



نشریه علمی پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران



جلد ۲۱ شماره ۲
سال ۱۴۰۴

شاپا: ۴۱۶۱-۱۷۳۵

شماره پیاپی ۹۲

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- تأثیر فرآیند حرارت‌دهی مرطوب و خشک و اندازه ذرات آرد گندم بر رئولوژی خمیر و بیانی نان حجیم ۱۳۵
محمد فضلی راد - جعفر محمدزاده میلانی - سپیده حقیقت خرازی
- ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر پایه بتالائین با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب در پاستیل ۱۴۹
عاطفه قورچی - اکرم آریان‌فر - وحید حکیم‌زاده - سارا ناجی طبسی
- بررسی اثر اسیدهای آلی (آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک) در غلظت‌های مختلف بر ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو ۱۶۷
فخرالدین صالحی - مریم تشکری - کیمیا ثمری
- بهبود خصوصیات فیزیکی مکانیکی برنج اکستروود شده مخلوط آرد کینوا-برنج با استفاده از ژل پرشده-امولسیون پیکرینگ حاوی بتاکاروتن ۱۸۱
مریم داوطلب - سارا ناجی طبسی - مصطفی شهیدی نوقابی
- بررسی تأثیر صمغ ریشه گیاه سریش به‌عنوان جانشین چربی بر ویژگی‌های فیزیکی، حسی و رئولوژیکی بستنی کم‌چرب ۲۰۱
فاطمه سبزه‌میدانی - مسعود تقی‌زاده - محمد صالح همتی حسن‌پور
- بررسی و ارزیابی نیوزوم‌های حاوی روغن کتان و کروسین با دو روش حباب و حرارتی ۲۱۹
پریسا مردانی - قدیر رجب‌زاده - بیژن ملانکه نیکویی - آرام بستان
- بررسی اثر پوشش طبیعی نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آباتیت بر صفات فیزیولوژیکی و ماندگاری قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) ۲۳۷
زهرا ضیائی قهنویه - محمد رضا راجی - عبدالله احتشام‌نیا - سید سجاد سهرابی

مقاله کوتاه

- بررسی اثر پلاسمای سرد بر روی خواص فیزیکی شیمیایی و میکروبی گلاب ۲۵۵
زینب رحمانی - پاشا احمدی - رضا شرافتی چالشری

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران

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

خرداد- تیر ۱۴۰۴

شماره ۲

جلد ۲۱

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر ناصر شاهنوشی

سردبیر: دکتر مسعود پاورمنش

اعضای هیئت تحریریه:

استاد، میکروبیولوژی و بیوتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر سید علی مرتضوی
استاد، میکروبیولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر فخری شهیدی
استاد، میکروبیولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر محمدباقر حبیبی نجفی
دانشیار، میکروبیولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتر مرتضی خمیری
استاد، مهندسی و خواص بیوفیزیک مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر سید محمد علی رضوی
استاد، شیمی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر رضا فرهوش
استاد، میکروبیولوژی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد	دکتر بی بی صدیقه فضلی بزاز
استاد، مهندسی مواد غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتر مهدی کاشانی نژاد
استاد، تکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر آرش کوچکی
استاد، مهندسی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر محبت محبی
استاد، مهندسی مواد غذایی، دانشگاه تبریز	دکتر بابک قنبرزاده
استاد، بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه صنعتی شریف	دکتر ایران عالمزاده
دانشیار، نانو فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد	دکتر قدیر رجبزاده اوغاز
دانشیار، زیست مولکولی، بیمارستان زنان و بزرگام، ایالت متحده آمریکا	دکتر مهیار حیدرپور
دانشیار، میکروبیولوژی غذایی، دانشگاه متروپولیتن لندن	دکتر حمید بهادر قدوسی
استاد، بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی	دکتر کیانوش خسروی
استاد، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه آریزونا	دکتر مرتضی عباسزادگان
استاد، مهندسی تولید مواد غذایی، دانشگاه فنی دانمارک	دکتر محمدامین محمدیفر
استاد، بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه صنعتی شریف	دکتر منوچهر وثوقی
دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه	دکتر هادی الماسی
دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان	دکتر میلاد فتحی
استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تربیت مدرس	دکتر سلیمان عباسی
استاد، گروه علوم تغذیه و مواد غذایی، دانشگاه پورتو، پرتغال	دکتر نونو بورخس
دانشیار، گروه علوم مولکولی، دانشکده منابع طبیعی و علوم کشاورزی، دانشگاه سوئد	دکتر علی عطا معظمی
دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشگاه کشاورزی مایکل اوکپارا، ایالت ابیا، نیجریه	دکتر کلیفورد نکمناسو اوبی
دانشیار گروه فناوری غذایی، مؤسسه تکنولوژی و علم هندوستان، چنای، تامیل نادو، هند	دکتر ساموئل ایوفمی اولالکان آدیبه

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

- ۱۳۵ تأثیر فرآیند حرارت دهی مرطوب و خشک و اندازه ذرات آرد گندم بر رئولوژی خمیر و بیاتی نان حجیم
محمد فضلی راد- جعفر محمدزاده میلانی- سپیده حقیقت خرازی
- ۱۴۹ ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر پایه بتالائین با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب در پاستیل
عاطفه قورچی- اکرم آریان‌فر- وحید حکیم‌زاده- سارا ناجی طبسی
- ۱۶۷ بررسی اثر اسیدهای آلی (آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک) در غلظت‌های مختلف بر ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی
صمغ دانه بالنگو
فخرالدین صالحی- مریم تشکری- کیمیا ثمری
- ۱۸۱ بهبود خصوصیات فیزیکومکانیکی برنج اکستروود شده مخلوط آرد کینوا-برنج با استفاده از ژل پر شده- امولسیون پیکرینگ حاوی
بتاکاروتن
مریم داوطلب- سارا ناجی طبسی- مصطفی شهیدی نوقایی
- ۲۰۱ بررسی تأثیر صمغ ریشه گیاه سریش به‌عنوان جانشین چربی بر ویژگی‌های فیزیکی، حسی و رئولوژیکی بستنی کم‌چرب
فاطمه سبزه‌میدانی- مسعود تقی‌زاده- محمد صالح همتی حسن‌پور
- ۲۱۹ بررسی و ارزیابی نیوزوم‌های حاوی روغن کتان و کروسین با دو روش حباب و حرارتی
پریسا مردانی- قدیر رجب‌زاده- بیژن ملانکه‌نیکویی- آرام‌بستان
- ۲۳۷ بررسی اثر پوشش طبیعی نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر صفات فیزیولوژیکی و ماندگاری قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*)
زهره ضیائی قهنویه- محمد رضا راجی- عبدالله احتشام‌نیا- سید سجاد سهرابی

مقاله کوتاه

- ۲۵۵ بررسی اثر پلاسمای سرد بر روی خواص فیزیکی شیمیایی و میکروبی گلاب
زینب رحمانی- پاشا احمدی- رضا شرافتی چالشتی

The Effect of Wet and Dry Heating Process and Wheat Flour Particle Sizes on Dough Rheology and Staling of Bread

M. Fazli Rad¹, J. Mohammadzadeh Milani^{1*}, S. Haghighat-Kharazi¹

1- Department of Food Science and Technology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
(* - Corresponding Author Email: j.milani@sanru.ac.ir)

Received: 06.01.2024
Revised: 21.04.2024
Accepted: 21.04.2024
Available Online: 23.04.2025

How to cite this article:

Fazli Rad, M., Mohammadzadeh Milani, J., & Haghighat-Kharazi, S. (2025). The effect of wet and dry heating process and wheat flour particle sizes on dough rheology and staling of bread. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(2), 133-146. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.86258.1308>

Introduction

Wheat plays a major role in global nutrition but it cannot be used without processing. The nutritional importance of wheat flour is due to the presence of gluten proteins that create viscoelastic properties. Gluten as a protein inhibits the staleness of bread. Physical modification of flour is a safe method without using any kind of chemicals. Physical modification of flour includes heat treatment and particle size classification. Particle size distribution is the most widely used technique for classifying solid particles, which is effective in improving rheological properties by affecting the physicochemical properties of flour during hydration, such as water absorption, solvent retention, sedimentation, and adhesion properties. Heat treatments, depending on the intensity of temperature and process time, by modifying starch granules, denaturing proteins, and deactivating enzymes, reducing microbial load, and even modifying flavor and aroma are suggested as a suitable way to improve the quality of bread, especially for weak flour. Considering that the interaction of particle size with wet and dry heating of wheat flour on the rheological properties of dough and staleness of bread has not been studied so far. In this research, by dividing wheat flour with different particle sizes and using wet and dry heat treatments for modification the functional characteristics of wheat flour and the improvement of the rheological characteristics of dough and staleness of bread were investigated.

Materials and Methods

The content of moisture, pH, ash, protein, and Zeleny number of wheat flour was measured using the AACC standard method (2000), and wet and dry gluten with the standard number (9639-1, 3) was measured. To classify the size of the particles, wheat flour was divided by a shaker sieve with different sizes of 180, 150, and 125 microns, then under the influence of dry heat treatment for 10 minutes at 100 degrees Celsius and moist heat treatment with 16% humidity for 5 minutes at a temperature of 96 degrees Celsius was placed. Materials for bread formulation for 100 g of wheat flour included 58 ml of water, 2.5 g of sugar, 1 g of salt, 1 g of vegetable oil, and 2 g of yeast. The rheological parameters of the dough were measured by an alveography device. To check the staleness of bread during the storage period, moisture tests of core and shell, blue activity of core to shell, analysis of bread texture, and DSC were performed. Finally, the factorial test was used to investigate the effects of particle size and heat treatment on wheat flour, and Duncan's multiple range test was used to compare the means at the 5% probability level.

Results and Discussion

The results showed that the effect of particle size and dry heat treatment on dough rheology and water activity of bread core and crust was significant, while moist heat treatment had significantly more bread core moisture ($p < 0.05$). According to the results, dry heat treatment did not affect the texture of bread ($p > 0.05$), while the use of flour obtained from moist heat treatment with a particle size of 180 microns led to the improvement of bread texture by reducing the



©2025 The author(s). 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.2024.86258.1308>

hardness and chewability ($p<0.05$). The results of thermal analysis showed that the moist heat treatment sample with a particle size of 180 microns had the lowest enthalpy and was the best sample ($p<0.05$).

Conclusion

In general, the use of flour with a particle size of 180 microns and moist heat treatment to improve the rheological and staling properties of bread were the best examples.

Keywords: Bread quality, Particle size, Physical modification, Wheat flour

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۳۳-۱۴۶

تأثیر فرآیند حرارت‌دهی مرطوب و خشک و اندازه ذرات آرد گندم بر رئولوژی خمیر و بیاتی نان حجیم

محمد فضلی راد^۱ - جعفر محمدزاده میلانی^{۱*} - سپیده حقیقت خرازی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی خواص رئولوژیکی خمیر و بیاتی نان حاصل از آرد گندم در اندازه ذرات مختلف و تحت تأثیر تیمارهای حرارتی متفاوت بود. برای این منظور آرد گندم در اندازه ذرات مختلف (۱۵۰، ۱۸۰ و ۱۲۵ میکرون) تهیه و تحت تیمار حرارتی خشک به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و تیمار حرارتی مرطوب (رطوبت، ۱۶ درصد) به مدت ۵ دقیقه در دمای ۹۶ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و با نمونه‌های شاهد (بدون حرارت‌دهی) مقایسه شدند. نتایج نشان داد تأثیر اندازه ذرات و تیمار حرارتی خشک بر رئولوژی خمیر و فعالیت آبی مغز و پوسته نان معنی‌دار بود، در حالی که بهترین تعادل ویسکوالاستیک (P/L) خمیر را و کمترین میزان فعالیت آبی مغز و بیشترین میزان فعالیت آبی پوسته نان را نمونه تیمار حرارتی خشک با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشتند. تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون در مقایسه با سایر نمونه‌ها از رطوبت مغز نان بیشتری برخوردار بود. طبق نتایج بدست آمده تیمار حرارت خشک تأثیری بر بافت نان‌ها نداشت، در حالی که بکارگیری آرد حاصل از تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون با کاهش میزان سفتی و قابلیت جویدن منجر به بهبود ویژگی بافت نان گردید. نتایج حاصل از آنالیز حرارتی نشان داد نمونه تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون کمترین میزان آنتالپی را داشته و بهترین نمونه بود. به‌طور کلی استفاده از آرد با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون و تیمار حرارتی مرطوب با بهبود خواص رئولوژیکی و بیاتی نان بهترین نمونه بودند.

واژه‌های کلیدی: آرد گندم، اصلاح فیزیکی، اندازه ذرات، کیفیت نان

مقدمه

نگهداشت گاز) است که گرانول‌های نشاسته و قطعات فیبری را محصور می‌کند. گلوتن مهمترین عامل در یکنواختی حجم و بافت، بازدهی و جذب آب و طعم و مزه در فرآورده‌های آرد گندم است. گلوتن به‌عنوان پروتئین مهارکننده بیات شدن نان منجر به کاهش سرعت انتقال رطوبت از مغز نان به پوسته می‌شود (Payan, 2013). گندم‌های ضعیف مقدار پروتئین کمتری دارند و دارای کیفیت پایین (ضعیف بودن گلوتن) می‌باشند و آرد و خمیر و نان حاصل از آنها کیفیت مناسبی ندارد. برای رفع این نقصان از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود (Shanmugavel et al., 2019).

گندم نقش عمده‌ای در تغذیه جهانی دارد. اما بدون فرآوری قابل استفاده نیست. اهمیت غذایی آرد گندم به‌دلیل خاصیت ویسکوالاستیک (وجود پروتئین‌های گلوتن) منحصر به فرد آن است (Sudha et al., 2016). یکی از اجزای بسیار کاربردی آرد، مجموعه پروتئین‌هایی است (گلیادین و گلوٹنین) که پس از مخلوط شدن با آب، گلوتن را تشکیل می‌دهند. شبکه گلوتن تعیین‌کننده اصلی ویژگی‌های مهم خمیر (گسترش‌پذیری و مقاومت به کشش و تحمل به اختلاط و قابلیت

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(Email: j.milani@sanru.ac.ir)
(*) - نویسنده مسئول

اصلاح فیزیکی آرد از جمله روش‌های مورد استفاده برای اصلاح ویژگی عملکردی آرد‌ها و در نتیجه بهبود کیفیت محصولات حاصل از آن‌ها می‌باشد. مزیت اصلی اصلاح فیزیکی نسبت به سایر روش‌ها این است که یک روش ایمن و بدون استفاده از هر گونه مواد شیمیایی و غیره است. اصلاح فیزیکی آرد شامل عملیات حرارتی و طبقه‌بندی اندازه ذرات می‌باشد. عملیات حرارتی به‌عنوان روشی مناسب برای بهبود کیفیت نان به‌ویژه در آرد ضعیف و نامرغوب پیشنهاد شده است (Rosa & Dias, 2011). توزیع اندازه ذرات پراکندترین تکنیک برای طبقه بندی ذرات جامد که با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آرد در هیدراتاسیون مانند جذب آب، احتباس حلال، ته‌نشینی، و خواص چسبندگی در بهبود خواص رئولوژیکی مؤثر باشد (Pang et al., 2021). تیمارهای حرارتی، بسته به شدت دما و زمان فرآیند با اصلاح گرانول‌های نشاسته، دنااتوراسیون پروتئین‌ها، غیرفعال کردن آنزیم‌ها، کاهش بار میکروبی و حتی اصلاح طعم و عطر روشی مناسب برای تغییر عملکرد آرد ضعیف پیشنهاد شده است (Chakraborty et al., 2022).

به‌طور کلی مطالعات کمتری بر تأثیر اندازه ذرات و تیمار حرارتی بر خواص رئولوژیکی خمیر و بیاتی نان انجام گرفته است. به‌عنوان مثال، لین و همکاران (Lin et al., 2020) اثر اندازه ذرات آرد گندم کامل را بر خواص خمیر و کیفیت نان و قابلیت هضم نشاسته بررسی کردند. اندازه ذرات شامل ذرات درشت و متوسط و ریز بود. خمیر ساخته شده با اندازه ذرات درشت انعطاف‌پذیری و پایداری کمتری از خود نشان داد و نان حاصله ساختار فشرده‌تر (تخلخل باز کمتر و ضخامت سلول بیشتر) و حجم ویژه کمتر و بافت سفت‌تری داشت که به‌عنوان ویژگی‌های با کیفیت پایین در نظر گرفته شد. مشخص شد اندازه ذرات نقش مهمی در تعیین کیفیت و قابلیت هضم نان دارد. محمدزاده و همکاران (Mohammadzadeh et al., 2018) در پژوهشی اثر حرارت‌دهی خشک و مرطوب نشاسته سیب‌زمینی بر ویژگی‌های بافتی و بیاتی کیک اسفنجی را ارزیابی کردند، نتایج نشان داد که نشاسته سیب‌زمینی تحت فرآیند حرارت‌دهی به مقدار کم در ترکیب آرد گندم بر کاهش بیاتی کیک و بهبود بیشتر ویژگی کیک اسفنجی مؤثر بود. بسبس و همکاران (Besbes et al., 2015) تأثیر تیمار هیدروترمال در حین پخت نان بر آمیلوز محلول و استحکام و تجزیه مجدد آمیلوپکتین و تحرک آب در هنگام بیات شدن نان را بررسی کردند. دو درجه حرارت ۲۲۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد مد نظر قرار گرفته شد که افزایش استحکام و میزان آمیلوپکتین تجزیه شده همراه با کاهش آب قابل انجماد در طی بیاتی مشاهده شد اگر چه میزان گرمایش پایین‌تر منجر به مقدار بیشتری از تجزیه مجدد آمیلوپکتین می‌شود اما منجر به استحکام کمتری می‌شود. به‌علاوه مقدار آمیلوز محلول و تحرک آب در طول بیات شدن نان

کاهش یافته است و بیات شدن نان در درجه حرارت بالاتر سرعت بیشتری می‌گیرد. نیل و همکاران (Neill et al., 2012) تیمار حرارتی خشک آرد گندم در تولید کیک را در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۳۰ دقیقه انجام دادند. بیان کردند که تیمار حرارتی همانند یک بهبود دهنده عمل کرده و سبب افزایش ارتفاع و دانسیته واقعی کیک شد. ویسکوزیته کیک افزایش یافته و سبب بهبود کیفیت محصول گردید. با توجه به اینکه تاکنون تأثیر اندازه ذرات با حرارت‌دهی مرطوب و خشک آرد گندم بر ویژگی رئولوژیکی خمیر و بیاتی نان مورد مطالعه قرار نگرفته است در این پژوهش با تقسیم‌بندی آرد گندم با اندازه ذرات مختلف (۱۸۰، ۱۵۰، ۱۲۵ میکرون) و استفاده از تیمار حرارتی (مرطوب و خشک) جهت اصلاح ویژگی‌های عملکردی آرد گندم و بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر و بیاتی نان مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده جهت تهیه نان شامل آرد گندم (کارخانه خانی در شهرستان ساری)، روغن مایع گیاهی آفتابگردان (از شرکت لادن، ایران)، مخمر نانویی فوری (از شرکت رضوی، ایران) شکر، و نمک (از شرکت گل‌ها، ایران) بود. جهت تعیین اندازه ذرات مقدار ۱۰۰ گرم آرد گندم بر روی الک‌هایی با مش ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ که به‌ترتیب از بزرگ به کوچک روی شیکر الک قرار گرفته بود ریخته شد، بعد از ۱۰ دقیقه لرزش آرد حاصل به ۳ قسمت به‌ترتیب با اندازه ذرات ۱۸۰، ۱۵۰، ۱۲۵ میکرون تقسیم شد.

ترکیب شیمیایی آرد گندم

آنالیز تقریبی آرد شامل رطوبت، pH، خاکستر، عددزنی، پروتئین آرد گندم با استفاده از روش استاندارد AACC (AACC, 2000) و گلوتن مرطوب و خشک (National standards, standards no 9639-) تعیین شد. میزان پروتئین ۱۱/۴ درصد، خاکستر ۰/۵۲ درصد، رطوبت ۱۴/۱ درصد، pH ۶/۲، گلوتن مرطوب ۲۸/۷ درصد، عدد زنی ۲۳ سی‌سی بر مبنای وزن مرطوب و گلوتن خشک ۹/۴ درصد بر مبنای وزن خشک تعیین گردید.

عملیات حرارتی خشک و مرطوب آرد گندم

در این روش مقدار ۱۰۰ گرم آرد گندم الک شده در فلاسک حجمی شیشه‌ای (۵۰۰ میلی‌لیتر) ریخته شد و حرارت خشک به روش بوکسلا و همکاران (Bucella et al., 2016) به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون (Memmert، مدل UFLLO، آلمان) گرم شدند. حرارت مرطوب نیز به روش بوکسلا و همکاران (Bucella et al., 2016) با رطوبت ۱۶ درصد که مقدار آب مورد نیاز برای تنظیم

میزان رطوبت نمونه‌ها از اختلاف بین رطوبت نمونه و محتوای رطوبت مورد نظر محاسبه و اضافه شد، سپس نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای ۹۶ درجه سانتی‌گراد در آون (Memmert، مدل UFLLO، آلمان) گرم شدند (Bucella et al., 2016).

فرمولاسیون نان حجیم

نان‌های حجیم پخته شده در این پژوهش با استفاده از روش فارهن و همکاران (Farheen et al., 2012) با کمی تغییر تهیه شدند. مواد لازم جهت خمیر نان شامل ۱۰۰ گرم آرد گندم، ۱ گرم نمک، ۲ گرم مخمر، ۲/۵ گرم شکر، ۱ گرم روغن گیاهی و ۵۸ میلی‌لیتر آب بود. خمیر حاصل جهت عمل تخمیر به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد. عمل پخت در فر (مدل deo-il، صنایع پخت مشهد، ایران) در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. در نام‌گذاری تیمارها C= نان شاهد، DHT= نان نمونه تیمار حرارتی خشک، MHT= نان نمونه تیمار حرارتی مرطوب و اعداد نشان دهنده اندازه ذرات هستند (Farheen et al., 2012).

ارزیابی رئولوژی خمیر

ارزیابی رئولوژیکی خمیر با استفاده از دستگاه آلئوگرافی (chopin، مدل alveolab، فرانسه) انجام شد. پارامترهای رئولوژیکی خمیر شامل مقاومت (p)، قابلیت کشش (L)، نسبت مقاومت به قابلیت کشش (P/L)، مقدار انرژی (W) و تورم خمیر (G) می‌باشد (national standards, standards no 11545).

ارزیابی بافت نان حجیم

ارزیابی بافت نان‌ها به روش TPA در روز اول و سوم پخت بوسیله دستگاه بافت‌سنج (Brookfield, USA) انجام شد. جهت انجام این آزمون نمونه با ابعاد ۲۵×۲۵×۲۵ میلی‌متری از قسمت مرکزی نان برش داده شد، سپس پروب ۳/۸ میلی‌متری با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه تا ۴۰ درصد ارتفاع اولیه نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. فاکتورهای مورد ارزیابی شامل سفتی، ارتجاعیت، بهم پیوستگی، فنری و قابلیت جویدن توسط نرم‌افزار Texture Pro CTV 1.6 Build 26 محاسبه شد (Lazaridou et al., 2007).

رطوبت مغز و پوسته

اندازه‌گیری رطوبت پوسته و مغز نان‌ها با روش شیتو و همکاران (Shittu et al., 2008) در روز اول، سوم و پنجم پس از پخت انجام گرفت. طبق این روش نمونه یک گرمی درون ظروف آلومینیومی به مدت ۲ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت سپس

میزان رطوبت با توجه به کاهش وزن نمونه محاسبه شد (Shittu et al., 2008).

فعالیت آبی مغز و پوسته

فعالیت آبی مغز و پوسته نان‌ها با استفاده از دستگاه واتر اکتیویتی متر در روز اول، سوم و پنجم پخت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (AACC, 2000).

آنالیز حرارتی روبشی نان

آنالیز حرارتی نان‌ها توسط دستگاه مدل SANAF-S500 ساخت ایران در فاصل زمانی روز اول، سوم و پنجم پس از پخت انجام گرفت. طبق این آزمون ۱۵ میلی‌گرم از مغز نان جدا در پن دستگاه قرار گرفت. اسکن گرمایی با سرعت حرارت‌دهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و با برنامه دمایی ۲۵-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت (Ji et al., 2007).

تجزیه و تحلیل آماری

جهت بررسی اثرات اندازه ذرات و تیمار حرارتی آرد گندم نتایج کلیه آزمایشات با آزمایش فاکتوریل دو عامله در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار آنالیز شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۶ انجام شد.

نتایج و بحث

رئولوژی خمیر

نتایج حاصل از آزمون رئولوژی خمیر برای تیمارهای مختلف در جدول ۱ آورده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، از نظر میزان مقاومت خمیر (P)، بیشترین میزان مقاومت خمیر مربوط به نمونه تیمار حرارتی خشک با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون بود. تیمارهای حرارتی خشک و مرطوب نسبت به شاهد مقاومت بالایی را نشان دادند. تیمار حرارتی خشک نسبت به تیمار حرارتی مرطوب مقاومت بالاتری داشت. از نظر قابلیت کشش خمیر (L)، بیشترین میزان قابلیت کشش خمیر مربوط به نمونه شاهد با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون بوده است. تیمار حرارتی مرطوب نسبت به تیمار حرارتی خشک از قابلیت کشش بالاتری برخوردار بود. تیمار حرارتی خشک و مرطوب نسبت به شاهد از قابلیت کشش کمتری برخوردار بودند. از نظر نسبت مقاومت خمیر به قابلیت کشش خمیر (P/L)، بیشترین میزان نسبت مقاومت خمیر به قابلیت کشش خمیر یا تعادل ویسکوالاستیک مربوط به نمونه تیمار حرارتی خشک با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون بوده است. تیمار حرارتی خشک

نسبت به تیمار حرارتی مرطوب و شاهد از P/L بالاتری برخوردار بود. از نظر مقدار انرژی (W)، کمترین مقدار انرژی مربوط به نمونه شاهد با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون بوده است. تیمار حرارتی خشک و تیمار حرارتی مرطوب نسبت به شاهد از مقدار انرژی بالاتری برخوردار بودند. تیمار حرارتی مرطوب نسبت به تیمار حرارتی خشک از مقدار انرژی بالاتری برخوردار بود. نمونه‌های تیمار حرارتی خشک با کاهش اندازه ذرات کاهش مقدار انرژی را نشان دادند. از نظر شاخص تورم (G)، بیشترین میزان تورم مربوط به نمونه شاهد با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون بوده است. نمونه‌های شاهد نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی خشک از تورم بالاتری برخوردار بودند. نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی خشک از تورم بالاتری برخوردار بودند. بطور کلی در این پژوهش اندازه ذرات مختلف و تیمارهای حرارتی منجر به تغییر در رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها شد و بهترین تعادل ویسکوالاستیک خمیر (P/L) را نمونه تیمار حرارتی خشک با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون به خود اختصاص داد، که علت آن این است که در اثر تیمار حرارتی خشک، پروتئین‌ها به دلیل از هم باز شدن پیوندهای هیدروژنی و ساختار ثانویه، نامحلول می‌شوند. زمانی که

ماکرومولکول پروتئین باز می‌شود، نواحی آبگریز که در حالت طبیعی در بخش‌های داخلی مولکول قرار دارند در نواحی بیرونی قرار می‌گیرند و ظرفیت جذب آب پروتئین را کم می‌کنند که منجر به کاهش محتوای رطوبتی آرد و سفت شدن خمیر حاصل و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت خمیر می‌شوند. این نتایج با پژوهش پیغمبردوست و همکاران (Paighambardost et al., 2014) مشابهت داشت که اثر فرآیند حرارت‌دهی خشک و مرطوب آرد گندم نرم بر ویژگی‌های خمیر و کیک را بررسی کردند. آنها گزارش کردند که بیشترین مقاومت خمیر مربوط به آردهای تیمار شده با حرارت خشک بود و با افزایش دما و زمان فرآیند حرارتی خشک، مقاومت خمیر کیک افزایش یافت که به دلیل کاهش محتوای رطوبتی آرد در اثر حرارت خشک و در نتیجه سفت شدن خمیر حاصل از آن می‌باشد. پورصفر و همکاران (Poursafar et al., 2011) تأثیر دما و زمان فرآیند حرارتی خشک و مرطوب آرد گندم را بر ویژگی‌های کیک اسفنجی بررسی کردند. نتایج نشان داد در کیک‌هایی که آرد آن با حرارت خشک مورد فرآوری قرار گرفت با افزایش دما و زمان فرآیند حرارتی خشک رطوبت کیک کاهش اما مقاومت خمیر افزایش یافت.

