. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123715>
 44. Tas, C.E., & Unal, H. (2021). Thermally buffering polyethylene/halloysite/phase change material nanocomposite packaging films for cold storage of foods. *Journal of Food Engineering*, 292, 110351. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110351>
 45. Thanakkasaranee, S., & Seo, J. (2021). Tunable temperature-responsive permeable composite films using polyethylene glycol as a phase change material. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100683. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100683>

46. Tony, M.A. (2021). Recent frontiers in solar energy storage via nanoparticles enhanced phase change materials: Succinct review on basics, applications, and their environmental aspects. *Energy Storage*, 3(4), e238. <https://doi.org/10.1002/est2.238>
47. Vennapusa, J.R., Konala, A., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2020). Caprylic acid based PCM composite with potential for thermal buffering and packaging applications. *Materials Chemistry and Physics*, 253, 123453. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123453>
48. Vennapusa, J.R., Singh, J., & Chattopadhyay, S. (2022). Curding of milk in incubator utilizing latent heat of lauric acid in winter. *Energy Storage*, 4(3), e307. <https://doi.org/10.1002/est2.307>
49. Wang, X., Li, W., Huang, Y., Zhang, S., & Wang, K. (2023). Study on shape-stabilised paraffin-ceramsite composites with stable strength as phase change material (PCM) for energy storage. *Construction and Building Materials*, 388, 131678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131678>
50. Wang, Q., Xu, D., & Wang, Q. (2024). Novel PVA-based foams for cold chain logistics with high efficiency. *Polymer*, 302, 127092. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127092>
51. Wu, T., Dong, Y., Zhu, W., Xie, Z., Jiang, T., Yu, X., . . . & Zhong, T. (2026). Phase change material-based antibacterial nanoparticles for short-term preservation of cooked meat during temperature abuse. *npj Science of Food*. <https://doi.org/10.1038/s41538-026-00808-5>
52. Xu, X., Zhou, Y., Zhang, S., Zhai, X., & Zhang, X. (2023). Preparation and heat transfer model of stereotyped phase change materials suitable for cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, 60, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106610>
53. Yenare, R., Chandrakant, S., Panchal, H., Bongale, A., Roy, A., Naik, N., Chan, C. K., Dixit, S., & Singh, S. (2026). Investigation on PCM-Based cold storage performance under variable charging temperatures and layout configurations. *Energy Conversion and Management: X*, 101854. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101854>
54. Yuan, K., Chen, Q., Qin, M., Gao, S., Wang, Q., Gao, S., . . . & Zou, R. (2024). Micro/nano encapsulated phase change materials: preparation, principle, and emerging advances in medical field. *Advanced Functional Materials*, 34(23), 2314487. <https://doi.org/10.1002/adfm.202314487>
55. Zahid, I., Farooq, M., & Farhan, M. (2023). Phase change materials (PCMs). In *Nano Enhanced Phase Change Materials: Preparation, Properties and Applications* (pp. 11-44): Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5475-9_2
56. Zare, M., & Mikkonen, K.S. (2023). Phase change materials for life science applications. *Advanced Functional Materials*, 33(12), 2213455. <https://doi.org/10.1002/adfm.202213455>
57. Zhang, N., Zhang, Z., Li, J., & Cao, X. (2024). Performance analysis and prediction of hybrid battery thermal management system integrating PCM with air cooling based on machine learning algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 257, 124474. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124474>
58. Zhang, Q., Liu, C., Wu, X., Zhang, X., Song, J., Li, Y., & Mao, Y. (2024). Preparation and thermal properties of latent functional thermal fluid based on size-controllable phase change nanocapsules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 275, 113031. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113031>
59. Zhang, S., Zhu, Y., Zhang, H., Xu, F., Sun, L., Xia, Y., . . . & Li, B. (2022). Cadmium Sulfide—reinforced double-shell microencapsulated phase change materials for advanced thermal energy storage. *Polymers*, 15(1), 106. <https://doi.org/10.3390/polym15010106>
60. Zhang, Y., Dai, L., & Yang, C. (2025). Dual-mode thermal management in gelatin-based smart packaging films: Integrating phase change thermal buffering and passive radiative cooling. *Chemical Engineering Journal*, 169251. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.169251>
61. Zhao, J., Sun, J., Li, Y., Xia, R., Zhang, W., Wang, B., . . . & Guo, H. (2022). Wood-plastic materials with organic–inorganic hybrid phase change thermal storage as novel green energy storage composites for building energy conservation. *Journal of Materials Science*, 57(5), 3629-3644. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06861-7>
62. Zhao, Q., Wong, S.-Y., Zhang, Y., Lim, P.-C., Sivaraja, V. K., Ngo, A. C.-Y., . . . & Li, X. (2025). Biobased phase change material packaging for dark chocolate: Enhanced thermal management against temperature fluctuations. *Food Packaging and Shelf Life*, 52, 101632. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101632>

Contents

Research Articles

Acrylamide in Espresso Coffee: Occurrence and Risk Assessment Study in Adolescents and Adults 331
Sh. Taghavi, M. Moeenfar, R. Farhoosh

Effect of Cream Fat Content and Milk Protein Concentrate on the Formation and Stability of Industrial Sarshir 349

M. Mazaheri Tehrani, S. Abdullahzadeh, Sh. Taziki Shams-abadi

Optimization of Enzymatic Hydrolysis of Olive Seeds Protein by Response Surface Methodology and Evaluation of Its Stability 363

M. Ranjbar, A. Sadeghi Mahoonak, M. Ghorbani

Short Reaserch Article

Effect of Cysteine and Modified Atmosphere Packaging on Maintaining the Quality and Storage Time of Green Basil 389

N. Norouzi Jajarm, N. Sedaghat, M. Taghizadeh

Review Articles

A Review on Edible Raw Materials that Can Be Used in Food 3D Printers 405
H. Lashkari, Sh. Esmailzadeh

A Comprehensive Review of the Application of Phase Change Materials in Food Packaging: Their Impact on Cold Chain Performance and Product Quality Preservation 431

H. Yazdanbakhsh, S. Alahmoradi, M.H. Moradiyan, M. Azizi-Lalabadi

Iranian Food Science and Technology Research Journal

Vol. 22

No. 4

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

- Acrylamide in Espresso Coffee: Occurrence and Risk Assessment Study in Adolescents and Adults..... 331**
Sh. Taghavi, M. Moeenfar, R. Farhoosh

- Effect of Cream Fat Content and Milk Protein Concentrate on the Formation and Stability of Industrial Sarshir..... 349**
M. Mazaheri Tehrani, S. Abdullahzadeh, Sh. Taziki Shams-abadi

- Optimization of Enzymatic Hydrolysis of Olive Seeds Protein by Response Surface Methodology and Evaluation of Its Stability 363**
M. Ranjbar, A. Sadeghi Mahoonak, M. Ghorbani

Short Reaserch Article

- Effect of Cysteine and Modified Atmosphere Packaging on Maintaining the Quality and Storage Time of Green Basil..... 389**
N. Norouzi Jajarm, N. Sedaghat, M. Taghizadeh

Review Articles

- A Review on Edible Raw Materials that Can Be Used in Food 3D Printers..... 405**
H. Lashkari, Sh. Esmaelzadeh
- A Comprehensive Review of the Application of Phase Change Materials in Food Packaging: Their Impact on Cold Chain Performance and Product Quality Preservation..... 431**
H. Yazdanbakhsh, S. Alahmoradi, M.H. Moradiyan, M. Azizi-Lalabadi