جدول ۱- پارامترهای آلوئوگرافی خمیر در نمونه‌های مختلف

Table 1- Dough Alveograph parameters in different samples

اندازه ذرات / تیمار Treatment/Particle size	G (mm) تورم Swelling	W (J) مقدار انرژی Amount of energy	P/L (mm) مقاومت/قابلیت کشش Dough resistance/Stretchability	L (mm) قابلیت کششی Stretchability	P (mm) مقاومت خمیر Dough resistance
C 180	24.2	124	0.28	119	33
DHT180	17.2	202	1.45	60	87
HMT 180	20.1	222	0.93	82	76
C 150	21.8	186	0.63	96	60
DHT 150	19.4	199	0.95	76	72
HMT 150	22.5	209	0.59	103	61
C 125	24.1	147	0.34	118	40
DHT 125	17.5	177	1.19	62	74
HMT 125	20.5	227	0.89	85	76

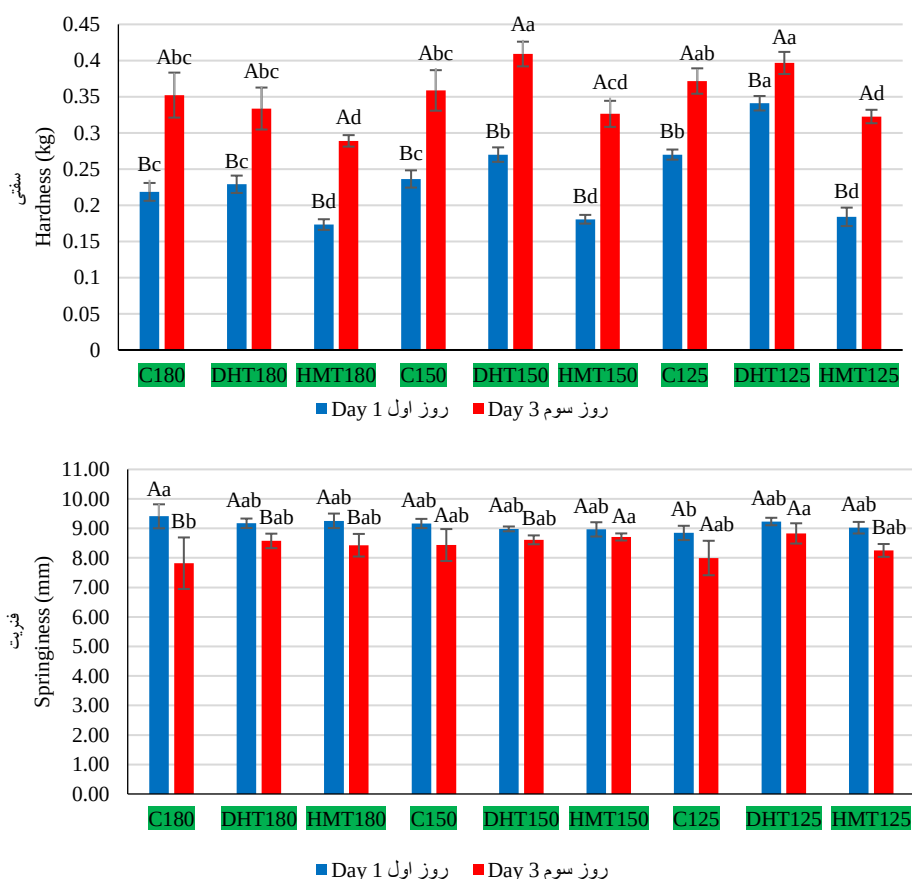
آنالیز پروفایل بافت

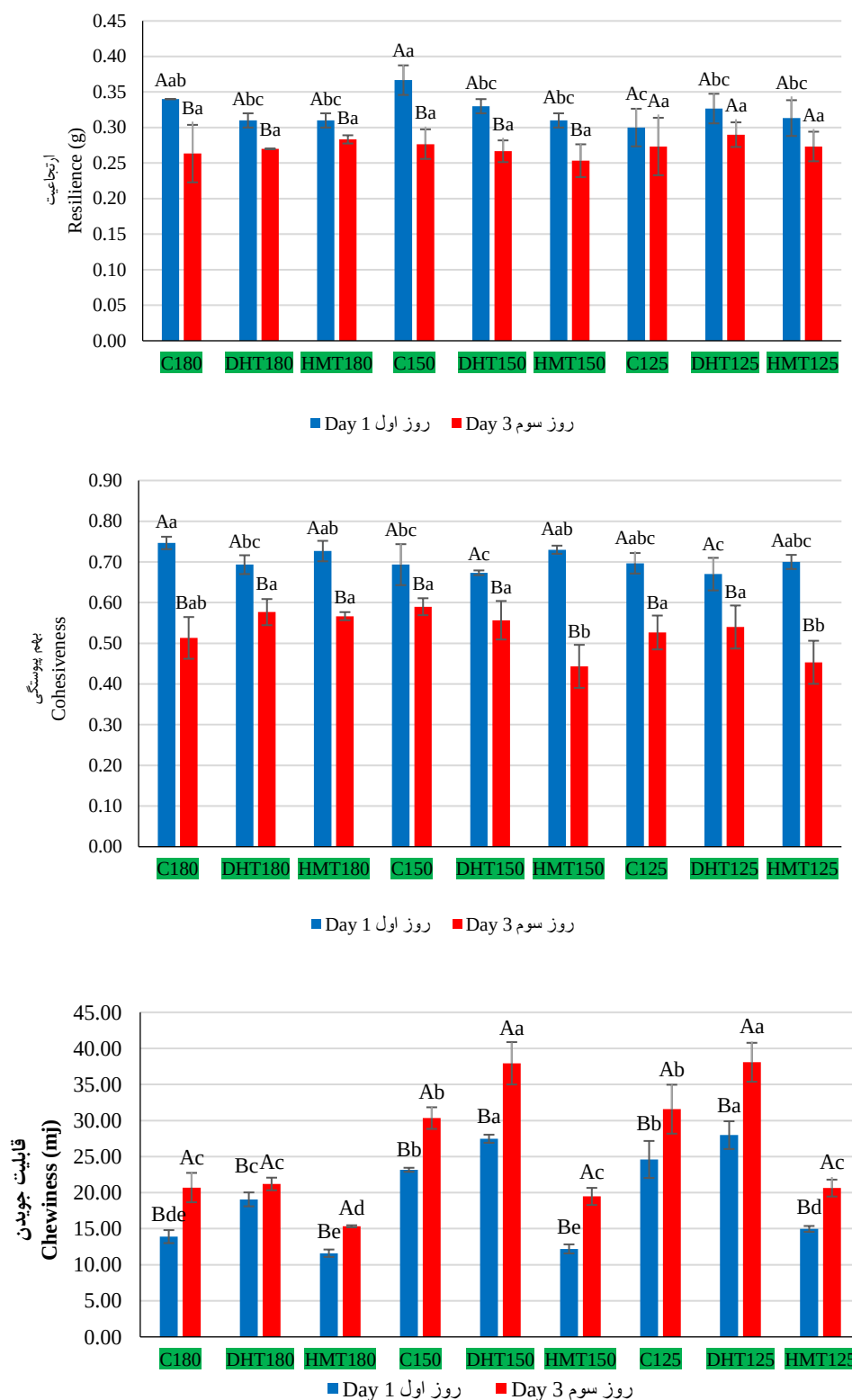
در شکل ۱ نتایج حاصل از آنالیز پروفایل بافت نمونه‌های مختلف در روز اول و سوم پس از پخت که شامل پارامترهای سفتی، فنریت، ارتجاعیت، بهم پیوستگی و قابلیت جویدن است آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در روز اول تأثیر تیمارها بر فنریت معنی دار نبود و تأثیر اندازه ذرات معنی دار بود، به طوری که نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و مرطوب نسبت به شاهد در اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون روند کاهشی داشتند و در اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون روند افزایشی داشتند. در روز سوم تأثیر تیمارهای حرارتی (خشک و مرطوب) و اندازه

ذرات بر فنریت معنی دار نبود. در روز اول تأثیر تیمارها و اندازه ذرات بر ارتجاعیت معنی دار بود، به طوری که نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و مرطوب نسبت به شاهد در اندازه ذرات ۱۸۰ و ۱۲۵ میکرون روند کاهشی داشتند و در اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون روند افزایشی داشتند. در روز سوم تأثیر تیمارها و اندازه ذرات بر ارتجاعیت معنی دار نبود ($p > 0.05$)، چون در روز سوم با گذشت زمان و ماندگاری نان‌ها رطوبت نان‌ها کمتر و کاهش یافت و در نتیجه ارتجاعیت کمتر و معنی دار نبود. در روز اول و سوم تأثیر تیمارها و اندازه ذرات بر بهم پیوستگی و سفتی و قابلیت جویدن معنی دار بود و تیمار حرارتی مرطوب نسبت به تیمار

آرد برنج بر کیفیت نان بررسی کردند. آنها گزارش کردند نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه شاهد و تیمار حرارت خشک بطور معنی‌داری کمترین سفتی و قابلیت جویدن را دارا بودند، و احتمالاً ویسکوزیته مناسب خمیر نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب با قابلیت بالا آمدن بهتر و نگهداری گاز حاصل از تخمیر ضمن افزایش حجم موجب نرم‌تر شدن نان حاصل شد. کاهش قابلیت جویدن نمونه تیمار حرارتی مرطوب (HMT 180) احتمالاً می‌تواند به دلیل تأثیر این تیمار بر کاهش سفتی و رطوبت بیشتر نان‌های حاصل باشد. کیم و همکاران (Kim *et al.*, 2017) گزارش کردند کیک حاصل از آرد برنج تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه شاهد بهم پیوستگی، قابلیت جویدن و سفتی کمتری را نشان داد. مقادیر سفتی کمتر برای نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب می‌تواند به بازآرایی ساختاری نشاسته آرد در طول تیمار حرارتی مرطوب همراه باشد.

حرارتی خشک و شاهد اختلاف معنی‌دار آماری داشت ($p < 0.05$)، بطوری‌که نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه شاهد و تیمار حرارتی خشک کمترین پیوستگی، سفتی و قابلیت جویدن را داشت. تأثیر زمان نگهداری بر پیوستگی، سفتی و قابلیت جویدن نان برای تمام نمونه‌ها معنی‌دار بود و با افزایش زمان نگهداری، پیوستگی نمونه‌ها کاهش و سفتی و قابلیت جویدن نمونه‌ها بطور معنی‌داری افزایش یافت ($p < 0.05$). بیلیدریس و همکاران (Biliaderis *et al.*, 1995) گزارش کردند سفت شدن مغز نان یکی از پارامترهای مهمی است که به‌طور کلی برای ارزیابی نرخ بیانی استفاده می‌شود. به‌طوری‌که سفت شدن مغز نان در طی دوره نگهداری می‌تواند در نتیجه پدیده واپسگرایی و کاهش رطوبت باشد. در این پژوهش کمترین میزان سفتی و قابلیت جویدن در تیمار حرارتی مرطوب مشاهده شد، که این نتایج با پژوهش هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2023) مشابهت داشت که اثر فرآیند حرارت خشک و مرطوب را در اندازه ذرات مختلف





شکل ۱- نتایج آنالیز پروفایل بافت نمونه‌های نان

Fig. 1. Results of texture profile analysis of bread samples

حروف کوچک متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها در یک روز مشخص و حروف بزرگ متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها طی ۳ روز در سطح احتمال ۵٪ است.

Different lowercase letters correspond to the comparison of samples on a specific day and different uppercase letters correspond to the comparison of samples over 3 days at the 5% probability level.

زنجیره‌های نشاسته تخریب شده و سایر مولکول‌های کوچک ایجاد شده در طول فرآیند حرارتی مرطوب ممکن است ارتباط زنجیره نشاسته را مهار کرده و مانع رتروداداسیون شود در نتیجه سفتی را کاهش دهند. بورکوا و همکاران (Bourekoua et al., 2016) در بررسی که بر تأثیر تیمار هیدروترمال ذرت و برنج در کیفیت نان انجام دادند گزارش کردند تیمار هیدروترمال منجر به بهبود کیفیت نان شد. خصوصیات بافتی نان حاصل از نمونه تیمار شده ذرت و برنج قابلیت جویدن و سفتی کمتری را نسبت به نمونه‌های شاهد نشان داد.

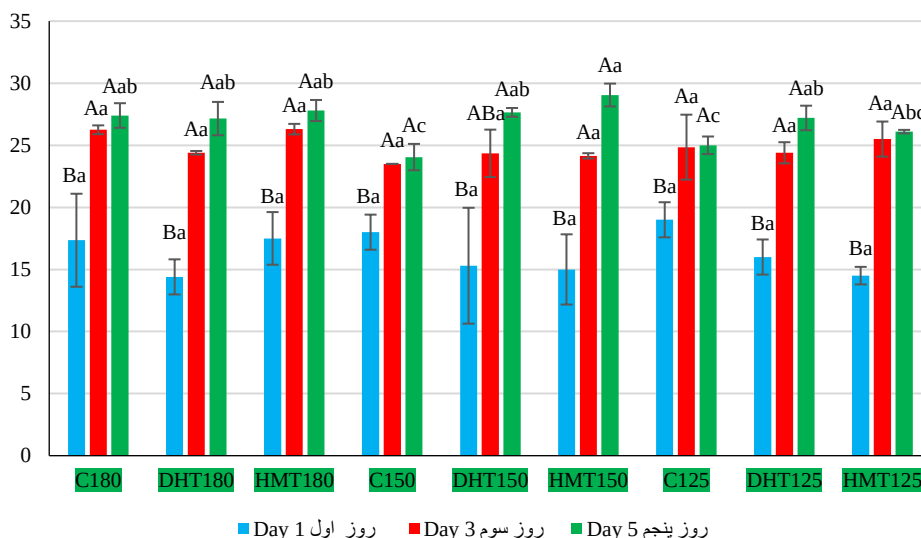
رطوبت پوسته و مغز نان

میزان رطوبت پوسته و مغز تیمارهای مختلف در مدت زمان نگهداری به ترتیب در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است. در روز اول و سوم نگهداری اختلاف معنی‌داری بین رطوبت پوسته نمونه‌های تولیدی مشاهده نگردید ($p > 0.05$). طی مدت زمان نگهداری نان‌ها رطوبت پوسته تمام نمونه‌های روز سوم و پنجم نسبت به روز اول به‌طور معنی‌داری افزایش داشتند، چون با گذشت زمان رطوبت از مغز نان به پوسته نان مهاجرت می‌کند، ولی رطوبت پوسته تمام نمونه‌های روز پنجم نسبت به روز سوم روند افزایشی را نشان دادند اما معنی‌دار نبودند. در روز پنجم نگهداری نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی خشک اختلاف معنی‌دار آماری نداشتند. نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و مرطوب نسبت به نمونه‌های شاهد به جزء در اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون اختلاف معنی‌دار افزایشی داشتند ($p < 0.05$). در روز پنجم نگهداری تأثیر اندازه ذرات بر رطوبت پوسته معنی‌دار بود و کمترین میزان رطوبت پوسته را نمونه شاهد با اندازه ذرات ۱۵۰ میکرون دارا بود. بایک و چینچوتی (Baik & Chinachoti, 2000) تغییرات در نمونه‌های نان همراه با پوسته و بدون پوسته را بررسی کردند و دریافتند که مهاجرت رطوبت از مغز نان به پوسته نان (در صورت وجود پوسته) موجب سفتی بیشتر مغز نان و افزایش رتروداداسیون آمیلوپکتین می‌شود. یافته‌ها دلالت بر این دارد که انتقال رطوبت از مغز نان به پوسته نان نقش مهمی در بیانی و بد طعمی نان پوسته دار دارد. انتقال رطوبت از مغز نان به سطح پوسته نان با گذشت زمان سبب می‌شود حالت تردی پوسته نان کاهش یابد و به حالت چرم مانند در آید (Mohammadzadeh et al., 2018). در روز سوم نگهداری نمونه‌های تیمار حرارتی خشک نسبت به نمونه‌های شاهد اختلاف معنی‌دار آماری بر رطوبت مغز نان‌ها نداشتند. نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه‌های شاهد اختلاف معنی‌دار آماری داشتند ($p < 0.05$). تأثیر اندازه ذرات اختلاف معنی‌دار آماری را نشان داد. نمونه تیمار حرارتی خشک نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب به جزء در

اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون اختلاف معنی‌دار آماری داشتند. در روز اول و پنجم نگهداری تأثیر تیمارها و اندازه ذرات بر رطوبت مغز نان‌ها معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). در روز پنجم نگهداری بیشترین میزان رطوبت مغز نان را نمونه تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون دارا بود. که علت آن می‌تواند به دلیل ظرفیت بالای حفظ رطوبت تیمار حرارتی مرطوب باشد. در طی مدت زمان نگهداری نان‌ها تمامی نمونه‌های روز سوم نسبت به روز اول روند کاهشی رطوبت مغز نان را نشان دادند ولی اختلاف معنی‌داری نداشتند. نمونه‌های روز پنجم نسبت به روز اول و سوم نیز روند کاهشی رطوبت مغز نان را نشان دادند، به‌طوری‌که نمونه‌های با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون نسبت به نمونه‌های با اندازه ذرات ۱۵۰ و ۱۲۵ میکرون اختلاف معنی‌دار آماری را نشان ندادند. به‌طور کلی تیمار حرارتی مرطوب به دلیل داشتن رطوبت بیشتر موجب بهبود روند و کاهش بیانی نان گردید. این نتایج با پژوهش هاشمی و همکاران (Hashemi et al., 2023) مطابقت داشت که اثر فرآیند حرارت خشک و مرطوب را در اندازه ذرات مختلف آرد برنج بر کیفیت نان بررسی کردند. آنها گزارش کردند بیشترین رطوبت مغز نان مربوط به نمونه تیمار حرارتی مرطوب می‌باشد. علت آن می‌تواند به دلیل ظرفیت بالای حفظ رطوبت تیمار حرارتی مرطوب باشد، پس از عملیات حرارتی مرطوب ساختار کریستالی نشاسته ممکن است به دلیل شکستن پیوندهای هیدروژنی مختل شود و در نتیجه مولکول‌های آب با پیوند هیدروژنی به گروه‌های هیدروکسیل آمیلوپکتین اتصال برقرار می‌کند که این به نوبه خود موجب افزایش جذب آب و رطوبت محصول می‌گردد. پورهاگن و همکاران (Purhagen et al., 2011) نشاسته و آرد جو به شکل تیمار شده مرطوب و تیمار نشده را میزان ۳ درصد در فرمولاسیون نان گندم بکار گرفتند. آنها متوجه شدند آرد و نشاسته تیمار شده منجر به افزایش میزان رطوبت و نگهداری بیشتر رطوبت مغز نان در طول نگهداری می‌شود.

فعالیت آبی پوسته و مغز نان

نتایج فعالیت آبی پوسته و مغز تیمارهای مختلف طی مدت زمان نگهداری به ترتیب در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. در روز اول تأثیر تیمارها و اندازه ذرات بر فعالیت آبی پوسته معنی‌داری نبود ($p > 0.05$). در روز سوم و پنجم نگهداری تأثیر تیمارهای حرارتی و اندازه ذرات بر فعالیت آبی پوسته معنی‌دار بود، به‌طوری‌که نمونه تیمار حرارتی خشک نسبت به نمونه تیمار حرارتی مرطوب و شاهد در اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون اختلاف معنی‌دار افزایشی داشت.

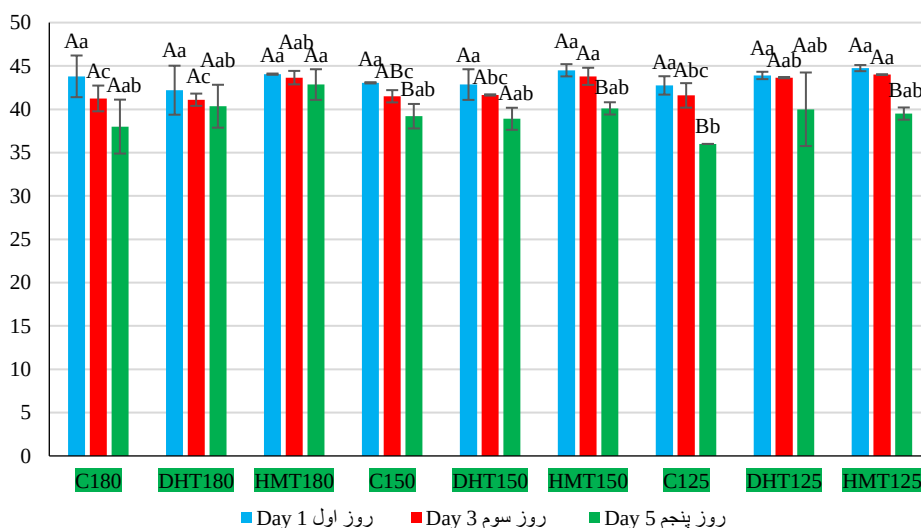


شکل ۲- میزان رطوبت پوسته نانهای متفاوت در طی نگهداری

حروف کوچک متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها در یک روز مشخص و حروف بزرگ متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها طی ۵ روز در سطح احتمال ۵٪ است.

Fig. 2. Moisture content of different bread crusts during storage

Different lowercase letters correspond to the comparison of samples on a specific day and different uppercase letters correspond to the comparison of samples over 5 days at the 5% probability level.



شکل ۳- میزان رطوبت مغز نانهای متفاوت در طی نگهداری

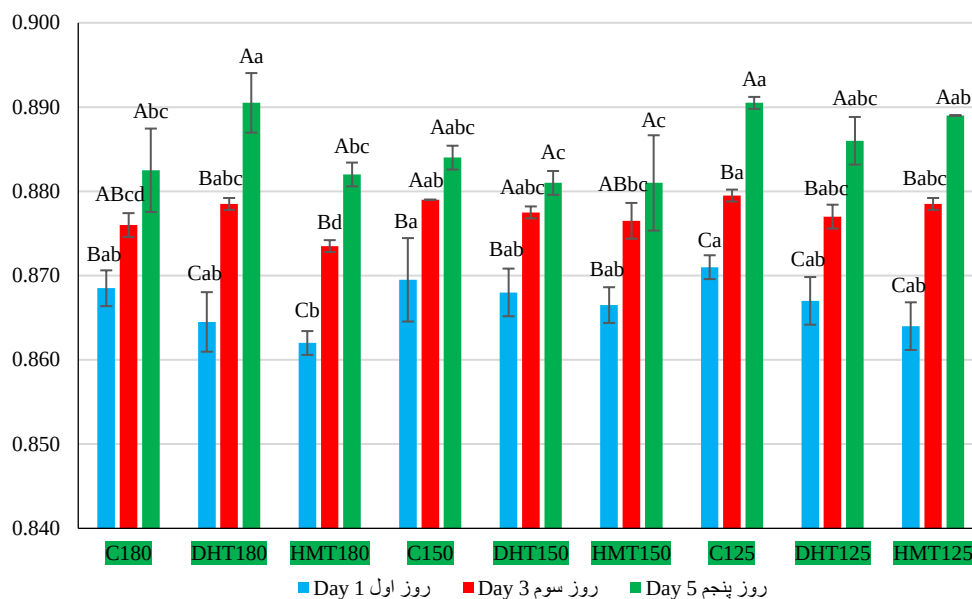
حروف کوچک متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها در یک روز مشخص و حروف بزرگ متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها طی ۵ روز در سطح احتمال ۵٪ است.

Fig. 3. The moisture content of different bread crumbs during storage

Different lowercase letters correspond to the comparison of samples on a specific day and different uppercase letters correspond to the comparison of samples over 5 days at the 5% probability level.

نان‌ها به علت مهاجرت آب از مغز مرطوب به لایه‌های خشک پوسته است. در طی مدت زمان نگهداری نان‌ها فعالیت آبی پوسته تمام نمونه‌های روز پنجم و سوم نسبت به روز اول به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، چون رطوبت از مغز نان به پوسته نان مهاجرت کرده است. در روز اول و سوم و پنجم نگهداری تأثیر اندازه ذرات و تیمارها بر فعالیت آبی مغز معنی‌دار بود ($p < 0.05$).

در روز پنجم نگهداری نمونه شاهد با کاهش اندازه ذرات سبب افزایش فعالیت آبی پوسته شدند به‌طوری‌که نمونه شاهد با اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون بیشترین میزان فعالیت آبی را داشت. که علت آن این است که ذرات ریزتر جذب سطحی آب بیشتری دارند و آب بیشتری را جذب می‌کنند و محتوای آبی افزایش می‌یابد. پورهاگان و همکاران (Purhagen et al., 2011) عنوان کردند افزایش محتوای آبی پوسته

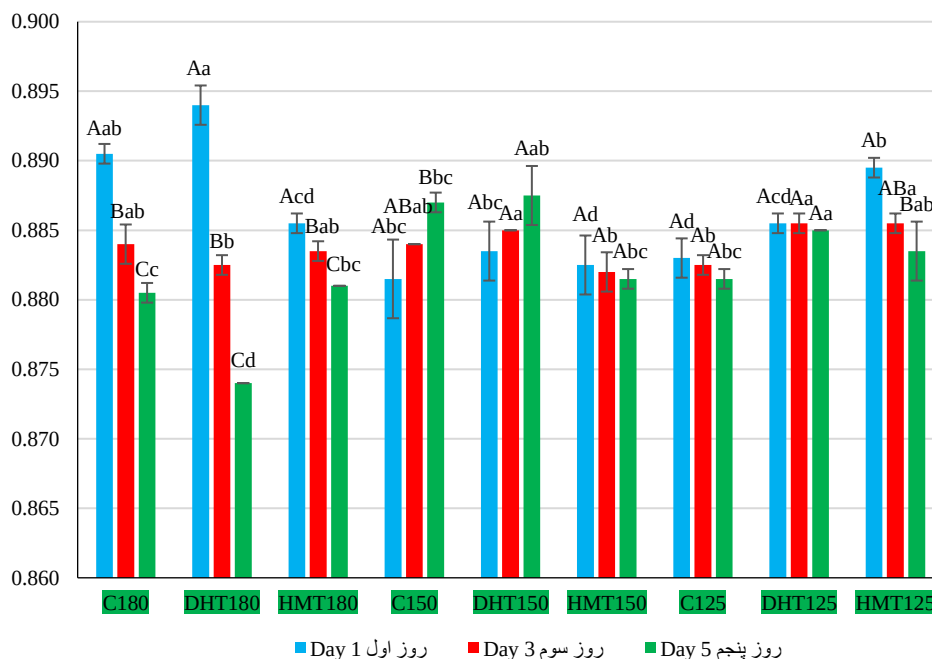


شکل ۴- فعالیت آبی پوسته نان‌های متفاوت در طی روزهای نگهداری

حروف کوچک متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها در یک روز مشخص و حروف بزرگ متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها طی ۵ روز در سطح احتمال ۵٪ است.

Fig. 4. Water activity of different bread crusts during storage

Different lowercase letters correspond to the comparison of samples on a specific day and different uppercase letters correspond to the comparison of samples over 5 days at the 5% probability level.



شکل ۵- فعالیت آبی مغز نان‌های متفاوت در طی نگهداری

حروف کوچک متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها در یک روز مشخص و حروف بزرگ متفاوت مربوط به مقایسه نمونه‌ها طی ۵ روز در سطح احتمال ۵٪ است.

Fig. 5. Water activity of different bread crumbs of during storage

Different lowercase letters correspond to the comparison of samples on a specific day and different uppercase letters correspond to the comparison of samples over 5 days at the 5% probability level.

در روز پنجم نگهداری نمونه تیمار حرارتی خشک نسبت به شاهد به جزء در اندازه ذرات ۱۵۰ میکرون اختلاف معنی‌دار آماری دارد و بیشترین میزان فعالیت آبی مغز نان مربوط به نمونه تیمار حرارتی خشک با اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون می‌باشد. نتایج نشان داد طی مدت زمان نگهداری نان‌ها فعالیت آبی مغز نمونه‌ها بطور معنی‌داری در اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون کاهش یافت. این نتایج با پژوهش رایوال و همکاران (Raioal et al., 2020) مشابهت داشت که گزارش کردند تیمار حرارتی خشک آرد گندم دوروم در دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۳۰ دقیقه به طور معنی‌داری سبب افزایش میزان فعالیت آبی مغز نان حاصل نسبت به نمونه شاهد شد.

آنالیز حرارتی روبشی تفاضلی

نتایج حاصل از آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی برای تیمارهای مختلف طی روزهای اول، سوم و پنجم نگهداری در جدول ۲ آورده شده است. آنتالپی رتروگراداسیون همه نمونه‌های نان طی روزهای مختلف نگهداری روندی افزایشی داشت. بطور کلی در طول مدت زمان نگهداری همه نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و نمونه‌های شاهد از آنتالپی کمتری برخوردار

بودند. تمام نمونه‌های حاصل از تیمار حرارتی خشک در روز اول و سوم و پنجم نگهداری میزان آنتالپی بیشتری را نسبت به نمونه‌های شاهد نشان دادند. تغییر در اندازه ذرات منجر به تغییر در میزان آنتالپی نمونه‌ها شد، بطوری‌که نمونه با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون کمترین مقدار آنتالپی را در تمام روزهای نگهداری به خود اختصاص داد. نمونه تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون کمترین میزان آنتالپی را در بین نمونه‌ها در روز اول پخت و در طول مدت زمان نگهداری به خود اختصاص داد که در بهبود روند بیاتی نان مؤثرتر بود و علت آن ممکن است به دلیل ژلاتینه شدن جزئی مولکول‌های آمیلوپکتین و آمیلوز باشد که در طول حرارت دادن پایداری کمتر دارند. این نتایج با پژوهش هاشمی و همکاران (Hashemi et al., 2023) مشابهت داشت، آنها دریافتند نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب آرد برنج نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و شاهد کمترین میزان آنتالپی را در بین نمونه‌ها در طی مدت نگهداری پنج روز به خود اختصاص داد، که کمتر بودن میزان آنتالپی نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب به ویژگی‌های کیفی آرد تیمار حرارتی مرطوب مرتبط است و علت آن ممکن است به دلیل ژلاتینه شدن جزئی مولکول‌های آمیلوپکتین باشد که در طول حرارت دادن پایداری کمتر دارند.

جدول ۲- پارامترهای رتروگراداسیون نان‌ها در روزهای اول، سوم و پنجم نگهداری

Table 2- Retrogradation parameters of breads on day 1, 3 and 5 of storage

نان‌ها Breads	روزهای نگهداری Storage time (days)	دمای شروع Starting temperature	دمای پیک Peak temperature	دمای نهایی Final temperature	آنتالپی Enthalpy HΔ
C 180	1	20.1	78.3	111.2	212.82
	3	21	85.5	125.8	271.38
	5	21.4	77.3	126.9	311.64
DHT 180	1	23.3	81.5	119.5	236.52
	3	21.3	83.1	126.6	279
	5	22	77.2	125.9	341.1
HMT 180	1	22	81.9	120.1	198.66
	3	22.4	88	129.8	252.12
	5	21.6	80.9	125.1	304.5
C 150	1	20	82	117.9	216.18
	3	20.2	82.3	127.3	278.04
	5	22.8	78.9	125.2	322.86
DHT 150	1	22.1	82.3	122.8	252.06
	3	20.9	74.4	117.4	288
	5	21.7	76.3	123.7	343.2
HMT 150	1	23.3	84.9	121.8	200.7
	3	21.3	75.1	123.9	258.24
	5	21.2	74.3	128.1	307.26
C 125	1	25.4	82.8	123.1	222.72
	3	20.4	82.6	129.3	278.16
	5	21.2	70.7	125.7	326.4
DHT 125	1	25	82.7	120.5	252.18
	3	23.5	82.5	128.8	295.38
	5	20.7	73.4	124.5	395.52
HMT 125	1	23.5	79.3	118.7	202.2
	3	22.7	72.8	124.2	262.92
	5	21	71	136.7	309.24

نتایج آنالیز بافت نشان داد نمونه‌های حاصل از تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون بطور معنی‌داری منجر به کاهش سفتی و قابلیت جویدن در روز اول و سوم نسبت به نمونه شاهد و تیمار حرارت خشک شد. به‌طور کلی در مجموع ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، بکارگیری آرد حاصل از تیمار حرارتی مرطوب و آرد با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون منجر به بهبود ویژگی رئولوژی خمیر و بیاتی نان شد.

میزان مشارکت نویسندگان

محمد فضلی راد: تحقیق و بررسی، مدیریت داده‌ها، نرم‌افزار، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، **جعفر محمدزاده میلانی:** مفهوم‌سازی، تأمین مالی، مدیریت پروژه، منابع، نظارت، نوشتن - بررسی و ویرایش، **سپیده حقیقت خرازی:** نظارت، نوشتن - بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این تحقیق در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد توسط دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری از حمایت مالی برخوردار گردید.

هورمدوک و همکاران (Hormdok et al., 2007) دریافتند کمتر بودن میزان آنتالپی نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب به دلیل تخریب و اختلال در زنجیره‌های نشاسته و تشکیل سایر مولکول‌های کوچک ممکن است ارتباط زنجیره نشاسته را مهار کرده و مانع رتروداداسیون و در نتیجه کاهش آنتالپی و بیاتی نان شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد رئولوژی خمیر تحت تأثیر اندازه ذرات و تیمار حرارتی قرار گرفت. نمونه تیمار حرارتی خشک با اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون رفتار رئولوژی بهتری را نشان داد. نتایج حاصل از ارزیابی‌های انجام شده مربوط به آزمون‌های بیاتی نان نشان داد در طول زمان نگهداری نمونه حاصل از اندازه ذرات ۱۸۰ میکرون و تیمار حرارتی مرطوب به دلیل میزان آنتالپی رتروداداسیون کمتر و همچنین ظرفیت بالای حفظ رطوبت مغز منجر به بهبود روند بیاتی نان شدند. تأثیر اندازه ذرات و تیمار حرارتی خشک و مرطوب بر میزان فعالیت آبی پوسته و مغز معنی‌دار بود، و نمونه تیمار حرارتی خشک بطور معنی‌داری بیشترین فعالیت آبی مغز را به خود اختصاص داد. بررسی

References

1. AACC. (2000). American Association of cereal chemists. Approved methods of the AACC, 10th ed. American Association of cereal chemists, St Paul, USA. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(01\)00358-7](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(01)00358-7)
2. Biliaderis, C.G., Izydorczyk, M.S., & Rattan, O. (1995). Effect of arabinoxylans on bread-making quality of wheat flours. *Food Chemistry*, 53(2), 165-171. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)90783-4](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)90783-4)
3. Baik, M.Y., & Chinachoti, P. (2000). Moisture distribution and phase transitions during bread staling. *Cereal Chemistry*, 77, 484-488. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.4.484>
4. Besbes, E., Le Bail, A., & Seetharaman, K. (2015). Impact of local hydrothermal treatment during bread baking on soluble amylose, firmness, amylopectin retrogradation and water mobility during bread staling. *Journal of Food Science and Technology*, 304-314. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1992-z>
5. Bucsella, B., Takács, A., Vizer, V., Schwendener, U., & Tömösközi, S. (2016). Comparison of the effects of different heat treatment processes on rheological properties of cake and bread wheat flours. *Food Chemistry*, 190, 990-996. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.073>
6. Bourekoua, H., Benatallah, L., Zidoune, M.N., & Rosell, C.M. (2016). Developing gluten free bakery improvers by hydrothermal treatment of rice and corn flours. *LWT*, 73, 342-350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.032>
7. Chakraborty, I., Mal, S.S., Paul, U.C., Rahman, M., & Mazumder, N. (2022). An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>
8. Farheen, D., Jyothi Lakshmi, A., Prakash, J., & Indrani, D. (2012). Effect of ingredients on rheological, nutritional and quality characteristics of high protein, high fibre and low carbohydrate bread. *Food Bioprocess Technology*, 5, 2998-3006. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0752-y>
9. Hormdok, R., & Noomhorm, A. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. *LWT*, 40(10), 1723-1731. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.12.017>
10. Hashemi, A., Milani, J., Motamedzadehgan, A., & Haghighat, S. (2023). The effect of hydrothermal process and dry heat on different particle sizes of waxy rice flour on the quality of gluten free bread. Master thesis of food industry, faculty of agricultural engineering, Sari University of agricultural sciences and natural resources.
11. Iran institute of standards and industrial research, national standards, standards no 11545.
12. Iran institute of standards and industrial research, national standards, standards no 9639-1,3.
13. Ji, Y., Zhu, K., Qian, H., & Zhou, H. (2007). Staling of cake prepared from rice flour and sticky rice flour. *Food Chemistry*, 104(1), 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.10.072>

14. Kim, M.J., Oh, S.G., & Chung, H.J. (2017). Impact of heat-moisture treatment applied to brown rice flour on the quality and digestibility characteristics of Korean rice cake. *Food Science and Biotechnology*, 26(6), 1579-1586. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0151-x>
15. Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C.G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79, 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032>
16. Lin, S., Gao, J., Jin, X., Wang, Y., Dong, Z., Ying, J., & Zhou, W. (2020). Whole-wheat flour particle size influences dough properties bread structure and in vitro starch digestibility. *Food & Function*, 11(4), 3610-3620. <https://doi.org/10.1039/c9fo02587a>
17. Mohammadzadeh Milani, J., & Masoomian, Z. (2018). *The effect of dry and wet heating of potato starch on texture and stale characteristics of sponge cake*. The third international congress and the 26th national congress of Iranian foods sciences and industries.
18. Neill, G., Almuhtaseb, A.H., & Magee, T.R.A. (2012). Optimization of time temperature treatment, for heat treated soft wheat flour. *Journal of Food Engineering*, 113, 422-426. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.019>
19. Purhagen, J.K., Sjo, M.E., & Eliasson, A.C. (2011). The use of normal and heat-treated barley flour and waxy barley starch as antistaling agents in laboratory and industrial baking processes. *Journal of Food Engineering*, 104, 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.004>
20. Poursafar, L., Paighambardest, H., Alizadeh, L., Shekoui, A., & Rafat, A. (2011). Effect of temperature and time of wheat flour heating process on quality characteristics of sponge cake. *Food Processing and Preservation Journal*, 2(4), 87-104.
21. Payan, R. (2013). *An introduction to the technology of cereal products*. 4th edition, Aizh publishing house, Tehran, Iran.
22. Paighambardest, H., Poursafar, L., & Azadmard Demirci, P. (2014). The effect of dry and wet heating process of soft wheat flour on dough characteristics and cake quality. *Journal of Food Industry Research*, 25(1).
23. Pang, J., Guan, E., Yang, Y., Li, M., & Bian, K. (2021). Effects of wheat flour particle size on flour physicochemical properties and steamed bread quality. *Food Science & Nutrition*, 9(9), 4691-4700. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2008>
24. Rosa Zavareze, E., & Dias, A.R.G. (2011). Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.064>
25. Raiola, A., Romano, A., Shanakhath, H., Masi, P., & Cavella, S. (2020). Impact of heat treatments on technological performance of re-milled semolina dough and bread. *LWT*, 117, 108607. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108607>
26. Shittu, T.A., Dixon, A., Awonorin, S.O., Sanni, L.O., & Maziya-Dixon, B. (2008). Bread from composite cassava-wheat flour. II: Effect of cassava genotype and nitrogen fertilizer on bread quality. *Food Research International*, 41(6), 569-578. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.008>
27. Sudha, M.L., Soumya, C., & Prabhasankar, P. (2016). Use of dry-moist heat effects to improve the functionality immunogenicity of whole wheat flour and its application in bread making. *Journal of Cereal Science*, 69, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.010>
28. Shanmugavel, V., Komala Santhi, K., Kurup, A.H., Kumar Kalakandan, S., Anandharaj, A., & Rawson. (2019). Potassium bromate: effects on bread components, health, environment and method of analysis: a review. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125964>

Nano-encapsulation of Red Beetroot Extract Based on Betalain Using of Complex Coacervation in Gummy Candies

A. Ghorchi¹, A. Arianfar^{1*}, V. Hakimzadeh¹, S. Naji-Tabasi²

1- Department of Food Science and Technology, Qu.C, Islamic Azad University, Quchan, Iran

(* - Corresponding Author Email: ak.arianfar@iau.ac.ir)

2- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), POBox: 91895-157.356, Mashhad, Iran

Received: 22.06.2024

Revised: 15.10.2024

Accepted: 29.10.2024

Available Online: 23.04.2025

How to cite this article:

Ghorchi, A., Arianfar A., Hakimzadeh, V., & Naji-Tabasi, S. (2025). Nano-encapsulation of red beetroot extract based on betalain using of complex coacervation in gummy candies. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(2), 147-164. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.88135.1333>

Introduction

Red beet has nutritional and health-promoting properties due to containing bioactive compounds such as phenolic compounds and betanin. Co-encapsulation of more than one core material in a single encapsulation system may increase the bioactivity of individual components. Customer attitudes and behaviors have moved towards health foods because they have more concerns on increasing environmental stresses such as pollution and toxic substances in the environment. Confectionery products are not exactly foods, but they are widely consumed by children and adults. Traditional gummy confection consists of high amounts of synthetic colorings or flavorings in a gelling agent, commonly known as gelatin, along with acids and sweeteners. Natural color in the form of pigments is synthesized and accumulated in living biological cells of algae, vertebrates, invertebrates, fungi, lichens, or bacteria. The red color in food industry comes mainly from two pigments: anthocyanin and betalains. Among the major groups of natural pigments, betalains can be considered as the least studied, due to its limited sources. The main commercially produced crop containing betalain is red beet root, however many researchers are exploring red dragon fruit or pitaya as a viable alternative. Betalains, derived from beetroot are water-soluble nitrogenous pigments that stop or delay the oxidation process and exhibit anti-tumor and antiatherosclerotic effects. The application of red color from beetroot (mainly betalains) is permitted widely in ice cream, sherbet, yogurt, powdered soft drink mix along with confectionaries, soups, and bacon products. The stability of betalains varies with different levels of water activity, temperatures, exposure to oxygen, and light. Complex coacervation is one of the oldest and simplest techniques of encapsulating bioactive compounds for delivery in controlled manner. The technique associates simple preparation conditions, such as non-toxic solvent and low agitation, the techniques has also been employed in the encapsulation of protein and human cells. Microcapsules prepared by complex coacervation are water-insoluble, possessing excellent controlled-release characteristics. Complex coacervation is a technique by which phase separation occurs when oppositely charged polyelectrolytes are electrically balanced in aqueous media. This depends on relatively a set of conditions such as pH, charge density on the polymers, colloid concentration, ionic strength of the medium, temperature, etc. However, all polyelectrolytes do not exhibit this phenomenon.

Materials and Methods

The features of water activity, moisture, acidity, Brix, antioxidant activity, texture characteristics, colorimetry and sensory evaluation of pastilles were investigated. All analyzes were performed with three replications in a completely randomized design. Means were compared using Duncan's multi-range test at a significant level of 5% with SPSS version 22 software.



©2025 The author(s). 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.2024.88135.1333>

Results and Discussion

The results showed that water activity of samples containing nanomicrocoating of red beet extract was significantly lower than the control sample ($p<0.05$), but the moisture, acidity and brix of the sample containing nanomicrocoating of red beet extract were significantly higher from the control ($p<0.05$). During the storage period of 28 days, it showed that the sample containing 1.5% red beetroot extract's nano-coating had a significantly higher stability of the antioxidant property than other samples ($p<0.05$). The results of the histological test showed that the sample containing the red beet extract nano-coating had a significant decrease in hardness, stickiness and chewability compared to the control ($p<0.05$), but the degree of cohesion showed a significant increase ($p<0.05$). Examining the color parameters of the samples containing red beetroot extract nano-coating compared to the control sample also showed that it caused a decrease in brightness (L^*) and yellowness (b^*) and an increase in (a^*).

Conclusion

The results of the sensory evaluation showed that the sample containing 1% red beetroot extract nano-coating was awarded the highest score compared to the control.

Keywords: Antioxidant, Complex coacervation, Gummy candy, Red beetroot, Texture analyzer

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۶۵-۱۷۸

ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر پایه بتالائین با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب در پاستیل

عاطفه قورچی^۱ - اکرم آریان‌فر^{۱*} - وحید حکیم‌زاده^۱ - سارا ناجی طبسی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

چکیده

چغندر قرمز به دلیل داشتن ترکیبات زیست‌فعال مثل ترکیبات فنلی و بتانین دارای خواص تغذیه‌ای و سلامتی‌بخش می‌باشد. ریزپوشانی توأم چند ترکیب در یک ماتریکس، باعث افزایش فعالیت زیستی آنها نسبت به حالتی می‌شود که تک‌تک ریزپوشانی شوند. هدف از انجام این پژوهش، ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر پایه بتالائین با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب بر روی ویژگی‌های فعالیت آبی، رطوبت، اسیدیته و بریکس فعالیت آنتی اکسیدانی، ویژگی‌های بافت، رنگ‌سنجی و ارزیابی حسی پاستیل مورد بررسی قرار گرفت. تمامی آنالیزها با سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌دار ۵ درصد با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. نتایج نشان داد که، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان فعالیت آب به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$) اما میزان رطوبت، اسیدیته و بریکس نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد بود ($p < 0.05$). در طول مدت نگهداری ۲۸ روز نشان داد، نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد میزان پایداری خاصیت آنتی‌اکسیدانی به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر نمونه‌ها است ($p < 0.05$). نتایج آزمون بافت‌سنجی نشان داد، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز نسبت به نمونه شاهد میزان سختی، چسبندگی و قابلیت جویدن کاهش معنی‌داری دارد ($p < 0.05$) اما میزان پیوستگی افزایش معنی‌داری نشان داد ($p < 0.05$). بررسی پارامترهای رنگی نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز نسبت به نمونه شاهد نیز نشان داد که باعث کاهش روشنایی (L^*) و زردی (b^*) و افزایش (a^*) شده است. نتایج حاصل از ارزیابی حسی نشان داد که نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد بیشترین امتیاز نسبت به نمونه شاهد تعلق گرفت.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، بافت‌سنجی، توده‌ای‌سازی مرکب، پاستیل، چغندر قرمز

مقدمه

چغندر قرمز منبع خوبی برای پیگمان‌های قرمز بوده و به‌طور فزاینده‌ای برای تولید رنگ قرمز غذایی استفاده می‌شود. پیگمان‌های قرمز و زرد چغندر در مجموع تحت عنوان بتالائین شناخته شده و

شامل بتاسیانین‌های قرمز و بتاگزانتین‌های زرد می‌باشند. پیگمان‌های چغندر قرمز تحت عنوان بتالائین به خوبی در آب حل می‌شوند و در الکل نامحلول هستند. پیگمان اصلی در چغندر قرمز بتالائین و به صورت گلوکوسیدبتانیدین است که وزن مولکولی آن ۵۵۰/۴۸ گرم بر مول می‌باشد (Neelwarne & Rudrappa, 2013). بتاسیانین عمده و اصلی چغندر قرمز، بتانین بوده که ۷۵ تا ۹۵ درصد از کل پیگمان‌های چغندر را تشکیل می‌دهد. پیگمان‌های باقی‌مانده شامل ایزوبتالین، پربتینین و ایزوپربتینین می‌باشد (Azeredo, 2009). براین اساس، به دلیل غنی بودن چغندر قرمز از رنگدانه‌های طبیعی و به‌ویژه بتالائین‌ها، فراوانی آن در کشورمان و در دسترس بودن این

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

۲- گروه نانو فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

گیاه، فواید ویژه برای سلامت انسان، و نیز مقرون به صرفه بودن آن، این گیاه از پتانسیل بسیار بالایی برای استفاده به عنوان منبع بتالائین و افزودنی رنگی طبیعی در فرمولاسیون غذایی، دارویی و بهداشتی برخوردار است. اما مهمترین چالش در استفاده از رنگ‌های طبیعی خوراکی، عدم پایداری آنها در مراحل مختلف تولید و نگهداری محصولات می‌باشد (Yousefi, 2018).

از جمله فرآورده‌های جدید میوه‌ها، پاستیل میوه‌ای است که ضمن بالا بودن ارزش تغذیه‌ای به دلیل کاهش فعالیت آب، زمان ماندگاری بالایی دارد و جایگزین پاستیل‌های رایج در بازار که حاوی ژلاتین، اسید، رنگ، اسانس و سایر افزودنی‌های مصنوعی هستند، گردد (Fathi, 1992). پاستیل میوه‌ای فرآورده‌ای است که پایه اصلی آن پوره میوه، هیدروکلوئیدها و ترکیبات شیرین‌کننده می‌باشد. این فرآورده را می‌توان از میوه‌های مازاد بر مصرف نیز تهیه نمود. تولید چنین فرآورده‌ای در مقیاس تجاری علاوه بر جلوگیری از ضایعات میوه به دلیل طبیعی بودن و ارزش غذایی بالا به‌ویژه از نظر میزان مواد معدنی، ویتامین‌ها و فیبر، زمان ماندگاری بالا، طعم مطلوب، می‌تواند مورد توجه قشر وسیعی از جامعه قرار گیرد (Fathi, 1992). هیدروکلوئیدها در فرمولاسیون تنقالات میوه‌ای برای ایجاد بافت جدید، افزایش پایداری به دلیل قابلیت نگهداری آب، بهبود بافت، تأثیر بر رهاسازی طعم و سایر ویژگی‌های ساختاری و حسی در فرآورده مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Goldfield & Epstein, 2002).

تکنولوژی ریزپوشانی در صنایع غذایی توجه زیادی را به خود جلب کرده است چراکه می‌تواند نیازهای سلامتی و امنیت مصرف‌کنندگان را مرتفع سازد (Pai et al., 2015). این تکنولوژی فرآیندی است که در آن یک ماده با ماهیت جامد، مایع و یا گاز توسط از فواید - یک فیلم یا ماده پلیمری احاطه می‌شود (Bakry et al., 2016). از فواید ریزپوشانی می‌توان به کنترل آزاد شدن طعم و بو، محافظت از ترکیبات فعال و حساس، بهبود پایداری و افزایش عمر ماندگاری اشاره نمود (Li et al., 2015). به علاوه روغن‌های مایع در صورتی که ریزپوشانی شوند می‌توانند به مواد جامد اضافه شوند که در این حالت تولید، استفاده، نگهداری و انتقال آنها به ماده غذایی راحت‌تر است (Sagalowicz & Leser, 2010).

توده‌ای شدن یا کواسرواسیون، فرآیند تغییر ماکرومولکول‌ها (فاز توده‌ای شونده) با خصوصیات فیلمی از حالت حلال‌پوشی شده در یک فاز حد واسط، به حالتی که در آن یک فیلم اطراف هر ذره تشکیل می‌شود و سپس حالت نهایی که در آن، این فیلم جامد یا سفت می‌شود (Speiser, 1976). فرآیند توده‌ای شدن برخی معایب را دارا است. این فرآیند بسیار گران بوده و نسبتاً پیچیده است. همچنین

بهینه‌سازی غلظت ماده دیواره در فرآیند امولسیه کردن و توده‌ای کردن دشوار است چون غلظت مورد نیاز برای به‌دست آوردن امولسیون ریز ممکن است متفاوت از آنچه که برای افزایش بازده میکروکپسول‌ها مورد نیاز است، باشد (Azadmard Dimerchi & Emami, 2012). یکی از فاکتورهای مهم در تولید ریزکپسول‌ها انتخاب ماده دیواره است. پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها دو ترکیب اصلی مورد استفاده در دیواره ریزکپسول‌ها هستند. از جمله ترکیبات پلی‌ساکاریدی که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند صمغ‌های ترش‌حی هستند. صمغ‌های ترش‌حی در زمره ابتدایی‌ترین صمغ‌ها به شمار می‌روند. زیرا همیشه در دسترس بشر بودند و به آسانی از درختان یا بوته‌ها برداشت می‌شدند. این صمغ‌ها بیوپلیمرهایی با وزن مولکولی بالا هستند که در مقادیر کم در فرمولاسیون مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ghasempour et al., 2012). از جمله صمغ بومی ایران می‌توان به صمغ دانه شاهی اشاره نمود.

گیاه شاهی^۱ با نام علمی *Lepidium sativum*^۲، از خانواده کروسیفرا^۳ بوده و در انگلیسی عموماً تحت عنوان "شاهی باغی"^۴ نامیده می‌شود. شاهی یک گیاه کوچک، علفی و بدون کرک یکساله و به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است. هنگامی که دانه‌ها در آب خیس‌انده می‌شوند، به سرعت آب را جذب می‌کنند و مایع چسبناک و بی‌مزه‌ای را تولید می‌کنند. مشخص شده است که دانه‌ها حاوی مقدار بسیار زیادی ترکیبات موسیلاژی هستند (Karazhiyan, 2010).

ژلاتین یک ماده پروتئینی کلوئیدی و قدیمی‌ترین ماکرومولکولی است که از هیدرولیز کلاژن موجود در پوست، استخوان و بافت پیوندی حیوانات از جمله دام، طیور و آبزیان به‌دست می‌آید (Kazemi Deliri, 1994). ژلاتین حاوی ۹۰-۸۴ درصد پروتئین و ۱-۲ درصد نمک‌های معدنی می‌باشد و بقیه آن را آب تشکیل می‌دهد. ژلاتین فاقد هر گونه ماده نگهدارنده یا افزودنی‌های دیگر است، همچنین فاقد چربی، کلسترول و پورین‌ها (ترکیبات اسید اوریک) می‌باشد (Ward & Courts, 1977). فت‌حی آچاپلونی و همکاران (Fathi-Achachlouei et al., 2018) رویکرد جدیدی در جهت درون پوشانی آنتوسیانین تمشک وحشی با روش کواسرواسیون با ژلاتین و صمغ عربی انجام دادند. فرآیند کواسرواسیون به‌عنوان تابعی از غلظت ژلاتین، صمغ عربی، ماده هسته در نسبت‌های ۱:۱، ۱:۵ و ۱:۱۰ غلظت‌های محلول پلیمر ۵ و ۷/۵ وزنی/حجمی و pH (۴، ۵، ۵/۳ و ۵/۴) مورفولوژی و اندازه ذرات، رطوبت، انحلال‌پذیری، هیگروسکوپ، ظرفیت بارگیری، پایداری و اسپکتروسکوپی فروسرخ

1- Cress seed
2- *Lepidium sativum*
3- Cruciferea
4- Garden cress

مقطر به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی (مدل Heidolph، ساخت کشور آلمان) مخلوط گردید و سپس به مدت ۲۰ دقیقه بدون اعمال حرارت در حمام اولتراسونیک (مدل Parsonic 30s، ساخت کشور ایران) با فرکانس ۲۸ کیلو هرتز قرار گرفت. عصاره بتانینی به دست آمده با کاغذ صافی واتمن و پمپ خلا (مدل Milipore، ساخت کشور فرانسه) صاف گردید و سپس به مدت ۱۵ دقیقه با ۷۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ (مدل PIT320، ساخت کشور ایران) شد (Vulic et al., 2012).

ریزپوشانی به روش توده‌ای‌سازی مرکب و خشک

کردن انجمادی

ابتدا امولسیون (w/o) با استفاده از محلول عصاره چغندر قرمز (۳۰ درصد وزنی/حجمی) و روغن سویا نسبت ۲:۱ همراه با ۳ درصد امولسیفایر لیپوفیلیک پلی‌گلیسرول پلی ریسپنولئات ۴۱۵۰ تشکیل شد. امولسیون اولیه (w/o) با افزودن محلول‌های ژلاتین حاوی ۱ درصد تئوین ۸۰ به عنوان امولسیفایر هیدروفیل امولسیفیه شد تا امولسیون w/o/w به دست آید. امولسیون‌ها (ساده و دوگانه) به ترتیب در rpm ۱۲۵۰۰ به مدت ۴ دقیقه و rpm ۱۰۰۰۰ به مدت ۴ دقیقه در اولتراتوراکس به دست آیند. پایداری هر دو با مشاهدات چشمی و میکروسکوپ نوری ارزیابی شد. در ادامه محلول صمغ شاهی به امولسیون دوگانه در ۴۰ درجه سانتی‌گراد با همزن مغناطیسی به آرامی اضافه شد. سپس تنظیم pH تا ۴ با محلول اسید کلریدریک ۱ مولار در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به کمک همزن مغناطیسی انجام شد به تدریج دما تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داده شد. ماده کپسوله شده در ۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت جهت تسریع در جداسدن دو فاز نگه داشته شده سپس با خشک کردن انجمادی خشک گردد. فرمولاسیون میکروکپسول با غلظت معین عوامل درون‌پوشانی صمغ شاهی (در غلظت ۰/۴ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) ژلاتین به میزان ۵ گرم و ماده‌ی هسته (امولسیون اولیه تهیه شده با چغندر قرمز) به میزان ۱۰ گرم به عنوان تابعی از جرم کل پلیمر به دست آیند (Fathi-Achachlouei et al., 2018).

تولید پاستیل

جهت تولید پاستیل، ابتدا شکر در آب مقطر تحت اعمال حرارت حل شده و سپس شربت گلوکز نیز به آن اضافه گردید. ژلاتین حل شده به روش بن‌ماری به محلول شکر و گلوکز اضافه شده و تا غلیظ شدن محلول تحت اعمال حرارت قرار گرفت. بعد از افزودن اسید سیتریک و عصاره چغندر قرمز مخلوط تهیه شده بدون اعمال حرارت روی همزن مغناطیسی جهت کاهش دما قرار گرفت. سپس با رسیدن

FTIR ارزیابی شد. میکروکپسول‌ها رطوبت، انحلال‌پذیری و هیگروسکوپیک کمتری نسبت به فرم آزاد آنتوسیانین داشتند. بر طبق HPLC پایداری آنتوسیانین تا ۳۶ درصد بعد ۲ ماه نگهداری در ۳۷ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. میکروکپسول بهینه رنگ قرمز زیادی نشان داد که نشان دهنده‌ی مؤثر بودن روش کواسرواسیون بود. امجدی و همکاران (Amjadi et al., 2018)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و پایداری بتانین ریزپوشانی شده با مالتودکسترین در ۲ غلظت (۵/۰ و ۱ درصد وزنی/وزنی) به روش خشک کردن پاششی در پاستیل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، میزان بتانین و درصد بازدارندگی در برابر DPPH در پاستیل حاوی بتانین ریزپوشانی شده به طور معنی داری بیشتر از پاستیل حاوی بتانین آزاد پایدار می‌باشد ($p < 0.05$). اختلاف بین فعالیت آبی نمونه‌های حاوی بتانین ریزپوشانی شده و آزاد معنی‌دار بوده ($p < 0.05$) و ریزپوشانی بتانین باعث کاهش فعالیت آبی پاستیل شد. بررسی پارامترهای رنگی نمونه‌های پاستیل نیز نشان داد که ریزپوشانی بتانین باعث افزایش روشنایی (L^*) و زردی (b^*) و کاهش قرمزی (a^*) نمونه‌های پاستیل شده است. نتایج حاصل از ارزیابی حسی نمونه‌های پاستیل نیز نشان داد که به رغم پذیرش حسی پایین نمونه‌ی پاستیل حاوی ۱ گرم بتانین آزاد، ریزپوشانی بتانین باعث بهبود ویژگی‌های حسی پاستیل شده و بیشترین امتیاز پذیرش کلی به نمونه حاوی ۱ گرم بتانین ریزپوشانی شده تعلق گرفت.

طبق مطالعات صورت گرفته تاکنون در مورد ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب تحقیقی صورت نگرفته است. هدف از این مطالعه، ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر پایه بتالائین با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب در پاستیل مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد

چغندر قرمز از بازار محلی تهیه گردید. صمغ دانه شاهی (شرکت ریحان گام پارسیان، ایران) و ژلاتین تجاری (شرکت کیان شیمی، ایران) خریداری شدند. کلیه مواد شیمیایی از شرکت مرک آلمان خریداری شدند.

آماده‌سازی عصاره چغندر قرمز

چغندر قرمز بعد از شستشو و پوست‌گیری به صورت خلال درآورده شد در محل تاریک و در دمای اتاق به مدت یک هفته تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید و سپس با آسیاب به صورت پودر شد. برای استخراج عصاره، پودر چغندر قرمز تهیه شده به نسبت ۱ به ۱۰ با آب

شد و سپس محلول را سرد کرده و یک قطره از نمونه محلول روی دستگاه رفرکتومتر چشمی (Carlze، آلمان) قرار داده شد تا بریکس آن معلوم شود مقدار خوانده شده در عدد ۵ ضرب شد و پاسخ به عنوان مقدار بریکس نمونه مورد آزمایش تعیین شد (Iran National Standards Organization, No. 2682).

تعیین پایداری خاصیت آنتی اکسیدانی

ظرفیت آنتی اکسیدانی (AOC^۱) پاستیل در طول مدت نگهداری (۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز) با استفاده از روش DPPH تعیین گردید. محلول اتانولی حاوی DPPH (۰/۰۱ mM) تهیه شده و به نسبت ۱ به ۱ با محلول پاستیل به دست آمده مخلوط گردید و سپس تغییرات جذب بعد از ۴۵ دقیقه نگهداری در تاریکی در طول موج ۵۱۷ نانومتر توسط اسپکتوفتومتر نور مرئی خوانده شده و با قرار دادن مقادیر به دست آمده در رابطه ۱ درصد بازدارندگی DPPH به دست آمد (Mishra et al., 2012).

(۱) $I = (A_{\text{blank}} - A_{\text{sample}}) / A_{\text{blank}} \times 100$ (%) (درصد بازدارندگی)
در این فرمول A_{blank} جذب نوری کنترل منفی را که فاقد عصاره است و A_{sample} میزان جذب نوری غلظت‌های مختلف عصاره می باشد.

تعیین پارامترهای رنگی

به منظور اندازه‌گیری پارامترهای رنگی نمونه‌های پاستیل از هر فرمولاسیون پاستیل سه قطعه به طور تصادفی انتخاب شد و تصاویر با استفاده از دوربین کانون (مدل Canon EQS 8000 D، ساخت کشور تایوان) با زاویه ۹۰ درجه عمودی عکس‌برداری و تصاویر با فرمت JPG ذخیره گردیدند. سایر مراحل پردازش تصویر با نرم‌افزار Image J 1.40g انجام شد. (Khalilian et al., 2011)

اندازه‌گیری پارامترهای بافتی

جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های بافتی نمونه‌های پاستیل (تقریباً ۱۵ میلی‌متر طول × ۱۵ میلی‌متر عرض × ۱۵ میلی‌متر ارتفاع)، از دستگاه آنالیز کننده^۲ بافت (مدل QTS25 CNS Farnell) ساخت کشور انگلستان، مجهز به نرم‌افزار کامپیوتری استفاده شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن، از خشک‌کن خارج گردیدند، سپس هر یک از نمونه‌ها در دو سیکل رفت و برگشتی، توسط پروب سلیندری صفحه گرد با قطر ۳/۵ سانتی‌متر، سرعت حرکت پروب ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و

دمای مخلوط به کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد پودر بتانین در مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی/وزنی به آن اضافه گردید، سپس مخلوط نهایی درون قالب‌هایی ریخته شده قالب‌ها به مدت ۲ ساعت درون یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد جهت بستن ژل قرار گرفتند. سپس ژل حاصل از درون حفره‌های قالب خارج گردیده و نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد درون آون خشک شدند (Amjadi et al., 2018).

آزمون‌های فیزیکوشیمیایی

آزمون رطوبت

۵ گرم از نمونه را در یک ظرف، تمیز که قبلاً به وزن ثابت رسیده بود وزن و نمونه به آرامی در ته ظرف پخش شد. ظرف حاوی نمونه با دمای ۷۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون خلاء (مدل Memert ساخت کشور آلمان) به مدت ۳ ساعت قرار گرفت، پس از آن ظرف از آون خارج و در دیسکاتور قرار گرفت تا سرد شود سپس وزن شد. عمل حرارت دادن و سرد کردن در دیسکاتور دوباره تکرار شد تا هنگامی که اختلاف دو توزین پی در پی کمتر از ۰/۱ میلی‌گرم شد (Iran National Standards Organization, No. 2852).

فعالیت آبی

به منظور تعیین فعالیت آبی، وزن مساوی از هر نمونه کاملاً خرد گردید و فعالیت آبی نمونه توسط دستگاه رطوبت‌سنج مدل Novasina ساخت کشور سوئیس در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (Khosrow Shahi, 1997).

آزمون اسیدیته

۵ گرم از نمونه پاستیل در یک ارلن وزن شد و با آب مقطر خنثی شده رقیق شد (۶ سی‌سی آب مقطر اضافه شد). سپس ۱ سی‌سی محلول شناساگر فنل فتالئین ریخته شد و با محلول هیدروکسید سدیم ۰/۱ نرمال تیتیر شد. در ضمن تیتیر کردن محتوی ارلن مرتب هم‌زده شد نقطه پایان تیتراسیون هنگامی بود که رنگ صورتی ارغوانی ظاهر شده در محیط برای مدت ۳۰ ثانیه پایدار بماند. این آزمون با ۳ تکرار انجام شد (Iran National Standards Organization, No. 2682).

آزمون بریکس

۵ گرم از نمونه در یک بشر وزن شده و به آن ۲۰ میلی‌لیتر آب گرم اضافه شد و با همزن شیشه‌ای تا حل شدن کامل نمونه هم‌زده

1- Antioxidant capacity

2- Texture Analyzer

قرمز ۱/۵ درصد و نمونه شاهد می‌باشد. فعالیت آب بیانگر میزانی از آب در ماده غذایی است که به راحتی خارج نمی‌شود، اما در دسترس ماده است تا به‌عنوان یک حلال شرکت‌کننده در فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و میکروبی عمل نماید (Ergun et al., 2010). در حضور مقدار آب کم برهمکنش بین مولکول‌های آب و ترکیبات غذایی شدت می‌یابد و فعالیت آب به زیر ۱ می‌رسد (Lewicki, 2004). بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی ماده غذایی در ارتباط با فعالیت آبی می‌باشد. در رطوبت‌های پایین برهمکنش بین مولکول‌های آب و ترکیبات غذایی تشدید می‌شود. همچنین فعالیت آبی ماده در ایجاد طعم و بافت مواد غذایی نقش مهمی دارد (Setser & Brannan, 2003). به‌ویژه در مورد ترکیبات فرار طعم‌زا این نقش برجسته‌تر می‌شود زیرا ترکیبات معطر در فاز گازی که در حقیقت رابطه نزدیکی با فعالیت آبی دارند، منتشر شده و در محدوده خاصی بسته به نوع و ویژگی‌های فرآورده اثر افزایشده یا تشدید کننده بر ایجاد طعم و عطر بر جای می‌گذارند. فاز گازی خود تابعی از میزان فعالیت آبی است. به‌عبارت دیگر هر چه فعالیت آبی کمتر باشد، فاز گازی کمتری وجود خواهد داشت (Piazza & Gigli, 2009). خلیلیان و همکاران (Shahidi et al., 2011) و شهیدی و همکاران (Shahidi et al., 2011) بیان داشتند که افزایش غلظت هیدروکلوئیدها باعث افزایش شدت اتصال مولکول‌های آب شده و در نهایت باعث کاهش فعالیت آب نمونه‌ها می‌گردد. ژل پکتین از یک شبکه سه بعدی تشکیل می‌شود که آب، قند و سایر مواد محلول را نگه می‌دارد. اتصالات موجود از نوع هیدروژنی و هیدروفوبیک می‌باشد (Chinachoti, 1995). از طرف دیگر در تشکیل شبکه ژلی پکتین، برهمکنش‌های هیدروفوبیک بین گروه‌های متیل بسیار مهم می‌باشد (پکتین‌های با درجه استری بالا) و چون بیش از نیمی از گروه‌های کربوکسیلیک هیدروفوبیک به گروه‌های استر هیدروفوبیک تغییر داده شده‌اند، تماس با مولکول‌های قطبی آب کاهش یافته است که می‌تواند عاملی در جهت کاهش میزان آب با افزایش غلظت پکتین باشد (Piotr, 2004). هانسن (Hansson et al., 2001)، اظهار داشت زمانی که میزان آب بسیار پایین است (در پاستیل‌های میوه‌ای)، ویسکوزیته و فعالیت آب دو پارامتری هستند که بر انتشار و رهاسازی ترکیبات معطر اثر می‌گذارد. به‌عبارت دیگر غذاهای ژله‌ای شده مانعی برای انتشار و نفوذ مواد معطر در فاز بخار بوده و عوامل ژل‌ساز با مواد معطر واکنش می‌نمایند (Hansson et al., 2001). پیاز و جیگلی (Piazza & Gigli, 2009)، طی پژوهشی که در همین راستا انجام دادند بیان نمودند که با افزایش میزان و غلظت هیدروکلوئیدها، شدت باند هیدروکلوئیدها با مولکول‌های آب افزایش می‌یابد و نهایتاً کاهش فعالیت آبی نمونه‌ها را به‌دنبال خواهد داشت.

نیروی ۵ گرم تا ۳۰ درصد ارتفاع اولیه نمونه فشرده شده^۱، سپس فشارزدایی^۲ شدند. ویژگی‌های بافتی مورد بررسی که از منحنی نیرو-تغییر شکل بدست آمدند. بیشترین نیروی فشاری طی نفوذ (g) به عنوان سختی^۳ و سطح منفی منحنی نیرو-زمانی برگشت پروب به عنوان چسبندگی^۴ (g.s) در نظر گرفته شد. پیوستگی^۵، مساحت نیروی مثبت فشردن در سیکل دوم به سیکل اول در منحنی است. قابلیت جویدن^۶، کار لازم برای جویدن و خمیر کردن نمونه برای بلع است (Kealy, 2006).

ارزیابی حسی

برای ارزیابی حسی از ۲۰ نفر داور آشنا به طعم، بو و بافت محصول استفاده شد. آزمون حسی به روش هدونیک ۹ نقطه‌ای (از شماره ۱ کمترین امتیاز و شماره ۹ بیشترین امتیاز) انجام شد. صفات مورد ارزیابی عبارت بودند از طعم و مزه، رنگ، بافت و پذیرش کلی نمونه‌ها و بهترین نمونه به لحاظ پذیرش کلی بر طبق امتیاز داوران انتخاب گردید (Shahidi et al., 2011).

تجزیه و تحلیل آماری

تمامی آزمایشات در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج از طریق تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در سطح آماری ۵ درصد صورت گرفت. برای تجزیه تحلیل از نرم‌افزار SPSS 22، استفاده شد و جهت رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel (۲۰۱۳) استفاده شد.

نتایج و بحث

ارزیابی فعالیت آبی، رطوبت، اسیدیته و بریکس

پاستیل

میزان فعالیت آبی، رطوبت، اسیدیته و بریکس نمونه‌های پاستیل در جدول ۱ آورده شده است.

همانگونه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، که نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان فعالیت آب به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان فعالیت آب به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر

- 1- Compression
- 2- Decompression
- 3- Hardness
- 4- Adhesiveness
- 5- Cohesiveness
- 6- Chewiness

جدول ۱- اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر میزان فعالیت آبی، رطوبت، اسیدیته و بریکس نمونه‌های پاستیل

Table 1- The effect of nano-encapsulation of red beetroot extract on water activity, moisture, acidity and brix of gummy candies

تیمارها Treatments	فعالیت آبی Water activity	رطوبت Moisture	اسیدیته Acidity	بریکس Brix
نمونه شاهد Control	0.75±0.02 ^a	11.25±1.19 ^d	0.28±0.02 ^d	53.37±2.35 ^d
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۰/۵ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 0.5%	0.68±0.05 ^b	12.37±2.07 ^c	0.34±0.04 ^c	62.54±3.28 ^c
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 1%	0.57±0.06 ^c	14.41±1.26 ^b	0.47±0.08 ^b	82.54±1.31 ^b
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 1.5%	0.42±0.03 ^d	15.37±1.32 ^a	0.52±0.06 ^a	91.54±2.25 ^a

ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$). Means in a column followed by the different superscripts are significantly different at $P \leq 0.05$ by Duncan test.

شکل ۱ مشاهده می‌شود، در طول مدت نگهداری ۲۸ روز نشان داد، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان بازدارندگی به طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین خاصیت آنتی‌اکسیدانی به ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد در روز اول و نمونه شاهد در روز ۲۸ می‌باشد از آن‌جا که بتانین تنها ترکیب آنتی‌اکسیدان فرمولاسیون پاستیل حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز می‌باشد، به همین دلیل این نتایج تصدیق‌کننده‌ی نتایج حاصل از بررسی میزان پایداری بتانین در طول مدت زمان نگهداری می‌باشد.

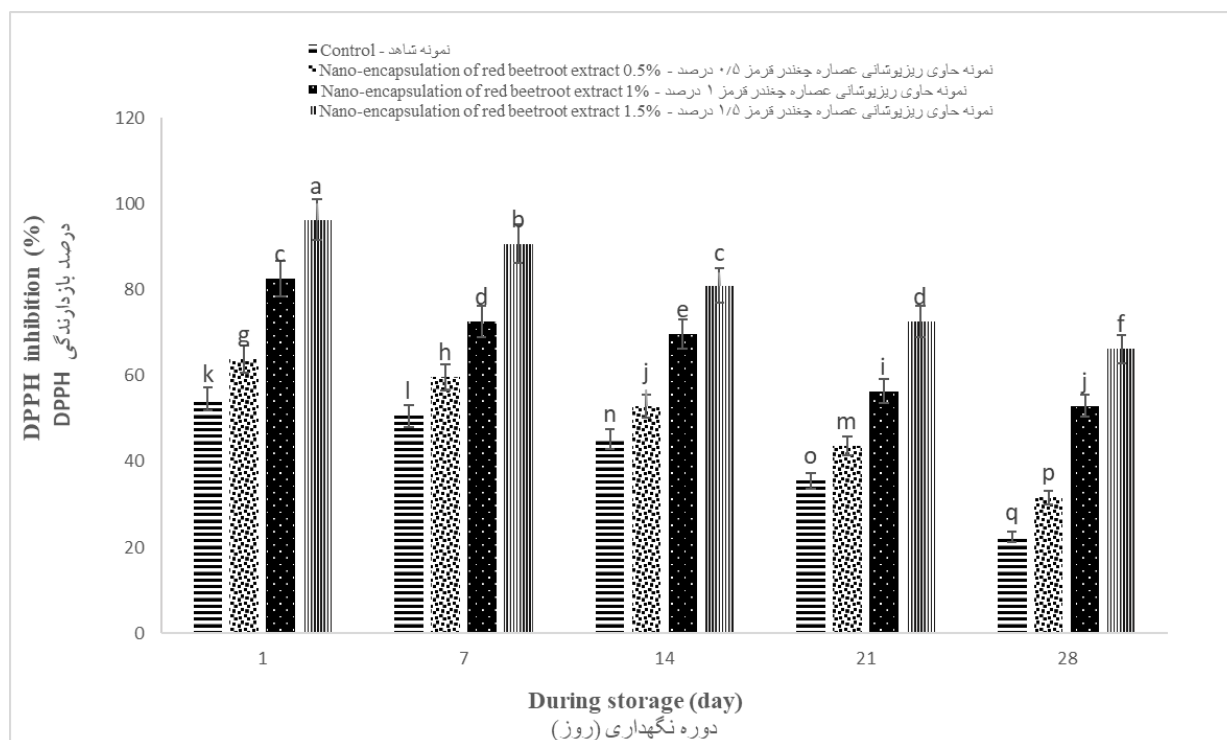
رادیکال آزاد DPPH یک ترکیب معمول در ارزیابی قدرت جذب رادیکال‌های آزاد به‌وسیله پلی‌ساکاریدها می‌باشد. در آزمون جذب و غیرفعال کردن رادیکال‌های آزاد DPPH، آنتی‌اکسیدان‌ها رنگ بنفش تیره پایدار رادیکال DPPH را به زرد کم‌رنگ دی فنیل پیکریل هیدرازین تبدیل می‌کند. تاثیر آنتی‌اکسیدان‌ها بر جذب رادیکال‌های آزاد DPPH، به ظرفیت اشتراک‌گذاری هیدروژن توسط آن‌ها مربوط می‌شود (Chen et al., 2008). اندازه‌گیری میزان توانایی مهار رادیکال‌های آزاد DPPH، به‌عنوان یک آزمون معتبر و در عین حال ساده به‌طور گسترده جهت بررسی فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون، می‌توان به فعالیت آنتی‌اکسیدانی تعداد زیادی نمونه را در طی مدت زمان کوتاه مورد ارزیابی قرار داد. علاوه بر این، حساسیت بالای رادیکال‌های DPPH امکان تعیین فعالیت ضد رادیکالی غلظت‌های پایین ترکیبات آنتی اکسیدانی را نیز فراهم می‌نماید (Sanchez-Moreno, 2002).

همانگونه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، که نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان رطوبت به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان رطوبت به ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد می‌باشد. ترکیبات هیدروکلوئیدی با توجه به خصوصیات عملکردی بعنوان پایدارکننده و جهت حفظ رطوبت موجود در محصول مورد نظر، در فرمولاسیون مواد غذایی استفاده می‌شوند (Goldstein et al., 1973). این ترکیبات نه تنها بر ساختمان فیزیکی و خصوصیات فرآیندی ماده غذایی حاوی هیدروکلوئیدها عمیقاً اثر می‌گذارد بلکه از نقطه نظر فساد ماده غذایی نیز به‌دلیل تأثیری که بر روی فعالیت آب دارد، بسیار حائز اهمیت است (Fatemi, 2005).

همانگونه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، که نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان اسیدیته به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان اسیدیته به ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد می‌باشد. احتمالاً بدلیل دارا بودن ترکیباتی همچون گالیک اسید در ساختار چغندر قرمز می‌باشد. همچنین نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان بریکس به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان بریکس به ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد می‌باشد.

تعیین پایداری خاصیت آنتی‌اکسیدانی

اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر میزان پایداری خاصیت آنتی اکسیدانی نمونه‌های پاستیل در شکل ۱ آورده شده است. همانگونه در



شکل ۱- اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر میزان پایداری خاصیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های پاستیل

ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

Fig. 1. The effect of nano-encapsulation of red beetroot extract on stability of antioxidant properties of gummy candies

* Means in a column followed by the different superscripts are significantly different at $P \leq 0.05$ by Duncan test

فرنگی) پرداختند و نتایج حاصل از فعالیت آنتی‌اکسیدانی نشان داد که رنگدانه‌ها و ترکیبات فنولی عصاره چغندر قرمز، موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی ماست می‌شوند که تأثیرات سلامت‌بخشی بر بدن دارند (Ghyasi et al., 2012). در مطالعه‌ای به نقش آنتی‌اکسیدانی عصاره جدا شده از چغندر قرمز در فرمولاسیون‌ها و تولید مواد غذایی فراسودمند از جمله شراب، شکلات و فرآورده‌های قنادی اشاره شد (Kusano et al., 2016). در پژوهشی دیگر از کینتیک تخریب حرارتی بتالائین‌ها در مقایسه با اسید آسکوربیک بررسی کردند که از مقاومت بالاتر این رنگدانه و حفظ ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی اشاره کردند (Sanchez-Chavez et al., 2015).

ارزیابی بافت

اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر ویژگی‌های بافت نمونه‌های پاستیل در جدول ۲ آورده شده است.

هر چقدر میزان رنگدانه استخراجی از چغندر قرمز در نمونه‌ها افزایش یافت، فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز به نسبت آن افزایش یافت. چغندر قرمز دارای مقدار زیادی رنگدانه بتالائین و ترکیبات فنولی با خواص آنتی‌اکسیدانی زیاد می‌باشد و در واقع بین خاصیت آنتی‌اکسیدانی و رنگدانه بتالائین رابطه خطی وجود دارد (Czapski et al., 2009). اساساً ترکیبات فنولیک به دلیل وجود پروتون آزاد موجود در حلقه فنول توانایی بالایی در مهار رادیکال‌ها دارند که رنگیزه‌های موجود در چغندر قرمز نیز از این نظر مستثنا نیستند. بتالائین‌ها که رنگدانه‌های نیتروژن‌دار محلول در آب هستند که در چغندر قرمز یافت می‌شوند (Cardoso-Ugarte et al., 2014). هانی و همکاران (Hani et al., 2015)، با بررسی میزان بازدارندگی پاستیل حاوی عصاره بتالائینی میوه پیتایا در طول مدت زمان نگهداری ۸ هفته‌ای به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان عصاره افزوده شده به پاستیل میزان بازدارندگی DPPH نیز افزایش یافته ولی با گذشت زمان این میزان بازدارندگی به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. در پژوهشی به بررسی فرمولاسیون ماست طعم‌دار میوه‌ای قالبی با استفاده از رنگدانه طبیعی چغندر قرمز و عصاره طعمی میوه (توت

جدول ۲- اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر ویژگی‌های بافت نمونه‌های پاستیل

Table 2- The effect of nano-encapsulation of red beetroot extract on texture properties of gummy candies

تیمارها Treatments	سختی Hardness (g)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)	پیوستگی Cohesiveness (-)	قابلیت جویدن Chewiness (g.mm)
نمونه شاهد Control	923.35±4.76 ^a	-0.68±0.02 ^a	0.35±0.04 ^d	635.38±2.75 ^a
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۰/۵ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 0.5%	625.62±8.53 ^b	-0.72±0.04 ^b	0.52±0.07 ^c	549.26±2.32 ^b
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 1%	598.37±2.14 ^c	-0.83±0.03 ^c	0.61±0.03 ^b	443.47±1.72 ^c
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 1.5%	484.15±3.28 ^d	-0.91±0.05 ^d	0.82±0.06 ^a	320.32±1.36 ^d

ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).* Means in a column followed by the different superscripts are significantly different at $P \leq 0.05$ by Duncan test.

فرمولاسیون بصورت ساختار متراکم‌تری در کنار یکدیگر قرار گرفته و چسبندگی فرآورده را کاهش می‌دهند. کار مورد نیاز برای غلبه بر نیروی جاذبه بین سطح ماده و سطح سایر موادی که با ماده در تماس هستند را چسبندگی می‌نامند (Kealy, 2006). خلیلیان و همکاران (Khalilian et al., 2011)، اثر غلظت‌های مختلف پکتین را بر چسبندگی بافت نمونه‌های پاستیل طالبی بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان داد که با افزایش غلظت پکتین، میزان چسبندگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس نتایجی که خزایی و همکاران (Khazaei et al., 2014)، طی پژوهشی بر روی اثر غلظت‌های مختلف آگار بر چسبندگی بافت نمونه‌های پاستیل کیوی انجام دادند؛ اظهار داشتند که بین میزان هیدروکلوئید آگار در فرمولاسیون پاستیل و چسبندگی نمونه‌ها رابطه معکوس وجود داشت، به‌طوری‌که با افزایش غلظت هیدروکلوئید میزان چسبندگی کاهش یافت.

همانگونه در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان پیوستگی به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان پیوستگی بافت به‌ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد می‌باشد. پیوستگی مقاومت درونی ساختار ماده غذایی است و میزان آن به برهم‌کنش‌های درون مولکولی اجزا فرمول بستگی دارد (Szczesniak, 2002). براساس تعریف دیگر، پیوستگی عبارت است از مقدار تغییر شکل که در یک نمونه قبل از پارگی هنگامی که به‌طور کامل توسط دندان فشرده شود، رخ می‌دهد (Abd Karim et al., 1999). شهیدی و همکاران (Shahidi et al., 2011)، گزارش کردند اثر پکتین و آگار بر ویژگی‌های بافتی فرآورده را می‌توان به ساختار شبکه ژلی و برهم‌کنش‌های درون مولکولی بین اجزای فرمول و هیدروکلوئیدها مرتبط دانست. ژل پکتین شبکه‌ای پیوسته و متراکم ایجاد می‌کند. با افزایش غلظت آگار نیز پیوستگی فرآورده افزایش یافته و در نهایت اجزای فرمول با قدرت

ویژگی‌های بافتی مواد غذایی در پذیرش آن از سوی مصرف‌کننده اهمیت و نقش به‌سزایی دارد. برای برخی مصرف‌کنندگان مواد غذایی، بافت نسبت به رنگ و طعم از اهمیت بیشتری برخوردار است (Guine & Joao Barroca, 2012). آنالیز پروفایل بافت سال‌هاست بعنوان روشی مناسب برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بافتی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد و پارامترهای حاصل از منحنی‌های آن ارتباط خوبی با داده‌های حسی دارد (Lau, 2000).

سختی، مقاومت ماده غذایی نسبت به اعمال نیروی فشاری به کار گرفته شده است (Szczesniak, 2002). همانگونه در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان سختی به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان سختی بافت به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه شاهد می‌باشد. احتمالاً به‌دلیل وجود صمغ شاهی در فرمولاسیون پاستیل، منجر به افزایش رطوبت نمونه گردید که این خود می‌تواند عاملی در جهت نرم‌تر شدن بافت و کاهش سختی نمونه باشد. در سیستم‌های مخلوط ژلاتین- نشاسته استحکام ژل نهایی کمتر است، چرا که ژلاتین به زمان طولانی برای بستن نیاز دارد. بنابراین ترکیبات نشاسته ابتدا تشکیل شبکه می‌دهند و ممکن است فرآیند برگشت نشاسته نیز رخ دهد که ویژگی‌های رئولوژیکی مخلوط را تغییر خواهد داد. محققان معتقدند که ضعیف‌تر بودن مخلوط ژل‌های نشاسته- ژلاتین دلیل جدا شدن فازها از یکدیگر است (Appelqvist & Debet, 1997).

همانگونه در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان چسبندگی به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان چسبندگی بافت به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه شاهد می‌باشد. احتمالاً به‌دلیل وجود صمغ شاهی در فرمولاسیون پاستیل، میزان باند شدن آب بیشتر و اجزای

داشتند پارامترهای بافتی پاستیل طالبی نه تنها تحت تأثیر ماهیت اجزاء و برهمکنش موجود در فرمولاسیون می‌باشد بلکه سایر ویژگی‌های دیگر به‌ویژه میزان رطوبت نمونه‌ها، می‌تواند بر این پارامترها تأثیرگذار باشد. یوزا و همکاران (Yoza et al., 1999)، بیان داشتند که اکثر قندها به‌دلیل ویژگی آب دوستی شدید و حالیت آن‌ها محلول‌های بسیار غلیظ تولید می‌کنند، قندها توسط گروه هیدروکسیل با مولکول‌های آب پیوند هیدروژنی برقرار می‌نمایند. با توجه به ساختار مولکولی ساکارز و گروه‌های عاملی در معرض آن به نظر می‌رسد پیوندهای هیدروژنی بیشتری در مواد غذایی دارای ساکارز ایجاد شده و با کاهش تحرک آب آزاد باعث افزایش پیوستگی می‌گردند.

رنگ‌سنجی

اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر ویژگی‌های رنگ نمونه‌های پاستیل در جدول ۳ آورده شده است. a^* ، b^* و L^* مشخصه‌های کیفی رنگ هستند که با توجه به این ابعاد رنگ معمولاً به‌صورت مایل به سبز، مایل به قرمز و ... تعریف می‌شود (Sanz et al., 2008). پارامتر a^* نشان‌دهنده تغییر رنگ از قرمز (مقادیر مثبت) به سبز (مقادیر منفی)، شاخص b^* نشان‌دهنده تغییر رنگ از زرد (مقادیر مثبت) به آبی (مقادیر منفی) و شاخص L^* نشان‌دهنده درخشندگی است که از سیاه به سفید متفاوت است (Pathare et al., 2013). پارامترهای رنگ بر بازار پسندی فرآورده‌ها و پذیرش مصرف‌کننده تأثیرگذارند، حتی با وجود اینکه غذاهای عملگر به‌عنوان غذاهای سلامتی‌زا شناخته شده‌اند، بدون جاذبه‌ی بصری برای مصرف‌کنندگان نمی‌توانند بازارپسندی مناسبی داشته باشند. بنابراین رنگ فرآورده‌ی غنی شده باید در طول تولید و نگهداری بدون تغییر باقی بماند (Zare et al., 2011).

بیشتری با هم در تماس قرار می‌گیرند. خلیلیان و همکاران (Khalilian et al., 2011)، گزارش دادند که افزایش درصد هیدروکلوئید پکتین در فرمولاسیون پاستیل طالبی باعث افزایش پیوستگی بافت نمونه‌ها شد. هرناندس و همکاران (Hernández et al., 1999)، به این مطلب اشاره کردند که تغییر در پیوستگی بافت در ژل‌های حاصل از پالپ توت‌فرنگی و ژلاتین، بستگی به غلظت هیدروکلوئید مصرفی و پالپ میوه دارد. در تحقیق این محققان افزایش پالپ میوه یا کاهش غلظت هیدروکلوئید بر پیوستگی بافت نهایی ژل اثر منفی داشت. در ژله‌های قنادی برهم‌کنش بین ژلاتین و سایر ترکیبات رخ می‌دهد و ساکاروز به پایداری این ساختار کمک می‌کند (Farhanaki et al., 2018). بنظر می‌رسد اتصال ژلاتین - قند و جذب آب توسط ژلاتین باعث گردیده که بافت نهایی پاستیل پیوستگی مناسبی داشته باشد.

همانگونه در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان قابلیت جویدن به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین میزان قابلیت جویدن به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه شاهد می‌باشد. قابلیت جویدن به تعداد جویدن‌های لازم برای بلعیدن مقدار مشخصی از ماده غذایی اطلاق می‌شود (Fox et al., 2000). قابلیت جویدن حاصل ضرب صمغیت در قابلیت ارتجاع بوده و انرژی لازم برای هضم دهانی و جویدن مواد غذایی جامد را نشان می‌دهد (Ghanbarzadeh et al., 2010). بولاند و همکاران (Boland et al., 2006) بیان کردند که زمان جویدن ژل قبل از فرو بردن آن بطور معنی‌داری با سفتی ژل افزایش می‌یابد و ژل‌های سخت‌تر به‌مدت طولانی‌تری جویده می‌شوند. خلیلیان و همکاران (Khalilian et al., 2011)، تأثیر میزان پکتین را بر قابلیت جویدن بافت پاستیل طالبی، مستقیم و معنی‌دار ارزیابی کردند. آنها اظهار

جدول ۳- اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر ویژگی‌های رنگ نمونه‌های پاستیل

Table 3- The effect of nano-encapsulation of red beetroot extract on colorimetric properties of gummy candies

تیماها Treatments	L^*	a^*	b^*
نمونه شاهد Control	51.39±1.47 ^a	37.65±2.53 ^d	31.24±1.38 ^a
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۰/۵ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 0.5%	45.64±2.35 ^b	41.08±1.04 ^c	28.29±2.34 ^b
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 1%	37.38±1.82 ^c	59.27±2.78 ^b	21.37±1.51 ^c
نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد Nano-encapsulation of red beetroot extract 1.5%	20.19±1.07 ^d	71.08±1.37 ^a	17.16±1.16 ^d

ارقام دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (آزمون دانکن، $P < 0.05$).

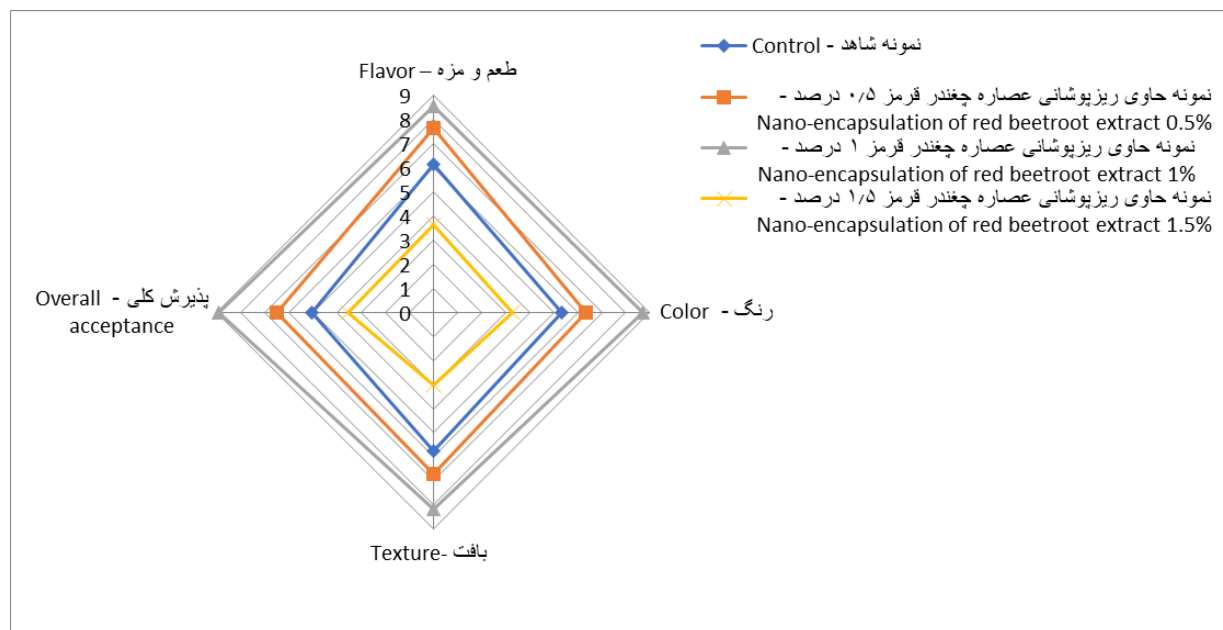
* Means in a column followed by the different superscripts are significantly different at $P \leq 0.05$ by Duncan test.

همان گونه در جدول ۳ مشاهده می شود، شاخص L^* و b^* نمونه های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز نسبت به نمونه شاهد به صورت معنی داری کاهش یافت ($p < 0.05$) اما میزان شاخص a^* افزایش پیدا کرد ($p < 0.05$). در ارتباط با پدیده ایجاد شبکه و تقویت پیوندهای عرضی میان صمغ شاهی، رنگدانه و گلوگز می باشد این پدیده منجر به شکست نور در نمونه های پاستیل شده و از میزان شاخص L^* در آن می کاهد به عبارت دیگر انسجام ایجاد شده در نمونه های پاستیل موجب شکست نور در هنگام بازتاب از سطح جسم شده و در نهایت میزان کدورت را بالا برده و جسم مات تر به نظر خواهد آمد. یلمه و همکاران (Yolmeh et al., 2018)، طی پژوهشی بر روی پاستیل هلو حاوی رنگ کاروتنوئیدی استخراج شده از میکروکوکوس روزنوس دریافتند که افزایش غلظت رنگ استخراج شده از میکروکوکوس روزنوس منجر به کاهش شاخص L^* پاستیل هلو شد. در واقع رنگ استخراج شده از میکروکوکوس روزنوس ماهیت کاروتنوئیدی داشته و دارای رنگ نارنجی قرمز بودند و باعث کاهش میزان روشنایی (شاخص L^*) شدند. غیائی و همکاران (Ghyasi et al., 2012)، فرمولاسیون ماست طعم دار میوه ای قالبی با استفاده از رنگدانه طبیعی و ویژگی های آن مورد بررسی قرار دادند. در مورد شاخص رنگی محصول به این نتیجه رسیدند که ۲ درصد عصاره چغندر قرمز در ماست طعم دار قالبی، موجب می شود تا قرمزی آن نسبت به ماست ساده تقریباً هفت برابر بیشتر باشد (۲/۲۴ درصد در ماست ساده و ۱۴/۲۳ درصد در ماست طعم دار). با توجه به اینکه اختلاف رنگی ماست طعم دار میوه ای در پایان دوره نگهداری نسبت به روز اول، ۲/۱۷ درصد (کمتر از ۳/۲ درصد) که مقدار آن قابل تشخیص با چشم نمی باشد و بیانگر پایداری بتالائین ها در ماست طعم دار طی دوره نگهداری است. اوسز و همکاران (Oses et al., 2009)، در فرمولاسیون بیسکوئیت با عصاره جدا شده از رنگدانه

چغندر قرمز به کاهش اندیس روشنایی ناشی از افزودن این رنگدانه به نمونه های بیسکوئیت اشاره کرده است. راعی و همکاران (Raei et al., 2017)، میکروکپسولاسیون عصاره سبز یونجه و استفاده از آن در پاستیل بررسی کردند. تأثیر میکروکپسولاسیون را بر پارامترهای رنگی عصاره و پاستیل معنی دار دانسته اند که باعث افزایش هر سه شاخص رنگی L^* ، a^* و b^* شده است. چاروان و همکاران (Charoen et al., 2015)، در گزارشی که از آنالیز پارامترهای رنگی پاستیل حاوی عصاره ی زرد میوه ی گواوا ارائه دادند، با افزایش میزان عصاره افزوده شده به نمونه های پاستیل هر سه شاخص رنگی L^* ، a^* و b^* کاهش یافته بود ولی از نظر دو شاخص رنگی L^* و b^* اختلاف معنی داری بین نمونه ها نبوده و از نظر شاخص a^* اختلاف بین نمونه های پاستیل معنی دار بود. محمدی شندی و زمردی (Mohammadi Shendi & Zomorodi, 2018)، تأثیر شیر خرم و پکتین بر ویژگی های رنگی پاستیل میوه ای بر پایه موز گزارش کردند، افزایش شیر خرم موجب افزایش میزان قرمزی و کاهش میزان روشنایی در نمونه های پاستیل گردید که به تیره بودن رنگ شیر خرم نسبت داده شد. توکلی پور و همکاران (Tavakolipour et al., 2013) در بررسی تأثیر جایگزینی شیر خرم و هیدروکلوئیدهای ژلاتین و گوار بر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و ارگانولپتیکی پاستیل کیوی گزارش کردند، شیر خرم نیز منجر به کاهش شاخص L^* و افزایش میزان شاخص a^* گردید که با نتایج این تحقیق مطابقت داشت.

ارزیابی حسی

اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر ارزیابی حسی نمونه های پاستیل در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- اثر ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر ارزیابی حسی نمونه‌های پاستیل
Fig. 2. The effect of nano-encapsulation of red beetroot extract on sensory evaluation of gummy candies

در این فرآیند نقش بسیار مهمی داشت. در واقع ورودی‌های چشایی (طعم و آروما) و بافت بر هم اثر گذاشتند و درک طعم بر درک سختی مؤثر بود (Renard et al., 2006). کولیاندیس و همکاران (Koliandris et al., 2008)، گزارش کردند که شدت درک طعم در محلول‌ها و ژل‌های هیدروکلوئیدی به رهاسازی عوامل ایجاد مزه وابسته است. فری و همکاران (Ferry et al., 2006)، بیان کردند محلول‌های تغلیظ شده نشاسته حاوی گرانول‌های متورم، در غلظت‌های بالا نسبت به سایر پلی‌ساکاریدها تأثیر کمتری در جلوگیری از بروز طعم داشتند و علت این مسئله را چنین بیان کردند که چنین نشاسته‌هایی به خوبی با بزاق مخلوط شده و در نتیجه رهاسازی سریعی در عوامل مزه به وقوع می‌پیوندد. حضور آنزیم آلفاآمیلاز در بزاق منجر به تجزیه نشاسته و کاهش ویسکوزیته آن شده و درک طعم بهتر صورت می‌گیرد. بولاند و همکاران (Boland et al., 2004)، طی پژوهشی بر روی ژل‌های ژلاتین، پکتین و نشاسته اظهار داشتند که رهاسازی طعم به‌طور معنی‌داری با بافت ژل در ارتباط است. ژل ژلاتین بدلیل ایجاد بافت سخت‌تر باعث رهایش کمتر مواد طعمی می‌شود. در مجموع این وقایع باعث کاهش امتیاز پذیرش کلی در نمونه‌های حاوی مقادیر بالای ژلاتین گردید.

همانگونه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، امتیاز رنگ نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد داشت ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین امتیاز رنگ به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه حاوی

اساساً اندازه‌گیری کیفیت یک فرآورده بر اساس اطلاعات دریافتی از پنج حس بینایی، شنوایی، بویایی، چشایی و لازم‌ه ارزیابی حسی گفته می‌شود که این روش بهترین راه برای ارزیابی طعم و بافت در انواع غذاهای جدید به ویژه غذاهای ترکیبی (فرموله) در مراحل اولیه توسعه می‌باشد (Abbasi & Rahimi, 2007). همانگونه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، امتیاز طعم و مزه نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد داشت ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین امتیاز طعم و مزه به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد می‌باشد. تیلور و همکاران (Taylor et al., 2001)، نشان دادند زمان رهاسازی بیشترین مواد طعمی در بافت‌هایی با درجه سختی مختلف متفاوت می‌باشد. هر چه میان سختی بافت بیشتر باشد زمان رهاسازی مواد طعم‌زا دیرتر است درک طعم در سیستم‌های ژلی وابسته بافت و نوع عامل ژل‌کننده می‌باشد. ری‌نارد (Renard, 2006)، نیز در رابطه با ارتباط ساختار ژل، بافت آن و درک طعم اظهار داشته است که با کاهش سختی ژل شدت طعم درک شده افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در غذاهای ژله‌ای شده، عوامل ژل‌ساز با مواد معطر واکنش می‌نمایند و مانعی برای انتشار و نفوذ مواد معطر در فاز بخار ایجاد می‌کنند ژله‌های نرم‌تر توانایی رهاسازی مقادیر بیشتری از ترکیبات معطر را نسبت به ژله‌های سفت‌تر دارند (Boland et al., 2006). اختلاط مواد غذایی با بزاق نیز نقش بسیار مهمی در دریافت طعم داشته است که بافت مواد غذایی

برای ماست‌هایی که حاوی مقادیر مختلف عصاره چغندر قرمز بودند مشاهده شد که بیانگر تأثیر متقابل رنگ و طعم و مزه بر همدیگر بود و موجب شد تا نمونه‌های بدون عصاره چغندر قرمز با افزودن طعم و مزه توت‌فرنگی، پذیرش کلی کمتری را نشان دهند. این امر، اهمیت استفاده از رنگدانه‌ها در تهیه ماست طعم‌دار را نشان داد. گلدفیلد و اپستاین (Goldfield & Epstein, 2002) طی تحقیقاتی نشان دادند که تقلات بر پایه میوه و سبزی پذیرش و جذابیت بالایی از سوی مصرف‌کنندگان دارند. سهولت تهیه و مصرف این تقلات و کیفیت بالای خوراکی به لحاظ بهداشتی و ارزش تغذیه‌ای، نسبت به سایر تقلات از جمله آنهایی که حاوی افزودنی‌های مصنوعی می‌باشند، از مهمترین دلایل پذیرش بالای این گروه از مواد غذایی است.

نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز بر پایه بتالائین با استفاده از روش توده‌ای‌سازی مرکب در پاستیل بود. نتایج نشان داد که، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان فعالیت آب به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه شاهد است ($p < 0.05$) اما میزان رطوبت، اسیدیته و بریکس نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز میزان فعالیت آب به‌طور معنی‌داری بیشتر از نمونه شاهد بود ($p < 0.05$). در طول مدت نگهداری ۲۸ روز نشان داد، نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد میزان بازدارندگی به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر نمونه‌ها است ($p < 0.05$). نتایج آزمون بافت‌سنجی نشان داد، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز نسبت به نمونه شاهد میزان سختی، چسبندگی و قابلیت جویدن کاهش معنی‌داری دارد ($p < 0.05$) اما میزان پیوستگی افزایش معنی‌داری نشان داد ($p < 0.05$). بررسی پارامترهای رنگی نمونه‌های پاستیل نیز نشان داد که نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز باعث کاهش L^* و b^* و افزایش a^* نمونه‌های پاستیل شده است. همچنین در ارزیابی حسی که شامل بافت، طعم و پذیرش کلی است، نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد بهترین نمونه انتخاب گردید. به‌طور کلی، نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد و نمونه ۱/۵ درصد به‌ترتیب بالاترین و پایین‌ترین امتیاز را در پذیرش کلی توسط ارزیابان کسب کردند. براساس یافته‌های حاصل از این تحقیق افزودن ۱ درصد عصاره چغندر قرمز به فرمولاسیون پاستیل توصیه می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافی ندارند.

ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد می‌باشد. رنگ از جنبه‌های کیفی مهم در محصولات غذایی فرآوری نشده و فرآوری شده بود که همراه با طعم و بافت، نقش مهمی را در مقبولیت غذا کرد (Alhoosei et al., 2017). همانگونه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، امتیاز بافت نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد داشت ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین امتیاز بافت به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد می‌باشد. اگرچه طعم و بو از مهمترین عوامل مؤثر بر کیفیت مواد غذایی محسوب می‌شوند، ولی اغلب مصرف‌کنندگان دلیل اصلی عدم رغبت به مصرف را مشکل بافتی فرآورده‌ها عنوان می‌کنند (Born, 2007). براساس این پژوهش مشخص شد نتایج مربوط به بررسی بافت نمونه به روش ارزیابی حسی و آنالیز پروفایل بافت به روش دستگاهی روند مشابهی نشان دادند و این حاکی از آن است که نتایج به روش دستگاهی به خوبی بیانگر ویژگی‌های بافتی نمونه‌های تولیدی است. در اغلب تحقیقات همبستگی خوبی داده‌های حسی دستگاهی حاصل از ارزیابی بافت مشاهده شده است (DiMonaco et al., 2008). هالوود (Hollowood et al., 2002) بیان کرد که ورودی‌های چشایی (طعم و آروما) و بافت بر هم اثر می‌گذارند و درک سفتی بر طعم مؤثر است. وی اشاره نمود که با افزایش سختی بافت ژل، طعم درک شده کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، زمانی که ارزیاب سفتی بافت را درک می‌کند، از حس و درک شیرینی و آروما غفلت می‌کند. پذیرش کلی بیانگر احساس کلی داوران نسبت به نمونه مورد بررسی است. عوامل بسیاری همچون رنگ، عطر، طعم و مزه حتی بسته‌بندی محصول در پذیرش نهایی محصول نقش مهمی دارد. همانگونه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، امتیاز پذیرش کلی نمونه‌های حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد داشت ($p < 0.05$). کمترین و بیشترین امتیاز پذیرش کلی به‌ترتیب مربوط به نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱/۵ درصد و نمونه حاوی ریزپوشانی عصاره چغندر قرمز ۱ درصد می‌باشد. بافت و خواص فیزیکی غذا بر طعم و پذیرش کلی آن تأثیرگذار می‌باشد، چرا که بافت تا حدودی می‌تواند مقدار و سرعتی را که ماده طعم را به جواهرهای چشایی می‌رسد کنترل کند (Setser & Brannan, 2003).

غیائی و همکاران (Ghyasi et al., 2012)، فرمولاسیون ماست طعم‌دار میوه‌ای قالبی با استفاده از رنگدانه‌های طبیعی و ویژگی‌های آن را بررسی کردند و در مورد پذیرش کلی محصول به این نتیجه رسیدند که افزودن ۶ و ۸ درصد طعم و مزه توت‌فرنگی، موجب افزایش معنی‌دار پذیرش کلی ماست شد البته این افزایش پذیرش کلی

میزان مشارکت نویسندگان

عاطفه قورچی: انجام آزمایشات، تحقیق و بررسی، مدیریت داده ها، نوشتن پیش‌نویس اصلی، اکرم آریان‌فر: مدیریت داده‌ها، مدیریت پروژه، نظارت، وحید حکیم‌زاده: نظارت، سارا ناجی طبسی: مدیریت پروژه، نظارت.

منابع تأمین مالی

این مقاله از رساله دکتری خانم عاطفه قورچی بدون حمایت مالی ارائه شده است.

References

- Alhooei, D., Salami, M., & Moslehi Shad, M. (2017). The investigation of the synergistic effect of natural pigments on the antioxidant properties in food industries. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 67(14), 53-62. <https://sid.ir/paper/71622/fa>
- Azadmard Dimerchi, P., & Emami, Sh. (2012). *Nanoencapsulation of bioactive compounds in food systems*. Amidi Publications. First Edition.
- Amjadi, S., Ghorbani, M., Hamishekar, H., & Roufegarinejad, L. (2018). Improvement in the stability of betanin by liposomal nanocarriers: its application in gummy candy as a food model. *Food Chemistry*, 256, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.114>
- Azeredo, H. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability—a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(12), 2365-2376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>
- Abbasi, S., & Rahimi, S., (2007). Introduction of an unknown local plant gum: Persian gum (zedu gum). *Flour and Food Industry Magazine*, 4, 42-51. (In Persian)
- Appelqvist, I.A.M., & Debet, M.R.M., (1997). Starch-biopolymer interactions - A review. *Food Reviews International*, 13(2), 163-224. <https://doi.org/10.1080/87559129709541105>
- Abd Karim, A., Sulebele, G.A., Azhar, M., & Ping, C.Y. (1999). Effect of Carrageenan on yield and properties of Tofu. *Food Chemistry*, 66(2), 159-165. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00258-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00258-1)
- Bakry, A.M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M.Y., Mousa, A., & Liang, L. (2016). Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 143-182. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>
- Born, M. (2007). Food rheology, food texture and viscosity, concept and measurement, translated by Abbasi, S., Marz Danesh Publishing, Tehran, pages 7, 240,241.
- Boland, A., Delahunty, M., & Van Ruth, M. (2006). Influence of the texture of gelatin gels and pectin gels on strawberry flavour release and perception. *Food Chemistry*, 96(3), 452-460. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.027>
- Boland, A.B., Buhr, K., Giannouli, P., & Van Ruth, S.M. (2004). Influence of gelatin, starch, pectin and artificial saliva on the release of 11 flavour compounds from model gel systems. *Food Chemistry*, 86(3), 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.015>
- Charoen, R., Savedboworn, W., Phuditcharnchnakun, S., & Khuntawetap, T. (2015). Development of antioxidant gummy jelly candy supplemented with psidium guajava leaf extract. *King mongkut's university of Technology North Bangkok International Journal of Applied Science & Technology*, 8(2), 145-151. <https://doi.org/10.14416/j.ijast.2015.02.002>
- Czapski, J., Mikolajczyk, K., & Kaczmarek, M. (2009). Relationship between antioxidant capacity of red beet juice and content of its betalain pigment. *Polish Journal of Food & Nutrition sciences*, 59(2), 119 122.
- Chinachoti, P. (1995). Carbohydrates: functionality in food. *American Journal of Clinical Nutrition*, 61, 922-929. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.4.922s>
- Cardoso- Ugarte, G.A., Sosa- Morales, M. E., Ballard, T., Liceaga, A., & San Martin- Gonzalez, M.F. (2014). Microwave- assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*). *LWT- Food Science and Technology*, 59(1), 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.025>
- Chen, Y., Xie, M.Y., Nie, S.P., Li, C., & Wang, Y.X. (2008). Purification, composition analysis and antioxidant activity of a polysaccharide from the fruiting bodies of *Ganoderma atrum*. *Food Chemistry*, 107(1), 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.021>
- DiMonaco, R., Cavellam, S., & Masi, P. (2008). Predicting sensory cohesiveness, hardness and springiness of solid foods from instrumental measurements. *Journal Of Texture Studies*, 39, 129-149. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2008.00134.x>
- Ergun, R., Lietha, R., & Hartel, R.W. (2010). Moisture and shelf life in sugar confections. *Critical Reviews in food Science and Nutrition*, 50, 162-192. <https://doi.org/10.1080/10408390802248833>

19. Farhanaki, A., Majzoubi, M., & Mesbahi, G. (2018). Properties and uses of hydrocolloids in food and medicine: gelatin, katira, gum arabic, starch, modified starch and pectin. Iran Science and Agriculture Publishing House, Tehran.
20. Fox, P., Guinee, T., Cogan, M., & Mcsweeney, P. (2000). *Fundamentals of cheese science*. Aspen publication.
21. Fathi, H. (1992). World Apple Market. *World Goods Market*, 21, 20-15.
22. Fatemi, H. (2005). *Food chemistry*. Tehran publishing company, 333-335.
23. Fathi-Achachlouei, B., Shaddel, R., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., & Akbari-Alavijeh, S. (2018). A novel approach for encapsulation of black raspberry anthocyanins by complex coacervation method using gelatin and gum Arabic as wall materials. *Journal of Food Science and Technology*, 15(82), 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.024>
24. Ferry, A.L., Hort, J., Mitchell, J.R., Cook, D.J., Lagarrigue, S., & Valles Pamies, B. (2006). Viscosity and flavor perception: Why is starch different from hydrocolloids? *Food Hydrocolloids*, 20(6), 855-862. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.08.008>
25. Goldfield, S., & Epstein, L. (2002). Can fruits and vegetables and activities substitute for snack foods?. *Health Psychology*, 21, 299-303. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.21.3.299>
26. Goldstein, A.M., Alter, E.N., & Seaman, J.K. (1973). Guar gum. In: whistler RL, editor, Industrial gums, 2nd edition. Newyork: Academicl Press: 303 – 321. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-746252-3.50019-8>
27. Guine, R.P.F., & Joao Barroca, M. (2012). Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food and Bioproducts Processing*, 90(1), 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.01.003>
28. Ghasempour, Z., Alizadeh, M., & Bari, M.R. (2012). Optimisation of probiotic yoghurt production containing Zedo gum. *International Journal of Dairy Technology*, 65, 118-125. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2011.00740.x>
29. Ghanbarzadeh, B., Espern, V., & Hosseini, S.E. (2010). The effects of pectin on some physical and sensory properties of Tofu (soya curd) produced by using CaCl_2 and GDL Coagulants. *Iranian Food Science and Technology*, 9, 136-144.
30. Ghyasi, H., Maghsoudlou, Y., Kommeiri, M., & Sadeghi Mahoonak, A. (2012). Fruit flavored set yogurt formulation with natural pigment and investigation of its properties. *Innovation in Food Science and Technology*, 4(2 (12)), 1-9.
31. Hani, N.M., Romli, S.R., & Ahmad, M. (2015). Influences of red pitaya fruit puree & gelling agents on the physico, mechanical properties & quality changes of gummy confections. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(2), 331-339. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12638>
32. Hansson, A., Andersson, J., & Leufven, A. (2001). The effect of sugars and pectin on flavor release from a soft drink- related model system, *Food Chemistry*, 72, 363-368. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00243-0](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00243-0)
33. Hernández, M.J., Durán, L., & Costell, E. (1999). Influence of composition on mechanical properties of strawberry gels, compression test and texture profile analysis. *Food Science and Technology International*, 5(1), 79-87. <https://doi.org/10.1177/108201329900500108>
34. Hollowood, T.A., Linforth, R.S.T., & Taylor A.J. (2002). The effect of viscosity on the perception of flavor. *Chemical Senses*, 27, 583-591. <https://doi.org/10.1093/chemse/27.7.583>
35. Iran National Standards Organization. (2006). Milk and milk products— Determination of titrable acidity and value pH— No. 2852. file:///C:/Users/informaticiran/Downloads/2852-1401.pdf
36. Iran National Standards Organization. (2017). Jelly products—Specifications and test methods No. 2682. file:///C:/Users/informaticiran/Downloads/2682-1402.pdf
37. Kazemi Deliri, A. (1994). Preparation of gelatin from animal waste. A collection of Sharif's research articles. *Biochemistry Center, Sharif University of Technology Publications*. 68-60.
38. Kusano Bucalen Ferrari, C., Percario, S., Carlos CostaBaptista Silva, J., & Aparecida Ferraz da Silva Torres, E., (2016). An apple plus a brazil nut a day keeps the doctors away: antioxidant capacity of foods and their health benefits. *Current Pharmaceutical Design*, 22(2), 189-195. <https://doi.org/10.2174/1381612822666151117122715>
39. Kealy, T. (2006), Application of liquid and solid rheological technologies to the textural characterization of semi-solid food. *Food Reserch International*, 39, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.07.016>
40. Karazhiyan, H. (2010). Study of polyelectrolyte nature of *Lepidium sativum* hydrocolloid extract. *Iranian Food Science and Technology Association*, 6(1), 37-43.
41. Khalilian, S., Shahidi, F., Elahi, M., Mehebbi, M., Sarmad, M., & Roshan Nejad, M. (2011). The effect of different concentrations of pectin and xanthan gum on sensory properties and water activity of the fruit pastille based on cantaloupe puree. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 7(3), 200-209.
42. Khosrow Shahi, A. (1997). *Chemistry of food analysis*, Urmia University Press, page 314.

43. Koliandris, A., Lee, A., Ferry, A.I., Hill, S., & Mitchell, J. (2008). Relationship between structure of hydrocolloid gels and solutions and flavour release. *Food Hydrocolloids*, 22, 623-630. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.02.009>
44. Khazaei, E., Shahidi, F., Mortazavi, S.A., & Mohebbi, M. (2014). Kivi Pastille formulation and effect of different concentrations of agar and Guaron moisture content, textural and sensory properties. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 10(1), 27-37.
45. Lau, M.H., Tang, J., & Paulson, A.T. (2000). Texture profile and turbidity of gellan-gelatin mixed gels. *Food Research International*, 33, 665-671. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00111-3)
46. Lewicki, P.P. (2004). Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*, 61, 483-495. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00219-X)
47. Li, C., Wang, J., Shi, J., Huang, X., Peng, Q., & Xue, F., (2015). Encapsulation of tomato oleoresin using soy protein isolate/gum arabica conjugates as emulsifier and coating materials. *Food Hydrocolloids*, 45, 301-308. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.022>
48. Mohammadi Shendi, H., & Zomorodi, Sh. (2018). The effect of date syrup and pectin gum on the color, textural and sensory properties of fruit pastilles based on bananas. *Journal of Food Research*, 28(4), 45-55. https://foodresearch.tabrizu.ac.ir/article_8412_b73673d906266947455d0ec5ca660269.pdf?lang=en
49. Mishra, K., Ojha, H., & Chaudhury, N.K. (2012). Estimation of antiradical properties of antioxidants using DPPH assay: A critical review and results. *Food Chemistry*, 130(4), 1036-1043. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.127>
50. Neelwarne, B., & Rudrappa, T. (2013). Peroxidases and other enzymes from red beet hairy roots. In *Red Beet Biotechnology* (pp. 283-333). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3458-0_12
51. Oses, J., Fabregat- Vazquez, M., Pedroza-Islas, R., Tomas, S.A., Cruz- Orea, A., & Mate, J.I., (2009). Development and characterization of composite edible films based on whey protein isolate and mesquite gum. *Journal of Food Engineering*, 92(1), 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.029>
52. Pathare, P.B., Opara, U.L., & Al-Said, F.A.J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
53. Pai, D.A., Vangala, V.R., Ng, J.W., Ng, W.K., & Tan, R.B. (2015). Resistant maltodextrin as a shell material for encapsulation of naringin: Production and physicochemical characterization. *Journal of Food Engineering*, 161, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.037>
54. Piotr P. (2004). Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*, 61, 483-495. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00219-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00219-X)
55. Piazza, L., & Gigli, J. (2009). Multi-scale estimation of water-soluble diffusivity in polysaccharide gels. *Universita di milano, Italy*.
56. Renard, D., Van De Velde, F., & Vischers, R.W. (2006). The gap between food gel structure, texture and perception. *Food Hydrocolloids*, 20, 423-431. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.10.014>
57. Raei, A., Yasini Ardakani, S.A., & Daneshi, M. (2017). Microencapsulation of the green pigment of alfalfa and its applications on heated food. *Journal of Food Process Engineering*, 40(5), e12529. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12529>
58. Sanchez- Chavez, W., Cortez- Arredondo, J., Solano- Cornejo, M., & Vidaurre- Ruiz, J., (2015). Kinetics of thermal degradation of betacyanins, betaxantins and vitamin C in a juice- based drink beet (*Beta vulgaris*) and honey. *Scientia Agropecuaria*, 6(2), 111-118. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.02.03>
59. Sanchez-Moreno, C. (2002). Methods used to evaluate the free radical scavenging activity in foods and biological systems. *Journal of Food Science and Technology International*, 8, 121-137. <https://doi.org/10.1177/1082013202008003770>
60. Speiser, P. (1976). Microencapsulation by coacervation, spray encapsulation and nanoencapsulation. In: J.R. Nixon (Ed.), *Microencapsulation*. New York: Marcel Dekker. 1-11.
61. Szczesniak, A.S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13(4), 215-225. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(01\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(01)00039-8)
62. Shahidi, S., Khalilian, M., Mohebbi, M., & Fathi, M. (2011). Apple pastille formulation and evaluation of different formula based on sensory properties and water activity. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 7(2), 129-136.
63. Sanz, T., Salvador, A., Jimenez, A., & Fiszman, S.M. (2008). Yogurt enrichment with functional asparagus fibre. Effect of fibre extraction method on rheological properties, colour, and sensory acceptance. *European Food Research and Technology*, 227(5), 1515-1521. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0874-2>
64. Sagalowicz, L., & Leser, M.E. (2010). Delivery systems for liquid food products. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(1-2), 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.12.003>
65. Setser, C.S., & Brannan, G.D. (2003). *Carbohydrates/Sensory properties*. Elsevier Science Ltd.

66. Tavakolipour, H., Kalbasi Ashtari, A., & Hosseini, B. (2013). Determination of rheological properties of grape molasses. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 4(10), 129-137. <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-114-en.html>
67. Taylor, A.J., Besnard, S., Puaud, M., & Linfoth, R.S.T. (2001). In vivo measurement of flavour release from mixed phase gels. *Biomolecular Engineering*, 17, 143-150. [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(01\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(01)00073-9)
68. Vulic, J., Canadanovic-Bruneta, J., Cetkovic, G., Tumbasa, V., Djilasa, S., Cetojevic-Siminb, D., & Canadanovic, V. (2012). Antioxidant and cell growth activities of beet root pomace extracts. *Journal of Functional Foods*, 4, 670-678. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.04.008>
69. Ward, A.G., & Courts, A. (1977). *The Science and Technology of Gelatin*. New York: Academic Press. ISBN 0127350500, pp: 1-27.
70. Yoza, K., Amanokura, N., Ono, Y., Akao, T., Shinmori, H., Takeuchi, M., & Reinhoudt, D.N. (1999). Sugar-integrated gelators of organic solvents- their remarkable diversity in gelation ability and aggregate structure. *Chemistry- Weinheim- European Journal*, 5, 2722-2729. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-3765\(19990903\)5:9<2722::aid-chem2722>3.0.co;2-n](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-3765(19990903)5:9<2722::aid-chem2722>3.0.co;2-n)
71. Yousefi, S. (2018). Optimization of spray drying process to produce microencapsulated powders of functional extract obtained from red-beet. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 15(2(58)), 31-44. http://jftn.srbiau.ac.ir/article_11639.htm
72. Yolmeh, M., Khomeiri, M., Ghorbani, M., Ghaemi, E.A., & Ramezanpour, S.S. (2018). Peach pastille formulation containing carotenoid pigment extracted from *Micrococcus roseus* and optimization of its physicochemical and textural properties. *Food Science and Technology*, 73(14), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.12.010>
73. Zare, F., Boye, J.I., Orsat, V., Champagne, C., & Simpson, B.K. (2011). Microbial, physical and sensory properties of yogurt supplemented with lentil flour. *Food Research International*, 44(8), 2482-2488. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.002>

Investigating the Effect of Different Concentrations of Organic Acids (Ascorbic, Citric, Malic, and Tartaric) on the Viscosity and Rheological Properties of Balangu Seed Gum

F. Salehi¹^{*}, M. Tashakori¹, K. Samary¹

1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
(* - Corresponding Author Email: F.Salehi@basu.ac.ir)

Received: 05.06.2024
Revised: 30.01.2025
Accepted: 23.03.2025
Available Online: 23.04.2025

How to cite this article:

Salehi, F., Tashakori, M., & Samary, K. (2025). Investigating the effect of different concentrations of organic acids (ascorbic, citric, malic, and tartaric) on the viscosity and rheological properties of Balangu seed gum. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(2), 165-178. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.88385.1337>

Introduction

Balangu seed gum (BSG) is a hydrocolloid extracted from the seeds of *Lallemantia royleana* L.. This gum works as thickener and stabilizer in food products. This gum had high performance compared to some commercially available food grade gums. When this gum is mixed with water, it becomes thick (viscous fluid) and this gel-like substance becomes thin when stirred or shaken (pseudoplastic behavior) (Salehi & Inanloodoghrouz, 2023). The term organic acid refers to organic compounds with acidic properties. The acidity of organic acids is associated with their carboxyl group and therefore they are called carboxylic acids. Organic acids can be classified according to the type of carbon chain (aliphatic, alicyclic, aromatic, and heterocyclic), their extent of saturation and substitution, and the number of carboxyl groups (mono-, di-, tri-carboxylic). Monocarboxylic acids like acetic acid are highly volatile liquids with a pungent taste. Malic and tartaric acids are also dicarboxylic acids that contain one and two hydroxyl groups, respectively. Citric acid is the best-known tricarboxylic acid with one hydroxyl group that is found in foods (Yildiz, 2010). The most abundant organic acid in citrus juice is citric acid. Also, citrus juices such as lemons, oranges, and grapefruits are a good source of ascorbic acid (Nour *et al.*, 2010). pH is an important parameter that affects the rheological properties of hydrocolloid solutions. Addition of acid to an aqueous gum solution leads to changes in pH which affect the viscosity of this solution (Hayta *et al.*, 2020). In this study the effect of four edible organic acids (ascorbic, citric, malic, and tartaric) at two concentrations (0.5, and 1 %) on the viscosity and rheological behavior of Balangu seed gum solution (0.2%, w/v) was investigated.

Material and Methods

In this research, organic acids including ascorbic, citric, malic, and tartaric were purchased in powder form (China) and dissolved in distilled water. Two concentrations of each acid, 0.5% and 1%, were prepared, and the distilled water was considered as the control (0% acid). The Balangu seed gum solutions were prepared by dissolving the gum powder (0.20%, w/v) in distilled water containing different concentrations of ascorbic, citric, malic, and tartaric acids using a magnetic stirrer. The rheological parameters of Balangu seed gum dispersions were measured using a viscometer (Brookfield, DV2T, RV, USA) at 20°C. Power law, Bingham, Herschel-Bulkley, and Casson models are common ways of representing the behavior of several gum dispersions. In this research, these models were used to match the shear stress and shear rate results of the gum solutions containing edible organic acids. Differences between means were established using Duncan's multiple range using SPSS (version 21).

Results and Discussion

The findings of this study showed that the apparent viscosity of Balangu seed gum solution reduced when the shear rate increased. Additionally, the apparent viscosity of the Balangu seed gum solution reduced as the organic



©2025 The author(s). 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.2025.88385.1337>

acids concentration increased. The highest decrease in viscosity was related to solution containing 1% citric acid and the lowest was related to tartaric acid with a concentration of 0.5%. The rheological behavior of solutions was successfully modeled using Power law, Bingham, Herschel-Bulkley, and Casson models, and the Power law model was the best one for describing the behavior of Balangu seed gum solutions containing organic acids. The Power law model had a good performance with the highest correlation coefficient (>0.9406) and least sum of squared error (<0.0090) and root mean square error (<0.0275) for all samples. The consistency coefficient of the samples reduced as the acid percent was increased. Sample containing 1% citric acid had the lowest consistency coefficient and sample containing 0.5% malic acid had the highest consistency coefficient. The Power law model shows that a fluid with shear-thinning behavior has a value of flow behavior index less than 1 (Kumar *et al.*, 2021). By adding acid to Balangu seed gum solution, the flow behavior index of most samples increased. The Bingham yield stress of all samples reduced when acids percent was increased. The dispersion containing 1% citric acid had the lowest Bingham yield stress and the sample containing 0.5% tartaric acid had the highest yield stress. The Bingham plastic viscosity of the samples reduced when acids percent was increased. The solution containing 0.5% ascorbic acid had the highest Bingham plastic viscosities (0.0038 Pa.s) and the sample containing 0.5% malic acid had the lowest plastic viscosities (0.0014 Pa.s). The results showed that when the ascorbic acid concentration was increased from 0.5% to 1%, the Casson plastic viscosities of the Balangu seed gum solution was decreased significantly from 0.054 Pa.s to 0.042 Pa.s ($p<0.05$).

Conclusion

The results of this study indicated that it is a mistake to use Balangu seed gum in food products containing high concentrations of citric acid, and this acid reduces the viscosity and consistency of the products containing this gum.

Keywords: Balangu seed gum, Consistency coefficient, Flow behavior index, Herschel-Bulkley, Organic acid

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۶۵-۱۷۸

بررسی اثر اسیدهای آلی (آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک) در غلظت‌های مختلف بر ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو

فخرالدین صالحی^{۱*} - مریم تشکری^۱ - کیمیا ثمری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۳

چکیده

علم رئولوژی کاربردهای زیادی در فرآوری و انتقال مواد غذایی دارد. بررسی قوام و رفتار جریان هیدروکلوئیدها در حضور ترکیبات مختلف به دلیل خواص ساختاری و بافتی که در مواد غذایی ایجاد می‌کنند، بسیار مهم است. از اسیدهای آلی خوراکی آلی مانند اسید مالیک، اسید سیتریک، اسید آسکوربیک و اسید تارتاریک برای کنترل pH در برخی از محصولات غذایی استفاده می‌شود. در این مطالعه اثر این چهار اسید آلی خوراکی بر ویسکوزیته و رفتار رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو بررسی شد. برای تهیه محلول‌های مورد استفاده جهت آزمایش‌های رئولوژیکی، ۰/۲ درصد (وزنی/حجمی) از پودر صمغ دانه بالنگو درون محلول تهیه شده از هر اسید در دو غلظت ۰/۵ و ۱ درصد، توسط همزن مغناطیسی به صورت کامل حل شد. برای اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های حاوی اسید و صمغ دانه بالنگو، از یک ویسکومتر چرخشی استفاده شد. یافته‌های این مطالعه نشان داد که ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو با افزایش غلظت اسیدهای آلی کاهش یافت. بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به محلول حاوی ۱ درصد اسید سیتریک و کمترین آن مربوط به اسید تارتاریک با غلظت ۰/۵ درصد بود. مدل قانون توان بهترین مدل برای توصیف رفتار محلول‌های صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی بود. نتایج برآش داده‌های سرعت برشی-تنش برشی محلول شاهد صمغ دانه بالنگو نشان داد که مجموع مربعات خطا مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۸۷۰، ۰/۰۰۱۶ و ۰/۰۲۳۱ است. با افزایش درصد اسید، ضریب قوام نمونه‌ها کاهش یافت. نمونه‌های حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین ضریب قوام و نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین ضریب قوام بودند. با افزودن اسید به محلول صمغ دانه بالنگو، شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: اسید آلی، شاخص رفتار جریان، صمغ دانه بالنگو، ضریب قوام، هرشل بالکلی

مقدمه

غذاهای فوری، سوپ‌ها، دسرها، محصولات نانوائی و قنادی استفاده می‌شوند (Hayta et al., 2020; Kang et al., 2023; Nor Hayati et al., 2016; Salehi, 2020). صمغ دانه بالنگو یک هیدروکلوئید استخراج شده از دانه‌های *Lallemantia royleana* L. است. امکان استفاده از این صمغ برای افزایش قوام محصولات مختلف غذایی و ثابت نگه داشتن آن وجود دارد. این ویژگی باعث می‌شود که آن را به

صمغ‌ها (هیدروکلوئیدها) به عنوان تغلیظ کننده در بهبود ویسکوزیته، قوام و خواص بافتی محصولات غذایی نقش مهمی دارند (Ozgur et al., 2017). صمغ‌های مختلفی مانند گوار، گزانتان، پکتین، کارایا، کاراگینان، کربوکسی متیل سلولز، عربی و آلژینات در محصولات مختلف غذایی مانند انواع نوشیدنی‌ها، سس‌ها، محصولات لبنی،

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: F.Salehi@basu.ac.ir)

انتخاب خوبی برای استفاده در محصولات غذایی تبدیل کند. این صمغ در مقایسه با برخی از صمغ‌های خوراکی موجود در بازار بسیار خوب عمل می‌کند. هنگامی که این صمغ با آب مخلوط می‌شود، باعث افزایش ویسکوزیته آن می‌شود. البته ویسکوزیته این ماده ژل مانند در هنگام هم زدن کاهش می‌یابد و محصول رفتار شبه پلاستیک^۱ از خود نشان می‌دهد (Salehi & Inanloodoghous, 2023).

اصطلاح اسید آلی به ترکیبات آلی با خواص اسیدی اشاره دارد. اسیدیته اسیدهای آلی با گروه کربوکسیل آنها مرتبط است و به همین دلیل به آنها اسیدهای کربوکسیلیک می‌گویند. اسیدهای آلی را می‌توان بر اساس نوع زنجیره کربن (آلیفاتیک^۲، آلیسیکلیک^۳، آروماتیک^۴ و هتروسیکلیک^۵)، میزان اشباع و جایگزینی آنها و تعداد گروه‌های کربوکسیل (مونو، دی، تری کربوکسیلیک) طبقه‌بندی کرد. اسیدهای مونو کربوکسیلیک، مانند اسید استیک مایعات بسیار فرار با طعمی تند هستند. اسیدهای مالیک و تارتاریک نیز اسیدهای دی کربوکسیلیک و به ترتیب حاوی یک و دو گروه هیدروکسیل هستند. اسید سیتریک نیز شناخته‌شده‌ترین اسید تری کربوکسیلیک با یک گروه هیدروکسیل است که در میوه‌ها یافته شده و در فرمولاسیون مواد غذایی به کار برده می‌شود. از اسیدهای آلی خوراکی معمولاً برای کنترل pH در برخی از محصولات غذایی استفاده می‌شود (Yildiz, 2010). فراوان‌ترین اسید آلی در آب مرکبات، اسید سیتریک است. همچنین، آب مرکباتی مانند لیموشیرین، پرتقال و گریپ‌فروت منبع خوبی برای اسید آسکوربیک هستند (Nour et al., 2010).

افزودن اسید به محلول آبی صمغ‌ها و در نتیجه تغییر pH محلول، جزء عوامل مهم و تأثیرگذار بر ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی محلول‌های هیدروکلوئیدی است (Hayta et al., 2020). هایتا و همکاران (Hayta et al., 2020) تأثیر pH بر محلول‌های مخلوط صمغ گالاکتومانان-گزانتان را بررسی و گزارش کردند که ضریب قوام صمغ‌ها در pH پایین (حدود ۲) کاهش یافته و ویسکوزیته ظاهری محلول‌ها هم به pH محلول وابسته بوده است. صالحی و همکاران (Salehi et al., 2024) تأثیر اسیدهای آلی بر ویسکوزیته و رفتار رئولوژیکی محلول صمغ گوار را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت اسید آلی، مقادیر ضریب قوام محلول‌ها کاهش می‌یابد (Salehi et al., 2024). همچنین نمونه حاوی ۱ درصد اسید تارتاریک کمترین مقدار ضریب قوام و نمونه حاوی ۰/۵ درصد اسید آسکوربیک دارای بیشترین مقدار ضریب قوام بودند. مدینا-تورس و

همکاران (Medina-Torres et al., 2000) گزارش کردند که ویسکوزیته صمغ انجیر تیغی هندی^۶ با کاهش pH محلول از ۷ به ۲، به شدت کاهش می‌یابد. تغییر ویسکوزیته صمغ‌های گوار، پکتین و کربوکی متیل سلولز در شرایط آزمایشگاهی توسط برنلی و همکاران (Brenelli et al., 1997) مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که با افزایش یا کاهش pH محلول صمغ‌ها (شرایط قلیایی یا اسیدی)، ویسکوزیته آنها به صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد (Brenelli et al., 1997). در مطالعه اوزگور و همکاران (Ozgun et al., 2017)، خواص جریانی یک سیستم صمغ سه‌تایی از گزانتان، کربوکی متیل سلولز و پکتین در یک سیستم مدل تهیه شده با اسیدهای آلی شامل اسید سیتریک و تارتاریک و در حضور ساکارز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که کربوکی متیل سلولز بالاترین ضریب قوام را در بین صمغ‌ها در سیستم‌های مدل اسید سیتریک-ساکارز و اسید تارتاریک-ساکارز داشت (Ozgun et al., 2017).

خصوصیات رئولوژیکی هیدروکلوئیدها به دلیل خواص ساختاری و بافتی که در محصولات غذایی ایجاد می‌کنند، بسیار مهم است (Koocheki et al., 2022). در این مطالعه، اثر افزودن اسیدهای آلی خوراکی شامل آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک در دو غلظت ۰/۵٪ و ۱٪ بر تغییر ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی محلول تهیه شده از صمغ دانه بالنگو بررسی شد و داده‌های رفتار جریان محلول‌ها با مدل‌های قانون توان^۷، بینگهام^۸، هرشل بالکلی^۹ و کاسون^{۱۰}، برازش شدند.

مواد و روش‌ها

تولید محلول‌های اسیدی حاوی صمغ دانه بالنگو

در این پژوهش اسیدهای آلی شامل آسکوربیک، تارتاریک، مالیک و سیتریک (ttca، چین) به صورت پودر خریداری و در آب مقطر حل شدند. از هر اسید دو غلظت ۰/۵٪ و ۱٪ تهیه و نمونه حاوی آب مقطر (۰٪ اسید) به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد (Salehi et al., 2024).

برای تهیه صمغ دانه بالنگو، دانه‌های بالنگو از استان همدان تهیه و ناخالصی آن‌ها جداسازی گردید. ابتدا دانه‌های بالنگو به مدت ۲۰ دقیقه درون آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و نسبت آب به دانه برابر ۲۰ به ۱ قرار گرفتند (Satorabi et al., 2021). صمغ خارج شده از دانه‌ها،

6- *Opuntia ficus-indica*

7- Power law

8- Bingham

9- Herschel-Bulkley

10- Casson

1- Pseudoplastic behavior

2- Aliphatic

3- Alicyclic

4- Aromatic

5- Heterocyclic

پایه طرح کاملاً تصادفی انجام و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 تجزیه و تحلیل شد. تمام آزمون‌ها در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

ویسکوزیته ظاهری محلول‌ها

غذاها از نظر ساختاری و رئولوژیکی مواد پیچیده‌ای هستند و در بسیاری از موارد، غذاها از مخلوطی از مواد جامد و همچنین اجزای ساختاری سیال تشکیل شده است (Sharoba & Ramadan, 2011). در این پژوهش داده‌های ویسکوزیته به‌عنوان تابعی از سرعت برشی جمع‌آوری شدند. شکل ۱ نحوه تغییر ویسکوزیته محلول صمغ دانه بالنگو هنگام اعمال برش در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو زمانی که سریع‌تر هم‌زده شود، کمتر می‌شود (رفتار سودوپلاستیکی یا شل شدن برشی). رفتار سودوپلاستیکی به‌دلیل جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری در جهت تنش برشی است که منجر به کاهش برهمکنش‌ها و شکستن پیوندهای قوی در سرعت‌های برشی بالا می‌شود (Behrouzian et al., 2013; Farahnaky et al., 2013). در این مطالعه، ویسکوزیته ظاهری نمونه حاوی ۰/۵ اسید آسکوربیک با افزایش سرعت برشی از ۱۲/۲ بر ثانیه به ۱۷۱/۲ بر ثانیه، از ۹/۳ میلی‌پاسکال ثانیه به ۴/۴ میلی‌پاسکال ثانیه کاهش یافت.

صمغ‌های طبیعی ممکن است خواص نامطلوبی از خود نشان دهند، از جمله سرعت کنترل نشده هیدراتاسیون، حلالیت وابسته به pH، سفت شدن، کاهش ویسکوزیته طی زمان نگهداری و آلودگی میکروبی. عملکرد غیرقابل پیش‌بینی صمغ‌های طبیعی می‌تواند استفاده از این مواد را در کاربردهای خاص محدود کند (Rana et al., 2011). ویسکوزیته محلول صمغ دانه بالنگو در حضور اسیدهای آلی مختلف در جدول ۱ گزارش شده است. افزودن اسیدهای آلی به صمغ دانه بالنگو، ویسکوزیته آن را کاهش داد. این رفتار برای تمام اسیدهای آلی مشاهده شد و ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه بالنگو با افزایش غلظت اسیدهای آلی از ۰ به ۱ درصد کاهش یافت. هم‌راستا با نتایج این پژوهش، یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2022) نیز گزارش کردند که کاهش pH از ۷ به ۳، منجر به کاهش ویسکوزیته ذاتی محلول صمغ دانه قدومه شهری می‌شود و این کاهش ویسکوزیته در شرایط اسیدی قوی را به کاهش وزن مولکولی و کوتاه‌تر شدن طول زنجیره جانبی ماکرومولکول‌ها مرتبط دانسته‌اند (Yousefi et al., 2022).

توسط یک جداکننده آزمایشگاهی جدا (FJ-479، تولیپس، ایران) و سپس توسط آون (شیماز، ایران) در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک و در نهایت با آسیاب، به شکل پودر تبدیل گردید. پودر صمغ آسیاب شده، بسته‌بندی و در جای خشک و خنک نگهداری شد.

برای تهیه محلول‌های مورد استفاده جهت آزمایش‌های رئولوژیکی، ۰/۲ درصد (وزنی/حجمی) از پودر صمغ دانه بالنگو درون محلول تهیه شده از هر اسید به‌صورت کامل حل شد (توسط همزن مغناطیسی، شیماز، ایران). برای تکمیل آگیری صمغ نیز یک ساعت محلول در جای خنک نگهداری شد. برای تهیه نمونه شاهد، ۰/۲ درصد از صمغ در آب مقطر حل و به‌مدت یک ساعت در دمای اتاق نگهداری جهت تکمیل فرآیند آگیری نگهداری شد (Salehi et al., 2024).

اندازه‌گیری ویسکوزیته و تنش برشی

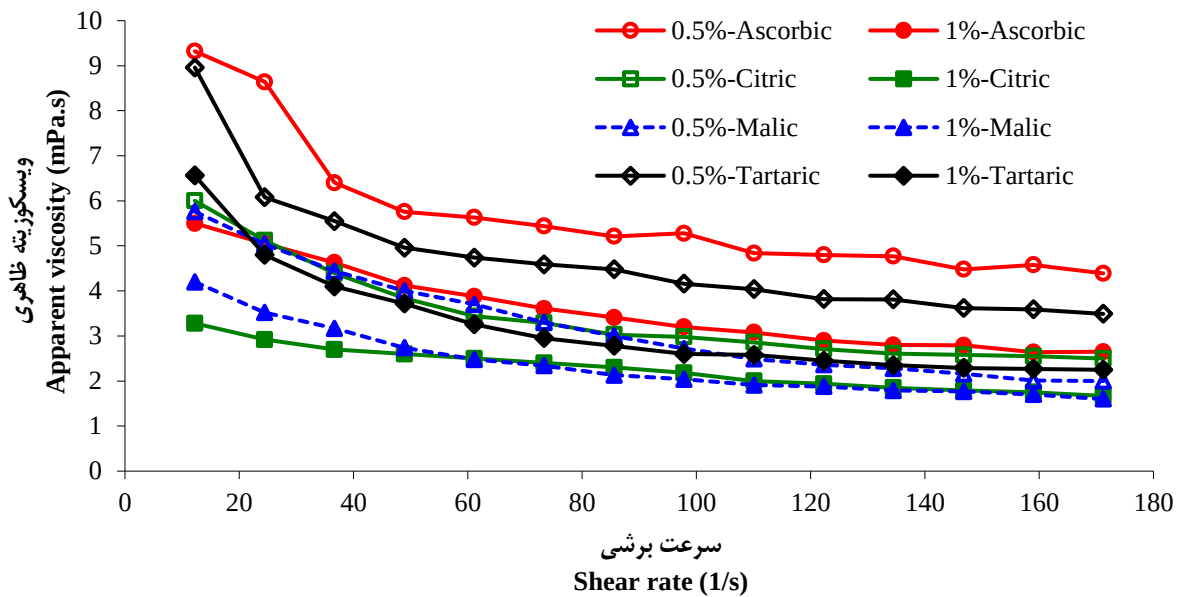
برای اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی محلول‌های حاوی اسید و صمغ دانه بالنگو، از یک ویسکومتر چرخشی (بروکفیلد، DV2T، RV، آمریکا) استفاده شد. با استفاده از این دستگاه، ویسکوزیته و تنش برشی نمونه‌ها در سرعت برشی ۱۲/۲ تا ۱۷۱/۲ بر ثانیه با استفاده از کیت UL آداپتور در دمای ۲۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد (Salehi et al., 2023). برای اندازه‌گیری ویسکوزیته ظاهری محلول‌ها نیز ویسکوزیته نمونه‌ها در سرعت برشی ۴۹ بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

مدل‌های رئولوژیکی

هیدروکلوئیدها و مشتقات آنها عموماً به‌صورت محلول استفاده می‌شوند؛ بنابراین، دانش در مورد خواص رئولوژیکی محلول هیدروکلوئیدی برای ارائه اطلاعات پایه برای کاربردهای مختلف ضروری است (Liu et al., 2016). در این پژوهش از معادلات قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون برای بررسی رفتار رئولوژیکی صمغ‌ها استفاده شد (Salehi & Inanloodoghrouz, 2023).

آنالیز آماری

در این پژوهش اثر چهار اسیدهای آلی در دو غلظت ۰/۵ و ۱ درصد بر تغییر ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه بالنگو بررسی شد. در این پژوهش از مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون برای برازش نتایج تنش برشی و سرعت برشی محلول‌های صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی خوراکی استفاده شد. برای برازش داده‌ها و محاسبه مقادیر ثابت مدل‌ها، از نرم‌افزار متلب (نسخه R2012a) و جعبه ابزار برازش داده‌ها (cftool) استفاده شد. پارامترهای ضریب تبیین (r^2)، مجموع مربعات خطا (SSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر مدل محاسبه و گزارش شد. این پژوهش بر



شکل ۱- تأثیر سرعت برشی بر ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی مختلف
Fig. 1. Impact of shear rate on the apparent viscosity of Balangu seed gum solution containing various organic acids

جدول ۱- تأثیر اسیدهای آلی بر ویسکوزیته ظاهری محلول صمغ دانه بالنگو (سرعت برشی برابر ۴۹ بر ثانیه)
Table 1- Impact of organic acids on the apparent viscosity of Balangu seed gum solution (shear rate=49)

اسید آلی	غلظت اسید	ویسکوزیته ظاهری
Organic acid	Acid concentration	Apparent viscosity (mPa.s)
شاهد	0%	24.96±0.35 ^a
Control		
آسکوربیک		5.33±0.40 ^b
Ascorbic		
سیتریک	0.5%	3.64±0.40 ^c
Citric		
مالیک		3.93±0.25 ^c
Malic		
تارتاریک		5.85±0.74 ^b
Tartaric		
آسکوربیک		3.96±0.11 ^c
Ascorbic		
سیتریک	1%	2.56±0.06 ^d
Citric		
مالیک		3.08±0.27 ^{cd}
Malic		
تارتاریک		3.48±0.62 ^c
Tartaric		

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Different letters within each column represent significance difference ($p < 0.05$).

۵/۸۵ میلی پاسکال ثانیه به ۳/۴۸ میلی پاسکال ثانیه کاهش یافت (سرعت برشی برابر ۴۹ بر ثانیه). امین و همکاران (Amin et al., 2007) پارامترهای رئولوژیکی صمغ دانه دوریان را مطالعه کردند و دریافتند که بیشترین ویسکوزیته صمغ در حالت خنثی است و در مقادیر pH پایین و بالا، ویسکوزیته محلول صمغ به دلیل تخریب زنجیره‌های

بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به محلول حاوی ۱ درصد اسید سیتریک و کمترین آن مربوط به اسید تارتاریک با غلظت ۰/۵ درصد بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید تارتاریک از ۰/۵ به ۱ درصد، ویسکوزیته صمغ دانه بالنگو به صورت معنی داری ($p < 0.05$) از

مدل‌سازی شد و مدل قانون توان به‌عنوان مدل بهتر برای توصیف رفتار جریانی محلول صمغ دانه بالنگو انتخاب شد. جدول ۲ تناسب داده‌های به‌دست آمده از معادلات رئولوژیکی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نتایج براش داده‌های سرعت برشی-تنش برشی نشان داد که ضریب تبیین مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۹۷، ۰/۹۸۲۸، ۰/۹۹۹۷ و ۰/۹۹۵۴ است. این جدول نشان می‌دهد که هر دو معادله قانون توان و هرشل بالکلی در پیش‌بینی روابط بین داده‌های تنش برشی و سرعت برشی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی به یک اندازه مناسب هستند؛ اما چون تعداد پارامترهای مدل قانون توان کمتر است (دو پارامتر) و تنش تسلیم محاسبه شده توسط معادله هرشل بالکلی نزدیک صفر است، لذا مدل قانون توان به‌عنوان مدل مناسب برای بررسی خصوصیات رئولوژیکی محلول‌ها انتخاب شد. نتایج براش داده‌های سرعت برشی-تنش برشی محلول شاهد صمغ دانه بالنگو نشان داد که مجموع مربعات خطا مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۸۷۰، ۰/۰۰۱۶ و ۰/۰۲۳۱ است. مدل قانون توان به‌عنوان معادله مناسب برای بررسی رفتار رئولوژیکی محلول صمغ‌های مختلفی استفاده و به‌عنوان مدل مناسب برای محلول‌های مشابه پیشنهاد شده است (Salehi & Inanloodoghrouz, 2023).

پلیمری تحت شرایط اسیدی و قلیایی کاهش می‌یابد (Amin et al., 2007). مدینا-تورس و همکاران (Medina-Torres et al., 2000) نیز به این نتیجه رسیدند که افزایش ویسکوزیته ظاهری با pH احتمالاً به تغییرات ساختاری در مولکول‌های صمغ مربوط می‌شود. بهروزیان و همکاران (Behrouzian et al., 2013) گزارش کردند که تغییر pH تأثیر کمی بر تغییر ویسکوزیته ظاهری و ضریب قوام صمغ دانه شاهی دارد و کاهش pH از ۵ به ۳ باعث کاهش ۱۷ درصدی در ویسکوزیته ظاهری صمغ دانه شاهی (غلظت برابر ۲٪) شد.

مدل‌سازی رئولوژیکی

مطالعه روی رفتار رئولوژیکی محلول‌ها و مواد غذایی مایع، برای کاربردهای مرتبط با جابجایی، ذخیره‌سازی، فراوری، کنترل کیفیت، پمپاژ، عملیات انتقال حرارت و جرم و تجزیه و تحلیل حسی غذاها مهم است (Sharoba & Ramadan, 2011). در فرآیند مدل‌سازی، مدل‌های بررسی‌شده دارای ضرایبی هستند که با برازش آنها با نتایج آزمایش‌های واقعی، این ضرایب به‌دست می‌آیند (Mullineux & Simmons, 2008). رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو با استفاده از مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون به‌خوبی

جدول ۲- قابلیت برازش معادلات مختلف رئولوژیکی برای داده‌های تنش برشی (پاسکال) آزمایشگاهی (نمونه شاهد)
Table 2- Fitting ability of various rheological equations for experimental shear stress (Pa) data (control sample)

سرعت برشی Shear rate (s ⁻¹)	داده آزمایشگاهی Experimental data	مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف Predicted values by various models			
		قانون توان Power law	بینگهام Bingham	هرشل بالکلی Herschel-Bulkley	کاسون Casson
12.23	0.540	0.523	0.737	0.550	0.647
24.46	0.830	0.782	0.885	0.823	0.859
36.69	1.049	0.991	1.033	1.042	1.042
48.92	1.237	1.171	1.181	1.232	1.210
61.15	1.401	1.333	1.329	1.402	1.368
73.38	1.558	1.483	1.477	1.559	1.519
85.61	1.714	1.622	1.625	1.706	1.666
97.84	1.839	1.753	1.773	1.844	1.808
110.1	1.980	1.877	1.922	1.975	1.947
122.3	2.098	1.996	2.069	2.099	2.083
134.5	2.192	2.109	2.217	2.219	2.217
146.8	2.325	2.219	2.366	2.334	2.349
159	2.450	2.325	2.513	2.445	2.479
171.2	2.575	2.427	2.661	2.553	2.606
مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)		0.0016	0.0870	0.0016	0.0231
ضریب تبیین Correlation coefficient (r)		0.9997	0.9828	0.9997	0.9954
جزر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)		0.0116	0.0851	0.0122	0.0439

مدل قانون توان

سیالات غیر نیوتنی یک رابطه تنش برشی و سرعت برشی را نشان می‌دهند که قانون اصطکاک داخلی نیوتن را به دلیل غیرخطی بودن و تنش تسلیم اولیه نقض می‌کند. سیالات غیر نیوتنی ممکن است یک یا چند ویژگی رئولوژیکی را نشان دهند، به عنوان مثال، سفت شدن برشی، شل شدن برشی، تیکسوتروپی و غیره (Sun et al., 2024). معادله ۱، پارامترهای مربوط به مدل قانون توان را نشان می‌دهد.

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (۱)$$

در این معادله، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s^{-1})، τ تنش برشی (پاسکال)، k ضریب قوام ($Pa.s^n$) و n شاخص رفتار جریان (بدون واحد) هستند (Salehi & Inanloodoghrouz, 2023). در این پژوهش، مدل قانون توان توصیف خوبی از رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی با بیشترین مقدار ضریب تبیین (>0.9406)، و حداقل مجموع مربعات خطا (<0.0090) و جذر میانگین مربعات خطا (<0.0275) برای همه نمونه‌ها داشت (جدول ۳).

وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل توجهی بر تغییرات ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ داشت. در جدول ۳ تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار ضریب قوام محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد اسید، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین ضریب قوام و نمونه‌های حاوی ۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین ضریب قوام بودند. نتایج نشان می‌دهد وقتی غلظت اسید مالیک از ۵٪ به ۱ درصد افزایش یافت، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها به صورت معنی‌داری از $0.29 Pa.s^n$ به $0.16 Pa.s^n$ کاهش یافت ($p < 0.05$). همراه با نتایج این پژوهش، فرحناکی و همکاران (Farahnaky et al., 2013) گزارش کردند که تغییرات pH تأثیر قابل توجهی بر رفتار رئولوژیکی محلول صمغ دانه مرو (۱ درصد) دارد و کمترین مقدار ضریب قوام مربوط به نمونه با pH پایین و اسیدی بود. تغییر در مقدار ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو، به دلیل تغییرات ساختاری صمغ در حضور غلظت‌های مختلف اسیدها می‌باشد. در معادله قانون توان، یک سیال با رفتار شل شدن برشی مقدار شاخص رفتار جریان کمتر از ۱ دارد (Kumar et al., 2021). تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار شاخص رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو در جدول ۳ گزارش شده است. با افزایش غلظت اسید، مقدار شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت (کاهش در رفتار شل شدن برشی). نمونه حاوی ۵٪ اسید اسکوربیک دارای بالاترین مقدار شاخص رفتار جریان و نمونه حاوی ۵٪ اسید مالیک کمترین

مقدار را داشت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید مالیک از ۵٪/۵ درصد به ۱ درصد، شاخص رفتار جریان محلول از ۰/۴۹۴ به ۰/۵۷۳ افزایش می‌یابد.

مدل بینگهام

مدل بینگهام تنش تسلیم محدودی را در نرخ برش صفر نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، برای مدل بینگهام، زمانی که نرخ تغییر شکل کاهش می‌یابد (و به صفر می‌رسد) تا زمانی که تنش از تنش تسلیم فراتر رود، سیال با ویسکوزیته پلاستیکی ثابت جریان می‌یابد. مزیت مدل بینگهام این است که فرصتی را برای تعیین تنش تسلیم که در آن یک سیال شروع به جریان می‌کند ارائه می‌دهد، اما رابطه سازنده خطی مدل، توصیف آن را از رفتار رئولوژیکی سیالات پیچیده‌تر محدود می‌کند (Sun et al., 2024).

در این پژوهش از مدل بینگهام نیز برای بررسی رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی محلول‌های صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی استفاده شد. در معادله ۲، پارامترهای مربوط به مدل بینگهام ذکر شده است.

$$\tau = \tau_{0B} + \eta_B \dot{\gamma} \quad (۲)$$

در این معادله، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s^{-1})، τ تنش برشی (پاسکال)، τ_{0B} تنش تسلیم بینگهام (پاسکال) و η_B ویسکوزیته پلاستیک بینگهام ($Pa.s$) هستند (Salehi & Inanloodoghrouz, 2023). ضرایب و خطاهای مدل بینگهام در جدول ۴ گزارش شد. مقدار ضریب تبیین، حداقل مجموع مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا برای این مدل به ترتیب در محدوده ۰/۸۶۷۴ تا ۰/۹۹۷۶، ۰/۰۰۰۶ تا ۰/۰۹۰۶ و ۰/۰۰۷۲ تا ۰/۰۸۶۹ به دست آمد.

وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل توجهی بر تغییرات تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک بینگهام داشت. در جدول ۴ تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار تنش تسلیم بینگهام محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن اسید به محلول صمغ و در نتیجه کاهش pH آن، مقدار تنش تسلیم مدل بینگهام کاهش یافته است. نمونه حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین تنش تسلیم و نمونه حاوی ۵٪ اسید تارتاریک دارای بیشترین تنش تسلیم بودند. نتایج نشان می‌دهد وقتی غلظت اسید مالیک از ۵٪ به ۱ درصد افزایش یافت، مقدار تنش تسلیم نمونه‌ها به صورت معنی‌داری از ۰/۱۰۴ پاسکال به ۰/۰۷۰ پاسکال کاهش یافت ($p < 0.05$).

جدول ۳- پارامترها و مقادیر خطای مدل قانون توان برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی
Table 3- Parameters and error values of the Power law model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	ضریب قوام Consistency coefficient (Pa.s ⁿ)	شاخص رفتار جریان Flow behavior index	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.127±0.007 ^a	0.577±0.009 ^{de}	0.0016	0.9998	0.0109
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.014±0.002 ^{cd}	0.769±0.023 ^a	0.0031	0.9968	0.0154
سیتریک Citric		0.015±0.005 ^{cd}	0.647±0.067 ^{bcd}	0.0005	0.9980	0.0062
مالیک Malic		0.029±0.008 ^b	0.494±0.064 ^e	0.0037	0.9763	0.0152
تارتاریک Tartaric		0.025±0.006 ^{bc}	0.635±0.045 ^{bcd}	0.0018	0.9977	0.0117
آسکوربیک Ascorbic		0.013±0.003 ^d	0.711±0.058 ^{ab}	0.0005	0.9986	0.0066
سیتریک Citric	1%	0.009±0.001 ^d	0.690±0.045 ^{abc}	0.0004	0.9975	0.0054
مالیک Malic		0.016±0.002 ^{cd}	0.573±0.036 ^{de}	0.0012	0.9930	0.0090
تارتاریک Tartaric		0.017±0.000 ^{cd}	0.589±0.042 ^{cde}	0.0004	0.9974	0.0060

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<0.05)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

توصیف می‌کند (Sharoba & Ramadan, 2011). در بررسی خصوصیات رئولوژیکی مواد غذایی، مدل هرشل بالکلی به مدل‌های قانون توان یا بینگهام ترجیح داده می‌شود، زیرا زمانی که داده‌های تجربی کافی در دسترس باشد، منجر به مدل‌های دقیق‌تر رفتار رئولوژیکی می‌شود (Jannatamani et al., 2022). معادله ۳، پارامترهای مربوط به مدل هرشل بالکلی را نشان می‌دهد.

$$\tau = \tau_{0H} + k_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (3)$$

در این معادله، τ تنش برشی (پاسکال)، τ_{0H} تنش تسلیم (پاسکال)، k_H ضریب قوام (Pa.sⁿ)، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s⁻¹) و n_H شاخص رفتار جریان برای مدل هرشل بالکلی می‌باشند. در این مطالعه، مدل هرشل بالکلی هم مشابه مدل قانون توان توصیف خوبی از رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی با مقدار ضریب تبیین بالا (0.9406)، و مجموع مربعات خطا مناسب (<0.0090) و جذر میانگین مربعات خطا پایین (0.0275) داشت (جدول ۵).

تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار ویسکوزیته پلاستیک (مدل بینگهام) محلول صمغ دانه بالنگو در جدول ۴ گزارش شده است. با افزایش غلظت اسید، مقدار ویسکوزیته پلاستیک نمونه‌ها کاهش یافت. مقدار ویسکوزیته پلاستیک بینگهام برای نمونه شاهد محلول تهیه شده از صمغ دانه بالنگو، برابر 0.119 پاسکال ثانیه بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. نمونه حاوی 0.5٪ اسید آسکوربیک دارای بیشترین مقدار (0.038 پاسکال ثانیه) و نمونه حاوی 0.5٪ اسید مالیک کمترین مقدار (0.014 پاسکال ثانیه) ویسکوزیته پلاستیک را داشتند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید تارتاریک از 0.5 درصد به 1 درصد، ویسکوزیته پلاستیک محلول به‌صورت معنی‌داری از 0.031 پاسکال ثانیه به 0.017 پاسکال ثانیه کاهش یافت (p<0.05).

مدل هرشل بالکلی

مدل هرشل بالکلی منحنی جریان یک ماده با تنش تسلیم و رفتار شل شدن برشی یا سفت شدن برشی در تنش‌های بالاتر از تسلیم را

جدول ۴- پارامترها و مقادیر خطای مدل بینگهام برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی

Table 4- Parameters and error values of the Bingham model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	تنش تسلیم بینگهام Bingham yield stress (Pa)	ویسکوزیته پلاستیک بینگهام Bingham plastic viscosity (Pa.s)	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.590±0.015 ^a	0.0119±0.0002 ^a	0.0881	0.9909	0.0857
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.082±0.011 ^{cd}	0.0038±0.0001 ^b	0.0035	0.9965	0.0170
سیتریک Citric		0.071±0.018 ^{de}	0.0019±0.0002 ^e	0.0022	0.9906	0.0134
مالیک Malic		0.104±0.018 ^{bc}	0.0015±0.0001 ^{ef}	0.0100	0.9363	0.0274
تارتاریک Tartaric		0.123±0.023 ^b	0.0031±0.0001 ^c	0.0054	0.9921	0.0207
آسکوربیک Ascorbic		0.066±0.013 ^{de}	0.0024±0.0002 ^d	0.0029	0.9926	0.0150
سیتریک Citric	1%	0.045±0.004 ^e	0.0015±0.0002 ^{ef}	0.0015	0.9901	0.0110
مالیک Malic		0.070±0.007 ^{de}	0.0014±0.0002 ^f	0.0034	0.9787	0.0161
تارتاریک Tartaric		0.079±0.007 ^{cd}	0.0017±0.0004 ^{ef}	0.0009	0.9951	0.0086

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)Different letters within each column represent significance difference ($p < 0.05$).

یافت، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها به‌صورت معنی‌داری از 0.28 Pa.s^n به 0.16 Pa.s^n کاهش یافت ($p < 0.05$). در معادله هرشل بالکلی هم یک سیال با رفتار شل شدن برشی مقدار شاخص رفتار جریان کمتر از ۱ دارد. با افزایش غلظت اسید، مقدار شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت (کاهش در رفتار سودوپلاستیکی). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید مالیک از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، شاخص رفتار جریان صمغ دانه بالنگو از 0.694 به 0.726 افزایش یافت، البته این افزایش معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید آسکوربیک دارای بالاترین مقدار شاخص رفتار جریان (۰/۸۷۰) و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک کمترین مقدار (۰/۴۹۴) را داشت. بهروزیان و همکاران (Behrouzian et al., 2013) اثر تغییر pH (۳ تا ۹) بر خواص رئولوژیکی صمغ دانه شاهی را بررسی کردند. این پژوهشگران مدل‌های رئولوژیکی مختلف را برای برازش داده‌های تجربی استفاده کردند و مدل هرشل بالکلی را به‌عنوان بهترین

در جدول ۵ تأثیر اسیدهای آلی بر پارامترهای مدل هرشل بالکلی شامل مقدار تنش تسلیم، ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. در این مطالعه مقدار عددی تنش تسلیم در محدوده 10^{-11} تا 10^{-2} پاسکال تا 7.54×10^2 پاسکال به‌دست آمد.

ضریب قوام درجه مقاومت سیال در برابر جاری شدن را نشان می‌دهد. وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات ضریب قوام و شاخص رفتار جریان محلول صمغ داشت. مقدار ضریب قوام برای نمونه شاهد برابر 0.129 Pa.s^n بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. با افزایش درصد اسید، مقدار ضریب قوام نمونه‌ها کاهش یافت. نمونه حاوی ۱٪ اسید تارتاریک دارای کمترین ضریب قوام (0.008 Pa.s^n) و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین ضریب قوام (0.28 Pa.s^n) بودند. نتایج نشان داد وقتی غلظت اسید مالیک از ۰/۵ به ۱ درصد افزایش

مدل برای بررسی خصوصیات رئولوژیکی صمغ دانه شاهی معرفی کردند (Behrouzian et al., 2013).

جدول ۵- پارامترها و مقادیر خطای مدل هرشل بالکلی برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی
Table 5- Parameters and error values of the Herschel-Bulkley model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	تنش تسلیم Yield stress (Pa)	ضریب قوام Consistency coefficient (Pa.s ⁿ)	شاخص رفتار جریان Flow behavior index	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.00033 ^b	0.129±0.005 ^a	0.577±0.009 ^{cd}	0.0016	0.9998	0.0114
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.04024 ^a	0.009±0.003 ^c	0.870±0.080 ^a	0.0024	0.9976	0.0144
سیتریک Citric		0.00602 ^b	0.013±0.005 ^c	0.667±0.071 ^{bc}	0.0005	0.9981	0.0063
مالیک Malic		0.00000 ^b	0.028±0.008 ^b	0.494±0.064 ^d	0.0037	0.9763	0.0154
تارتاریک Tartaric		0.02907 ^{ab}	0.018±0.005 ^c	0.694±0.041 ^{bc}	0.0016	0.9976	0.0114
آسکوربیک Ascorbic	1%	0.00185 ^b	0.012±0.003 ^c	0.717±0.066 ^b	0.0005	0.9986	0.0068
سیتریک Citric		0.00003 ^b	0.009±0.001 ^c	0.690±0.045 ^{bc}	0.0004	0.9975	0.0057
مالیک Malic		0.00000 ^b	0.016±0.002 ^c	0.573±0.036 ^{cd}	0.0012	0.9930	0.0090
تارتاریک Tartaric		0.03691 ^a	0.008±0.001 ^c	0.726±0.021 ^b	0.0002	0.9985	0.0046

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است (p<۰/۰۵)

Different letters within each column represent significance difference (p<0.05).

مدل کاسون

مدل کاسون اساساً نیمه تجربی است و مبتنی بر در نظر گرفتن یک سوسپانسیون به‌عنوان سیستمی از ذرات است که تمایل به تشکیل ساختارهای زنجیره مانند دارند. مدل کاسون برای مطالعه و مدل‌سازی خصوصیات رئولوژیکی بسیاری از محصولات غذایی مانند شکلات، ماست، سس گوجه‌فرنگی و سایر مایعات پیچیده تحت شرایط حالت پایدار تقریب خوبی دارد (Sun et al., 2024). معادله ۴، پارامترهای مربوط به مدل کاسون را نشان می‌دهد.

$$\tau^{0.5} = \tau_{0C}^{0.5} + \eta_C \dot{\gamma}^{0.5} \quad (4)$$

در معادله ۴، $\dot{\gamma}$ سرعت برشی (s^{-1})، τ تنش برشی (پاسکال)، τ_{0C} تنش تسلیم کاسون (پاسکال) و η_C ویسکوزیته پلاستیک کاسون (Pa.s) هستند. پارامترها (تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک) و مقادیر خطای مدل کاسون برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی در جدول ۶ گزارش شده است. در این پژوهش

متوسط مقدار ضریب تبیین، حداقل مجموع مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا برای مدل کاسون به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۱۴، ۰/۰۰۴۶ و ۰/۰۱۵۳ بود.

وجود اسیدهای آلی در محلول حاوی صمغ دانه بالنگو تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک کاسون داشت. در جدول ۶ تأثیر اسیدهای آلی بر مقدار تنش تسلیم کاسون محلول صمغ دانه بالنگو گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن اسید به محلول صمغ و در نتیجه کاهش pH آن، مقدار تنش تسلیم مدل کاسون کاهش یافته است. مقدار تنش تسلیم برای نمونه شاهد برابر ۰/۲۶۲ پاسکال بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. نمونه حاوی ۱٪ اسید سیتریک دارای کمترین تنش تسلیم و نمونه حاوی ۰/۵٪ اسید مالیک دارای بیشترین تنش تسلیم بودند. نتایج نشان داد وقتی غلظت اسید مالیک از ۰/۵ به ۱ درصد افزایش

یافت، مقدار تنش تسلیم نمونه‌ها به صورت معنی‌داری از ۰/۰۵۵ پاسکال به ۰/۰۳۲ پاسکال کاهش یافت ($p < ۰/۰۵$). همچنین، با افزایش غلظت اسید، مقدار ویسکوزیته پلاستیک نمونه‌ها کاهش یافت. مقدار ویسکوزیته پلاستیک کاسون برای نمونه شاهد محلول تهیه شده از صمغ دانه بالنگو، برابر ۰/۰۸۳ پاسکال ثانیه بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های حاوی اسید داشت. نمونه حاوی ۵٪ اسید آسکوربیک دارای بیشترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک (۰/۰۵۴ پاسکال ثانیه) و نمونه حاوی ۵٪ اسید مالیک کمترین (۰/۰۲۸ پاسکال ثانیه) مقدار را داشت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید آسکوربیک از ۵٪ به ۱ درصد، ویسکوزیته پلاستیک محلول به صورت معنی‌داری از ۰/۰۵۴ پاسکال ثانیه به ۰/۰۴۲ پاسکال ثانیه کاهش یافت ($p < ۰/۰۵$).

جدول ۶- پارامترها و مقادیر خطای مدل کاسون برای خواص رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو حاوی اسیدهای آلی
Table 6- Parameters and error values of the Casson model for the rheological properties of Balangu seed gum solution containing organic acids

اسید آلی Organic acid	غلظت اسید Acid concentration	تنش تسلیم کاسون Casson yield stress (Pa)	ویسکوزیته پلاستیک کاسون Casson plastic viscosity (Pa.s)	مجموع مربعات خطا Sum of squared error (SSE)	ضریب تبیین Correlation coefficient (r)	جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error (RMSE)
شاهد Control	0%	0.262±0.012 ^a	0.083±0.001 ^a	0.0240	0.9975	0.0448
آسکوربیک Ascorbic	0.5%	0.016±0.011 ^d	0.054±0.001 ^b	0.0027	0.9973	0.0145
سیتریک Citric		0.028±0.011 ^{cd}	0.035±0.003 ^{de}	0.0010	0.9959	0.0087
مالیک Malic		0.055±0.015 ^b	0.028±0.003 ^e	0.0065	0.9588	0.0214
تارتاریک Tartaric		0.049±0.014 ^{bc}	0.044±0.001 ^c	0.0025	0.9963	0.0141
آسکوربیک Ascorbic	1%	0.021±0.008 ^d	0.042±0.003 ^{cd}	0.0013	0.9966	0.0101
سیتریک Citric		0.015±0.003 ^d	0.028±0.008 ^e	0.0008	0.9949	0.0077
مالیک Malic		0.032±0.005 ^{cd}	0.029±0.003 ^e	0.0020	0.9880	0.0120
تارتاریک Tartaric		0.034±0.001 ^{bcd}	0.032±0.005 ^e	0.0003	0.9984	0.0046

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < ۰/۰۵$)

Different letters within each column represent significance difference ($p < 0.05$).

نتیجه‌گیری

(۰/۹۴۰۶)، و حداقل مجموع مربعات خطا (۰/۰۰۹۰) و جذر میانگین مربعات خطا (۰/۰۲۷۵) برای همه نمونه‌ها، عملکرد خوبی داشت. با افزایش درصد اسید، مقدار ضریب قوام (مدل‌های قانون توان و هرشل بالکلی) نمونه‌ها کاهش یافت. با افزایش غلظت اسید، مقدار شاخص رفتار جریان اکثر نمونه‌ها افزایش یافت (کاهش در رفتار سودوپلاستیکی). با افزودن اسید به محلول صمغ و در نتیجه کاهش pH آن، مقدار تنش تسلیم مدل‌های بینگهام و کاسون کاهش یافته است. همچنین با افزایش غلظت اسید، مقدار ویسکوزیته پلاستیک (مدل‌های بینگهام و کاسون) نمونه‌ها کاهش یافت.

میزان مشارکت نویسندگان

در این پژوهش، تأثیر اسیدهای آلی خوراکی شامل آسکوربیک، سیتریک، مالیک و تارتاریک در دو غلظت ۵٪ و ۱ درصد بر ویسکوزیته و پارامترهای رئولوژیکی محلول صمغ دانه بالنگو مورد بررسی قرار گرفت. محلول‌های ۲٪ درصد صمغ دانه بالنگو (شاهد و نمونه‌های حاوی اسید) رفتار سودوپلاستیکی از خود نشان دادند و با افزایش سرعت برشی، ویسکوزیته آنها کاهش یافت. با افزایش درصد اسیدهای آلی، ویسکوزیته محلول‌ها کاهش یافت و بیشترین کاهش ویسکوزیته مربوط به اسید سیتریک ۱ درصد بود. رفتار رئولوژیکی محلول‌ها با استفاده از مدل‌های قانون توان، بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون مدل‌سازی شد. مدل قانون توان با بیشترین مقدار ضریب تبیین

این مقاله بخشی از یک پروژه تحقیقاتی است که در سال ۱۴۰۲ در دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. هزینه‌های انجام این پژوهش از محل پژوهانه به شماره ۴۰۲۱۷۴، تأمین شده از سوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا، پرداخت شده است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا جهت حمایت مالی از این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

فخرالدین صالحی: مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، تأمین مالی، تحقیق و بررسی، مدیریت پروژه، نرم‌افزار، نظارت، اعتبارسنجی، نوشتن - پیش‌نویس اصلی، نوشتن - بررسی و ویرایش. **مریم تشکری و کیمیا ثمری:** مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن - پیش‌نویس اصلی.

منابع تأمین مالی

References

- Amin, A.M., Ahmad, A.S., Yin, Y.Y., Yahya, N., & Ibrahim, N. (2007). Extraction, purification and characterization of durian (*Durio zibethinus*) seed gum. *Food Hydrocolloids*, 21(2), 273-279. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.04.004>
- Behrouzian, F., Razavi, S.M.A., & Karazhiyan, H. (2013). The effect of pH, salts and sugars on the rheological properties of cress seed (*Lepidium sativum*) gum. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(12), 2506-2513. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12242>
- Brenelli, S., Campos, S., & Saad, M. (1997). Viscosity of gums in vitro and their ability to reduce postprandial hyperglycemia in normal subjects. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 30(12), 1437-1440. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X1997001200009>
- Farahnaky, A., Shanesazzadeh, E., Mesbahi, G., & Majzoobi, M. (2013). Effect of various salts and pH condition on rheological properties of *Salvia macrosiphon* hydrocolloid solutions. *Journal of Food Engineering*, 116(4), 782-788. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.036>
- Hayta, M., Dogan, M., & Aslan Türker, D. (2020). Rheology and microstructure of galactomannan-xanthan gum systems at different pH values. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13573. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13573>
- Jannatamani, H., Motamedzadegan, A., Farsi, M., & Yousefi, H. (2022). Rheological properties of wood/bacterial cellulose and chitin nano-hydrogels as a function of concentration and their nano-films properties. *IET Nanobiotechnology*, 16(4), 158-169. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12083>
- Kang, J., Yue, H., Li, X., He, C., Li, Q., Cheng, L., Zhang, J., Liu, Y., Wang, S., & Guo, Q. (2023). Structural, rheological and functional properties of ultrasonic treated xanthan gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125650. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125650>
- Koocheki, A., Hesarinejad, M.A., & Mozafari, M.R. (2022). *Lepidium perfoliatum* seed gum: investigation of monosaccharide composition, antioxidant activity and rheological behavior in presence of salts. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 61. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00322-2>
- Kumar, Y., Roy, S., Devra, A., Dhiman, A., & Prabhakar, P.K. (2021). Ultrasonication of mayonnaise formulated with xanthan and guar gums: Rheological modeling, effects on optical properties and emulsion stability. *LWT*, 149, 111632. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111632>
- Liu, J., Shen, J., Shim, Y.Y., & Reaney, M.J.T. (2016). Carboxymethyl derivatives of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) gum: characterisation and solution rheology. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(2), 530-541. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12985>
- Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5), 417-424. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00015-1)
- Mullineux, G., & Simmons, M.J.H. (2008). Influence of rheological model on the processing of yoghurt. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.015>
- Nor Hayati, I., Wai Ching, C., & Rozaini, M.Z.H. (2016). Flow properties of o/w emulsions as affected by xanthan gum, guar gum and carboxymethyl cellulose interactions studied by a mixture regression modelling. *Food Hydrocolloids*, 53, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.04.032>
- Nour, V., Trandafir, I., & Ionica, M.E. (2010). HPLC organic acid analysis in different citrus juices under reversed phase conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(1), 44-48. <https://doi.org/10.15835/nbha.43.2.10081>

15. Ozgur, A., Dogan, M., & Karaman, S. (2017). Rheological interactions of the xanthan gum and carboxymethyl cellulose as alternative to pectin in organic acid–sucrose model system: simplex lattice mixture design approach. *European Food Research and Technology*, 243(6), 1041-1056. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2809-7>
16. Rana, V., Rai, P., Tiwary, A.K., Singh, R.S., Kennedy, J.F., & Knill, C.J. (2011). Modified gums: Approaches and applications in drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 83(3), 1031-1047. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.010>
17. Salehi, F. (2020). Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: A review. *Journal of Texture Studies*, 51(2), 361-370. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12482>
18. Salehi, F., & Inanloodoghous, M. (2023). Rheological properties and color indexes of ultrasonic treated aqueous solutions of basil, *Lallemantia*, and wild sage gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127828. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127828>
19. Salehi, F., Razavi Kamran, H., & Goharpour, K. (2023). Production and evaluation of total phenolics, antioxidant activity, viscosity, color, and sensory attributes of quince tea infusion: Effects of drying method, sonication, and brewing process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 99, 106591. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106591>
20. Salehi, F., Samary, K., & Tashakori, M. (2024). Influence of organic acids on the viscosity and rheological behavior of guar gum solution. *Results in Engineering*, 22, 102307. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102307>
21. Satorabi, M., Salehi, F., & Rasouli, M. (2021). The influence of xanthan and balangu seed gums coats on the kinetics of infrared drying of apricot slices: GA-ANN and ANFIS modeling. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 468-480. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1898520>
22. Sharoba, A.M., & Ramadan, M.F. (2011). Rheological behavior and physicochemical characteristics of goldenberry (*Physalis peruviana*) juice as affected by enzymatic treatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(2), 201-219. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00471.x>
23. Sun, H., Jiang, Y., Zhang, Y., & Jiang, L. (2024). A review of constitutive models for non-Newtonian fluids. *Fractional Calculus and Applied Analysis*. <https://doi.org/10.1007/s13540-024-00294-0>
24. Yildiz, F. (2010). Food acids: Organic acids, volatile organic acids, and phenolic acids, in: Yildiz, F. (Ed.), *Advances in Food Biochemistry*, 1st Edition ed. CRC Press, Boca Raton, p. 28. <https://doi.org/10.1201/9781420007695-15>
25. Yousefi, A., Elmarhoum, S., Khodabakhshaghdam, S., Ako, K., & Hosseinzadeh, G. (2022). Study on the impact of temperature, salts, sugars and pH on dilute solution properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum. *Food Science & Nutrition*, 10(11), 3955-3968. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2991>

Improving the Physico-mechanical Properties of Extruded Rice Based on Mixed Rice-quinoa Flours Using Pickering Emulsion-filled Gel Containing Beta-carotene

M. Davtalab¹, S. Naji-Tabasi^{1*}, M. Shahidi-Noghabi²

1- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran
(* - Corresponding Author Email: s.najitabasi@rifst.ac.ir)

2- Department of Green Technologies in Food Production and Processing, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran

Received: 31.08.2024	How to cite this article: Davtalab, M., Naji-Tabasi, S., & Shahidi-Noghabi, M. (2025). Improving the physico-mechanical properties of extruded rice based on mixed rice-quinoa flours using Pickering emulsion-filled gel containing beta-carotene. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 21(2), 179-198. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.89650.1361
Revised: 12.12.2024	
Accepted: 25.12.2024	
Available Online: 23.04.2025	

Introduction

Rice is a strategic product and considered as staple food of over half of the world's population particularly in Iran. Considering the high levels of rice waste, including broken grains or those of lower quality, it can be utilized for producing value-added foods and reducing waste. Extrusion is a process widely used to improve food products and develop fortified foods. Quinoa flour is rich in phenols, and can be utilized to produce fortified extruded rice. The extrusion of gluten free flours like rice and quinoa has different challenges. In this study, sodium alginate was used to prepare emulsion filled gel to enhance the stability of Pickering emulsions containing β -carotene and also structuring rice during extrusion process. Pickering emulsion is one of the encapsulation methods suitable for encapsulating lipophilic compounds like β -carotene. Emulsion-filled gels, developed using hydrocolloid mixtures, significantly enhance emulsion stability and make them suitable for aqueous food environments. Finally, extruded rice based on a mixture of rice- quinoa flours and fortified with beta-carotene was prepared, and its physico-mechanical properties were evaluated.

Materials and Methods

Pickering emulsions were stabilized using whey protein- cress gum soluble complex nanoparticles. Beta-carotene was dissolved in the oil phase at a concentration of 0.1%. Subsequently, 4% (w/v) sodium alginate was used to develop emulsions filled-gel.

The Pickering emulsion was dispersed in the sodium alginate gel at a ratio of 15:85. Extruded rice was then prepared using an equal ratio (50:50) of broken rice flour and quinoa flour via a cold extruder. To evaluate the impact of the gel-filled emulsion on improving the characteristics of rice grains, different concentrations (30%, 35%, and 40% w/w) of the gel-filled emulsion (based on flour weight) were added to the mixture. The physico-mechanical tests (moisture content, ash content, optimum cooking time, water absorption ratio, cooking loss, lateral expansion, textural characteristics of rice, color properties, sensory analysis, structural morphology, Beta-carotene stability) were conducted. Duncan test was utilized to identify statistically significant differences ($p < 0.05$) among the means, while one-way analysis of variance (ANOVA) was employed to investigate the impact of various factors.

Results and Discussion

The incorporation of emulsions filled-gel into quinoa-rice blend significantly influenced the physico-



©2025 The author(s). 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.2024.89650.1361>

mechanical properties of extruded rice. As the concentration of emulsions filled-gel increased from 30% to 40% (w/w), there was a significant increase in moisture content, ash content, expansion ratio, and cooking time. Extruded rice samples with emulsion-filled gel exhibited significantly greater β -carotene stability than those without, both after cooking and during storage. Conversely, adhesiveness decreased while hardness increased with increasing emulsion filled-gel concentrations. The control sample exhibiting the highest adhesiveness and lowest hardness. The lightness of the extrudates was also improved with increasing emulsion filled-gel levels, reaching a maximum at 40% (w/w). Sensory evaluation revealed that the 40% emulsion filled-gel level was the most preferred sample by panelists. The optimized extruded rice closely resembled natural Hashemi rice in terms of sensory and textural properties.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the addition of emulsions filled-gel enriched with beta-carotene can effectively enhance the physico-mechanical properties of extruded quinoa-rice blends. Specifically, increasing the emulsion concentration resulted in improving expansion, textural, and appearance properties of the rice. 40% emulsion filled-gel was found to be optimal, resulting in a product with desirable sensory attributes. This research proposes that extruded rice based on mixed rice-quinoa flours enriched with beta-carotene-loaded emulsion-filled gel can provide a nutritious and appealing alternative to broken rice products, leveraging the nutritional benefits of quinoa. Sensory and textural evaluation revealed that the extruded rice exhibited sensory properties highly similar to natural Hashemi rice, coupled with favorable cooking characteristics. Consequently, it can be introduced as a suitable substitute for natural rice.

Keywords: β -carotene, Cress seed gum, Pickering, Quinoa, Whey protein

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۷۹-۱۹۸

بهبود خصوصیات فیزیکومکانیکی برنج اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج با استفاده از ژل پرشده-امولسیون پیکرینگ حاوی بتاکاروتن

مریم داوطلب^۱- سارا ناجی طبسی^{۱*}  - مصطفی شهیدی نوقابی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

چکیده

این تحقیق به بررسی اثر بهبوددهندگی ژل پرشده امولسیونی حاوی بتاکاروتن بر پارامترهای کیفی برنج اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج پرداخته است. برنج اکستروژده حاوی سطح‌های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) تهیه شد و با نمونه برنج اکستروژده بدون حضور ژل پرشده امولسیونی (نمونه کنترل) مورد مقایسه قرار گرفت. ژل پرشده امولسیونی با استفاده از بستر ژلی آلزینات سدیم (غلظت ۴ درصد وزنی-وزنی) و امولسیون پیکرینگ (۱۵ درصد حجمی/حجمی) حامل بتاکاروتن با غلظت ۰/۱ درصد) تهیه گردید. با افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی از ۳۰ به ۴۰ درصد وزنی-وزنی، افزایش در میزان رطوبت، خاکستر، افزایش قد و زمان پخت دانه‌های برنج اکستروژده مشاهده شد. در مقابل کاهش چسبندگی و افزایش سختی با افزایش افزودن غلظت ژل پر شده امولسیونی همراه بود. نمونه کنترل بیشترین چسبندگی و کمترین سختی را نشان داد. شفافیت دانه‌های برنج اکستروژده نیز با افزایش سطح ژل پرشده امولسیونی بهبود یافت و در سطح ۴۰ درصد به حداکثر رسید. ارزیابی حسی نشان داد که نمونه با سطح ۴۰ درصد وزنی-وزنی ژل پر شده امولسیونی بیشترین امتیاز را از نظر پذیرش کلی و سایر پارامترهای حسی داراست. مقایسه خواص حسی و بافتی نمونه بهینه برنج اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج با برنج طبیعی واریته هاشمی، خواص حسی نزدیک به نمونه طبیعی و ویژگی‌های پخت مناسب را نشان داد و در نتیجه می‌توان آن را به‌عنوان جایگزینی مناسب برای برنج طبیعی معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: بتاکاروتن، پیکرینگ، پروتئین آب پنیر، صمغ دانه شاهی، کینوا

مقدمه

(2019). فرایند اکستروژن روشی است که امروزه کاربرد زیادی در بهبود ارزش غذایی محصولات غذایی و یا توسعه غذاهای غنی شده دارد. کمک به تولید محصولات متنوع با خواص بافتی ویژه مانند انبساط، تردی و احساس دهانی از دیگر کاربردهای فرایند اکستروژن هست. این روش با استفاده از نیروهای مکانیکی، فشار و دما سبب تغییر در ساختار مولکولی نشاسته و پروتئین می‌شود زیرا در فرایند اکستروژن، نشاسته موجود در مواد اولیه ژلاتینه شده و پروتئین‌ها دناتوره می‌شوند که در نهایت سبب ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی در مواد اولیه شده

برنج یک محصول استراتژیک در کشور و از اصلی‌ترین زنجیره‌های غذایی است. برنج آسیاب نشده یک منبع غنی از مواد مغذی ماکرو و میکرو است که طی آسیاب برنج، چربی و لایه‌های سیوس غنی از ریزمغذی‌ها حذف می‌شوند و برنج سفید غنی از نشاسته تولید می‌شود. از این‌رو توجه به برنج به‌عنوان ماده غذایی هدف برای غنی‌سازی حائز اهمیت است (Waterhouse & Sun-Waterhouse, 2019).

۱- گروه نانوفناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: s.najitabasi@rifst.ac.ir)

۲- گروه فناوری‌های سبز مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

ژل‌پُر شده امولسیون^۳ نامیده می‌شوند، قطرات امولسیون در بستر هیدروژلی پراکنده می‌شوند اما در دسته دوم، قطرات امولسیون در کنار هم تجمع یافته و به صورت قطرات چربی بزرگتری در بستری هیدروژلی جای خواهند گرفت که ژل پُر شده امولسیونی ذره‌ای^۴ نامیده می‌شوند (Farjami & Madadlou, 2019). در این نوع از ژل‌های پُر شده امولسیونی، به دلیل پراکندگی قطرات امولسیون در بستر پلیمری، مقادیر کمتری از ترکیب روغنی جهت ایجاد طعم و یا ویژگی‌های عملکردی مورد نیاز است که از این ویژگی جهت تولید غذاهای کم کالری و رژیمی می‌توان استفاده کرد (Nourbehesht, Shekarchizadeh, & Soltanizadeh, 2018). کارتنوئیدها رنگدانه‌های طبیعی هستند که در میوه و سبزیجات یافت می‌شوند. مطالعات نشان داده است مصرف منظم بتاکاروتن در مواد غذایی ممکن است خطر ابتلا به بیماری‌هایی مانند آب مروارید، بیماری‌های قلبی عروقی و برخی از انواع سرطان‌ها را کاهش دهد. بتاکاروتن مهمترین پیش‌ساز ویتامین A می‌باشد و همچنین به عنوان یک ترکیب آنتی‌اکسیدانی جهت کاهش رادیکال‌های آزاد می‌تواند عمل کند (Radu, Litescu, Albu, Teodor, & Truica, 2012). اما حلالیت کم بتاکاروتن در آب، کاربرد و قابلیت دسترسی زیستی آن را محدود می‌کند. همچنین مولکول‌های کاروتن حاوی پیوندهای دوگانه کونژوگه هستند که حساس به اشعه ماوراء بنفش، گرمایش، یون‌ها و اکسیژن هستند (Rostamabadi, Falsafi, & Jafari, 2019). نانوذرات هیدروژلی کمپلکس پروتئین-کربوهیدرات به عنوان پایدارکننده در امولسیون‌های پیکرینگ موفق‌تر هستند و با قابلیت شکل‌پذیری و ویسکوزیته سطحی رفتار پایدارکنندگی را افزایش می‌دهند (Semenova, 2017).

دانه شاهی^۵ حاوی مقادیر زیادی موسیلاژ است. وجود قند مانوز فراوان در این هیدروکلوئید، پیوندهای بین زنجیره‌ای بیشتری را در این پلیمر ایجاد کرده و به آن خاصیت ژل دهنده می‌بخشد (Naji, Razavi, & Karazhiyan, 2012). پروتئین آب پنیر به دلیل دو خاصیت ژل دهنده و امولسیفیری، برای تولید سامانه ژل امولسیونی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. پروتئین آب پنیر قابلیت تشکیل ژل به روش‌های مختلف سرد و گرم را داراست که تشکیل ژل به روش سرد برای درون پوشانی ترکیبات حساس به حرارت مناسب‌تر است (Iqbal, Chen, Kirk, & Huang, 2020).

از این رو در این پژوهش برای تولید برنج غنی‌سازی شده از ساختار ژل پُر شده-امولسیون پیکرینگ حاوی بتاکاروتن استفاده شد. با هدف کاهش مصرف مقادیر زیاد امولسیفایرهایی که اثرات منفی بر سلامت

و محصول نهایی با خواص مورد نظر تولید می‌شود (Tangjaidee, Xiang, Yin, Wen, & Quek, 2019). کینوا یکی از انواع غلاتی هست که برای تولید محصولات بدون گلوتن استفاده می‌شود. کینوا سرشار از فنل است که به دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی بالا، خاصیت ضد التهابی و عملکردهای بیولوژیکی خاص، برای سلامت انسان مفید است. چالش استفاده از غلات بدون گلوتن در تولید این نوع محصولات، ویژگی‌های ساختاری خاص آن‌هاست که تولید محصولات غذایی با کیفیت مورد نظر را سخت می‌کند (Godoy, 2015).

انکپسولاسیون، قابلیت حفاظت و پوشش‌دهندگی طیف گسترده‌ای از ترکیبات مورد نظر بوسیله تعبیه آن‌ها درون بستر محافظتی را دارد. از جمله ویژگی‌های یک فرآیند انکپسولاسیون مطلوب، قابلیت پخش شدن ترکیبات چربی دوست در محیط‌های آبی، حفظ کردن ترکیبات مورد نظر از دسترس مواد واکنش دهنده نامطلوب، قابلیت دستکاری و اصلاح مواد، دستیابی به انتشار هدفمند، بهبود ثبات ذخیره‌سازی مواد، پوشش‌دهندگی طعم یا بو می‌باشد (Rehman et al., 2019). گروه بزرگی از ترکیبات غذایی ارزشمند مانند انواع ویتامین‌ها، ترکیبات مولد عطر و طعم و ... را ترکیبات چربی دوست تشکیل می‌دهند. روش تولید امولسیون معمولاً برای انتقال ترکیبات چربی دوست کاربرد زیادی دارد زیرا تحقیقات نشان داده عملکرد مطلوب آن در پایداری شیمیایی و کنترل رهایش هدفمند قابل توجه است (Buyukkestelli & El, 2019). امولسیون پیکرینگ^۱ نوعی از امولسیون هست که توسط ذرات جامد تثبیت می‌شوند و مانند سایر روش‌های تولید امولسیون نیازی به پایدارسازی با سورفاکتانت‌های مصنوعی (مانند تویین) یا با منشاء حیوانی (مانند پروتئین تخم مرغ و شیر) ندارند (Wang et al., 2017). از سوی دیگر گزارش شده در مقایسه با امولسیون‌های تثبیت شده با سورفاکتانت‌های معمول، پیکرینگ امولسیون‌ها در برابر در هم آمیختگی و پدیده تکامل استوالت^۲ مقاوم‌ترند (Zhu, 2019).

امولسیون پیکرینگ مانند همه انواع امولسیون‌ها، از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدارند و از سوی دیگر به دلیل اینکه بیشتر در حالت مایع می‌باشند کاربرد آن‌ها در فرمولاسیون‌های پیچیده مواد غذایی اصولاً یک چالش است (Lim et al., 2020). استفاده از یک شبکه سه بعدی هیدروژلی که دارای اتصالات عرضی است می‌تواند قطرات امولسیون را در خود جای دهد و باعث عدم تحرک قطرات در این بستر شود. یک ژل پُر شده امولسیونی قابلیت انتقال هر دو دسته از ترکیبات آبدوست و آبگریز را دارد (Taheri & Jafari, 2019). ژل‌های پُر شده امولسیونی به طور کلی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند، دسته اول که

4- Emulsion particulate gels

5- Garden Cress

1- Pickering emulsion

2- Ostwald ripening

3- Emulsion-filled gels

روش تولید امولسیون پیکرینگ

نمونه‌های امولسیون پیکرینگ توسط نانوذرات پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی در غلظت ۱ درصد (وزنی/حجمی) به‌عنوان فاز پیوسته امولسیون پیکرینگ تهیه شدند. نسبت روغن ذرت (۱۵ درصد حجمی/حجمی) به محلول حاوی نانو ذرات جامد (۸۵ درصد حجمی/حجمی) اضافه شد. سپس امولسیون‌ها با استفاده از دستگاه اولتراتوراکس (T25 digital Ultraturrax, آلمان) در سرعت ۱۷۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه همگن شدند. سپس تیمار امولسیون‌های ثانویه با استفاده از دستگاه فراصوت (VCX750, SONICS Company, England) در دامنه ۴۵ درصد با پالس ۳ ثانیه و پالس ۳ ثانیه خاموش، به مدت ۵ دقیقه انجام شد و در حمام آب و یخ تیماردهی شد (Davtalab et al., 2024).

روش تولید ژل پر شده امولسیونی

ژل پر شده امولسیونی بارگذاری شده با ترکیب مغذی β کاروتن، با استفاده از آلژینات سدیم به‌عنوان بستر پلیمری، امولسیون پیکرینگ پایدار شده با پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی حامل β کاروتن و کلرید کلسیم به‌عنوان عامل اتصال عرضی بین پرکننده (امولسیون پیکرینگ) و بستر ژلی تهیه شد. ابتدا پودر آلژینات سدیم با غلظت ۴ درصد وزنی-حجمی در آب مقطر حل شد و پس از یک شبانه روز هیدراته شدن مورد استفاده قرار گرفت. سپس امولسیون پیکرینگ با نسبت ۱۵ درصد حجمی/حجمی طبق روش گزارش شده در پژوهش پیشین تهیه و به تدریج به آن اضافه شد. کلرید کلسیم با غلظت ۱ درصد وزنی/حجمی تهیه و برای تشکیل اتصالات عرضی به سیستم ژل پر شده امولسیونی اضافه شد (Davtalab et al., 2024).

روش تهیه برنج

برنج اکستروژده، با استفاده از آرد برنج شکسته و آرد کینوا با نسبت برابر (۵۰:۵۰) و به روش اکستروژدر سرد تهیه شد. قطر خروجی نازل، یک میلی‌متر و مقدار رطوبت خوراک برابر با ۱۲ درصد بود. سایر مواد تشکیل‌دهنده خمیر برنج (بر اساس وزن آرد) شامل ۲ درصد کلسیم کلرید، ۰/۵ درصد سدیم کلرید، ۰/۶۵ درصد امولسیفایر، ۰/۵ درصد شکر و ۱۵ درصد نشاسته ذرت بودند که در همزن باهم مخلوط شدند. سپس با هدف ارزیابی تأثیر ژل پر شده امولسیونی بر بهبود ویژگی‌های دانه برنج، غلظت‌های مختلف (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) ژل پر شده امولسیونی (بر پایه وزن آرد) به مخلوط اضافه شد. همچنین نمونه کنترلی بدون حضور ژل پر شده امولسیونی نیز تهیه شد. خمیر نهایی به مدت ۱۰ دقیقه ورز داده شد و به مخزن اکستروژدر منتقل و تحت فشار قرار گرفت. محصول اکستروژده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت

انسان دارد از نانوذرات تهیه شده بر پایه کمپلکس محلول پروتئین آب پنیر-صمغ دانه شاهی جهت تهیه ذرات پیکرینگ برای پایدارسازی امولسیون حاوی ترکیبات لیپیدی (بتاکاروتن) استفاده شد. سپس آلژینات سدیم برای تهیه ژل پر شده امولسیون پیکرینگ به کار گرفته خواهد شد تا پایداری سیستم ریزپوشانی برای انتقال در برنج اکستروژده افزایش یابد و همچنین به ایجاد ساختار در برنج هنگام اکستروژن کمک نماید. در نهایت برنج کامپوزیت اکستروژده بر پایه مخلوط آردهای کینوا-برنج و غنی‌سازی شده با بتاکاروتن تهیه و ویژگی‌های فیزیکومکانیکی بررسی و با برنج هاشمی مورد مقایسه قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

آرد برنج هاشمی از شرکت مشعوف (رودسر) تهیه شد. آرد کینوا، شکر، نمک سدیم کلرید، و منوودی گلسیرید تجاری خریداری شدند. بذر شاهی (*Lepidium sativum* L.) از یک بازار محلی (مشهد، ایران) خریداری شد. پروتئین آب پنیر غلیظ (WPC) (محتوای پروتئین: ۸۵ درصد (db)) از شرکت هیلمار (آمریکا) تهیه شد. کلرید کلسیم (CaCl_2) و سایر مواد شیمیایی از شرکت سیگما آلدریج (آلمان) تامین شد. روغن ذرت (Sovena, Fula, پرتغال) از بازار محلی (براگا، پرتغال) خریداری شد.

روش تولید ذرات جامد امولسیون پیکرینگ

در مرحله اول، محلول‌های کنسانتره پروتئین آب پنیر (۱/۷۵ درصد وزنی/وزنی) و صمغ شاهی (۰/۳۱ درصد وزنی/وزنی) تهیه و هر دو در طول یک شبانه روز نگهداری شدند تا هیدراتاسیون در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد کامل شود. محلول کنسانتره پروتئین آب پنیر در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد و بلافاصله سرد شد. سپس محلول صمغ شاهی و محلول پروتئین آب پنیر با استفاده از همزن مغناطیسی با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱ ساعت (۵۰:۵۰) مخلوط شدند. برای ایجاد کمپلکس محلول، pH محلول با استفاده از pH متر (Metrohm-780, Germany) در بالای نقطه ایزوالکتریک پروتئین (pH=۶) تنظیم شد. سپس کلرید کلسیم (۱/۶۹ میلی‌مولار) به‌صورت قطره‌ای به محلول تحت شرایط هم‌زدن مغناطیسی (۳۰۰۰ دور در دقیقه) در دمای محیط اضافه شد. محلول بلافاصله توسط دستگاه فراصوت (VCX750, شرکت SONICS, انگلستان) در دامنه ۸۰ درصد با پالس ۵ ثانیه روشن و پالس ۵ ثانیه خاموش، به مدت ۱۰ دقیقه در حمام یخ برای کنترل دما تیمار شد (Davtalab et al., 2024).

جذب آب

نسبت جذب آب (WAR) بر اساس تحقیقات قبلی با سه تکرار اندازه‌گیری شد. در این روش ۲ گرم از آرد نمونه برنج اکستروود شده در حجم ۲۰ میلی لیتر آب مقطر در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی لیتری در مدت زمان ۱۰ دقیقه با آن مخلوط گردید. سپس با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه در بازه زمانی ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد (Naji - Tabasi, Shahidi - Noghabi, Modiri Dovom, & Davtalab, 2023b).
(۱)
$$\text{نسبت جذب آب (درصد)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{W_1}$$
 که در آن W_1 وزن اولیه دانه‌های برنج و W_2 مقدار وزن دانه بعد از پخت هست.

میزان از دست دادن مواد جامد در آب پخت (افت پخت)

۵ گرم دانه برنج پس از پخت، با ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر سرد (۲۰ درجه سانتی‌گراد) شست و شو داده شد. آب حاصل از پخت و پز و آب بعد از شستشو در ظرفی جمع‌آوری شد و سپس در آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا وزن ثابت خشک شد. میزان افت پخت بر اساس اختلاف وزن ماده خشک جمع‌آوری شده در آب پخت و شست و شو با وزن اولیه دانه برنج محاسبه شد (Qadir & Wani, 2023).

میزان افزایش قد برنج بعد از پخت

میزان افزایش قد دانه‌های برنج اکستروژن شده تحت تأثیر غلظت های مختلف ژل پر شده امولسیون (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی /وزنی)، با اندازه‌گیری اختلاف اندازه دانه برنج قبل و بعد از پخت و بر اساس درصد بیان گردید (Mirzaei, Movahhed, Asadollahzadeh, & Ahmadi Chenarbon, 2021).

بررسی ویژگی‌های بافتی برنج

آزمون بافت‌سنجی دانه‌های برنج اکستروود شده توسط دستگاه بافت سنج (TA-XT Plus Texture Analyser، انگلستان) اجرا شد. آزمایش مکانیکی مورد استفاده آزمون برش بوده که با استفاده از پروب تیغه‌ای (BLADE, HDP/BSW) انجام گردید. سرعت پروب، ۱ میلی‌متر بر ثانیه و تغییر شکل ۵۰ درصد بود که توسط آن، پارامترهای سختی و چسبندگی برای برنج پخته و برنج خام در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد (Bouasla & Wójtowicz, 2021).

شرایط جریان هوا برای مدت زمان ۶ ساعت خشک شد. پس از خشک شدن، برنج اکستروود شده بلافاصله تا دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خنک و بسته‌بندی شد (Naji- Tabasi, Shahidi- Noghabi, Modiri Dovom, & Davtalab, 2023a).

آزمون‌ها

رطوبت

میزان رطوبت طبق روش استاندارد (۲۰۰۵) AOAC و با سه تکرار اندازه‌گیری شد. نمونه‌های برنج در ابتدا وزن شد و سپس در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شد و با فاصله زمانی توزین شد تا به وزن ثابت برسند و سپس در دسیکاتور قرار داده شد. مقدار رطوبت به صورت تفاوت بین وزن اولیه و وزن نهایی محاسبه شد.

خاکستر

مقدار خاکستر نمونه‌های برنج اکستروود شده بر اساس روش استاندارد AOAC (۲۰۰۰) اندازه‌گیری شد (Committee, 2000). نمونه برنج اکستروود شده (۳ گرم) در بوتله‌های سیلیکا ریخته شد و روی مشعل سوزانده شده است. سپس نمونه‌های ذغالی شده در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا زمانی که نمونه کاملاً در آن سفید بشوند. نمونه‌ها پس از سرد شدن در دسیکاتور قرار داده شدند و توزین شدند. تفاوت بین وزن اولیه و وزن نهایی به عنوان درصد خاکستر گزارش شد.

تعیین زمان پخت بهینه

زمان پخت نمونه‌های برنج اکستروژن با غلظت‌های مختلف ژل پر شده امولسیون (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی /وزنی) اندازه‌گیری شد. در این روش ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر را در یک بشر ۲۰۰ میلی لیتری ریخته و در حالت جوش قرار داده شد. ۵ گرم نمونه برنج در آب جوش ریخته و پخت دانه‌های برنج اکستروژن تا زمان مشاهده سفید شدن مرکز نشاسته‌ای ادامه داده شد و زمان ثبت شده به عنوان زمان پخت دانه برنج گزارش شد. در فواصل زمانی ۱ دقیقه، ۱۰ نمونه دانه برنج گرفته شد و بین شیشه کشویی فشار داده شد تا وجود هسته سفید مشخص شود. از بین رفتن هسته سفید نشان‌دهنده رسیده بودن برنج است. سایر ویژگی‌های پخت برنج پس از تعیین زمان پخت در شرایط بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت (Xiong et al., 2023).

بررسی ویژگی‌های رنگی بعد از پخت

ابتدا تصاویر دانه‌های برنج اکستروود شده با سه غلظت مختلف ژل پر شده امولسیون (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) به صورت خشک و پخته توسط اسکنر (Canon، مدل LiDE220) اسکن شدند. سپس از نرم‌افزار ImageJ (نسخه ۱.۴۸ a، آمریکا) خواص رنگی نمونه‌ها در فضای رنگی $L^*a^*b^*$ مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل L^* (میزان روشنایی (۱۰۰-))، a^* (قرمزی (۱۲۰+)) تا سبزی (۱۲۰-) و b^* (زردی (۱۲۰+) تا آبی (۱۲۰-)) بود (Naji-Tabasi et al., 2023a).

بررسی خصوصیات حسی

ارزیابی حسی نمونه‌های برنج اکستروود شده با سه غلظت مختلف ژل پر شده امولسیون (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) در مرحله پس از پخت در شرایط بهینه انجام شد و با نمونه کنترلی (بدون حضور ژل پر شده امولسیون) مقایسه گردید. خصوصیات حسی مورد بررسی شامل رنگ، ظاهر، عطر، طعم، بافت و پذیرش کلی بود که با همکاری ۲۲ نفر داور چشایی انجام شد. از داوران خواسته شد در فاصله ارزیابی حسی هر دو نمونه مقداری از نوشیدنی گرمی که در اختیار آنها قرار گرفته بود، بنوشند. سپس از آزمون مقیاس هدونیک ۵ نقطه‌ای جهت گزارش استفاده شد (Naji-Tabasi et al., 2023a; Sumardiono, Kusumayanti, Prakoso, Paundrianagari, & Cahyono, 2021).

بررسی پایداری بتاکاروتن در برنج اکستروود شده طی

دوره نگهداری و بعد از پخت

جهت بررسی میزان حفظ بتاکاروتن در ساختار برنج پس از پخت، میزان بتاکاروتن قبل و بعد از پخت اندازه‌گیری شد و میزان باقیمانده در برنج به صورت درصد محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری بتاکاروتن قبل از پخت، ۶ گرم از نمونه‌های برنج آسیاب شده و با ۱ میلی‌لیتر اتانول ۷۰٪ و ۰/۸ میلی‌لیتر هگزان استخراج شدند. مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه تکان داده شد و سپس با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس لایه بالایی عصاره حاوی هگزان با استفاده از میکروپیپت جمع‌آوری شد و توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۵۳ نانومتر جذب خوانده شد. جهت اندازه‌گیری مقدار بتاکاروتن در ساختار بعد از پخت، ۵ گرم برنج در ۱۰۰ سی‌سی آب در شرایط پخت بهینه حرارت داده شد و پس از آب‌کش کردن، برنج خشک شد. سپس استخراج بتاکاروتن از ساختار برنج با توجه به روش توضیح داده شده انجام شد. نگهداری برنج طی ۳۰ روز

در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط رطوبت‌کنترل شده در دسکاتور انجام شد.

میزان درصد حفظ بتاکاروتن در ساختار برای نمونه برنج به روش زیر محاسبه شد (Miazek, Beton, Śliwińska, & Brożek, 2022; Płuska, 2022):

$$(2) \quad C_1 - C_2 / C_1 \times 100 = \% \text{ پایداری بتاکاروتن}$$

که در آن C_1 و C_2 به ترتیب غلظت اولیه بتاکاروتن و غلظت ثانویه بتاکاروتن پس از نگهداری یا تیمار حرارتی است.

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی ساختار میکروسکوپی، دانه‌های برنج به صورت عرضی شکسته شدند و با استفاده از نوار کربنی دوطرفه روی یک پایه دایره‌ای قرار داده شد. سپس، با استفاده از دستگاه پوشش‌دهی اسپاتر، روی آن‌ها لایه‌ای نازک از طلا قرار داده شد. سپس ساختار داخلی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (MIRA3, Tescan company, Czech) با ولتاژ ۲ کیلو ولت مشاهده شد (Zhao et al., 2024).

آنالیز آماری

تمامی آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند. آزمون دانکن برای شناسایی اختلافات آماری معنی‌دار ($p < 0.05$) بین میانگین‌ها مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای بررسی تأثیر عوامل مختلف به کار گرفته شد. ارزیابی‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (version 25, SPSS Inc., USA) انجام شدند.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و پخت برنج ساختاریافته

رطوبت

نتایج نشان داد نمونه‌های برنج ساختاریافته حاوی ژل پر شده امولسیونی از لحاظ میزان رطوبت، تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد (نمونه برنج ساختاریافته فاقد هیدروژل) داشتند ($P < 0.05$) (جدول ۱). بیشترین میزان رطوبت در نمونه‌های برنج اکستروژن شده با غلظت‌های ۳۵ درصد ژل پر شده امولسیونی (۷/۱۷ درصد) و ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی (۶/۹۶ درصد) مشاهده شد که بین این دو سطح اختلاف معنادار آماری وجود نداشت (جدول ۱). همچنین کمترین سطح رطوبت (۶/۲۶ درصد) در برنج اکستروژن شده با سطح ۳۰ درصد ژل پر شده امولسیونی اندازه‌گیری شد. در نتیجه با افزایش سطح ژل پر شده امولسیونی در برنج اکستروژن شده، درصد رطوبت افزایش یافت. صمغ

اندازه‌گیری رطوبت، میزان آب آزاد موجود در ساختار قابل اندازه‌گیری خواهد (Puspitasari et al., 2024). در تحقیق مشابه اثر افزودن دو ترکیب هیدروژلی صمغ گوار و عربی بر ویژگی‌های برنج اکستروژن شده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد درصد رطوبت نمونه‌های برنج اکستروژن شده حاوی صمغ گوار و عربی حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون صمغ بیشتر بود (Ranjbar, Basiri, Elhamirad, Sharifi, & Chenarbon, 2018).

آلژینات سدیم به دلیل تعداد گروه‌های هیدروکسیل بیشتر تمایل زیادی برای ایجاد پیوند با مولکول‌های آب دارد (Yan et al., 2023)، هنگامی که به نشاسته هیدراته اضافه می‌شود، فعل و انفعالات الکترواستاتیک بین اتم‌های الکترونگاتیوی بالا (اتم‌های O) در مولکول‌های نشاسته هیدراته و گروه‌های هیدروکسیل صمغ آلژینات سبب ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی می‌شود. این پیوندها در مقایسه با مولکول‌های نشاسته بدون حضور هیدروژل، توانایی بیشتری برای اتصال با مولکول‌های آب دارند و در نهایت سطح رطوبت را افزایش می‌دهند. با توجه به روش

جدول ۱- اثر غلظت ژل پر شده امولسیون بر خصوصیات فیزیکی مکانیکی برنج کامپوزیت اکستروژن شده آرد کینوا-برنج
Table 1- The effect of the emulsion-filled gel concentration on the physico-mechanical properties of extruded rice-quinoa mixed rice

ژل پر شده امولسیونی Emulsion-filled gel (%)	رطوبت Moisture (%)	خاکستر Ash (%)	زمان پخت Optimum preparation time (min)	جذب آب Water absorption (%)	افت پخت Cooking loss (%)	افزایش قد Lateral expansion (%)
Control	2.6 ± 0.02 ^c	1.9 ± 0.01 ^c	6.5 ± 0.02 ^c	233 ± 0.12 ^b	12.48 ± 0.03 ^a	70 ± 0.15 ^a
30 %	6.62 ± 0.07 ^b	2.77 ± 0.02 ^b	5.5 ± 0.01 ^c	245 ± 0.12 ^b	12.25 ± 0.03 ^a	68.57 ± 0.23 ^b
35 %	7.17 ± 0.13 ^a	2.88 ± 0.12 ^b	7.24 ± 0.02 ^b	271 ± 0.31 ^a	11.95 ± 0.06 ^a	80.48 ± 0.03 ^a
40 %	6.96 ± 0.04 ^a	3.67 ± 0.03 ^a	9.66 ± 0.03 ^a	300 ± 0.23 ^a	7.55 ± 0.02 ^b	86.26 ± 0.17 ^a

میانگین داده‌ها ± انحراف معیار هستند.

* حروف نامشابه در هر ستون (a, b, c)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p < 0.05) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.

خاکستر

نتایج نشان داد با افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی، میزان خاکستر نمونه‌های برنج اکستروژن شده افزایش یافت (جدول ۱). بیشترین مقدار خاکستر (۳/۶۷ درصد) در نمونه‌های برنج اکستروژن با سطح ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیونی و مقادیر خاکستر ۲/۸۸ و ۲/۷۷ به ترتیب مربوط به غلظت‌های ۳۵ و ۳۰ درصد ژل پر شده امولسیونی بود. کمترین میزان خاکستر نیز در نمونه کنترلی مشاهده شد. سعادت و همکاران (Saadat, Movahhed, & Ahmadi, 2019) گزارش کردند افزایش محتوای خاکستر نمونه‌های برنج اکستروژن با افزایش صمغ گوار و عربی افزایش یافت (Saadat et al., 2019). به عبارت دیگر افزایش خاکستر در نتیجه افزایش مواد معدنی ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده ارزش غذایی محصول است. در نتیجه می‌توان گفت افزایش غلظت صمغ، سبب افزایش مواد معدنی و بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای آن شده است (Putri et al., 2022).

زمان پخت

زمان پخت نمونه‌های مختلف برنج اکستروژن، براساس مدت زمان مورد نیاز برای نفوذ آب به داخل ساختار، ناپدید شدن مرکز شفاف

گرانولی و ایجاد بافت نرم محاسبه شد (جدول ۱). طبق نتایج در نمونه‌های برنج اکستروژن، بین سطوح مختلف ژل پر شده امولسیونی، اختلاف معنادار آماری وجود داشت (p < 0.05) و بیشترین زمان جهت پخت، ۹/۶۶ دقیقه بود که مربوط به نمونه برنج اکستروژن با سطح ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیونی بود. زمان پخت ارتباط مستقیمی با میزان سختی بافت آن دارد، زیرا هرچه قدر بافت متراکم‌تر باشد میزان نفوذ آب به داخل ساختار با سرعت کمتری انجام خواهد شد. گزارش شده وجود لایه‌های متراکم در ساختار بافت دانه‌های برنج سبب افزایش زمان پخت خواهد شد. زیرا مانع از نفوذ آب و انتقال گرما در هنگام پخت به مرکز دانه و با تأخیر در ژلاتیناسیون، زمان پخت را افزایش خواهد داد (Hooper, Bassett, Wiesinger, Glahn, & Cichy, 2023). برای مثال وجود آنزیم سلولاز و زایلاناز در نمونه‌های برنج با هیدرولیز پلی‌ساکاریدهای بافت مانند سلولز، سرعت جذب آب و سرعت انبساط دانه در هنگام پخت را افزایش و در نتیجه زمان پخت را کاهش داده‌اند. در مقابل استفاده از پلی‌ساکاریدی محلول سوپا در تیمار برنج اکستروژن، با ایجاد لایه مقاوم بر روی سطح بافت، ژلاتیناسیون را به تأخیر و زمان پخت را افزایش داد (Xiong et al., 2023). افزایش غلظت برخی صمغ‌ها به دلیل ایجاد پیوند با نشاسته

افت پخت

نتایج نشان داد کمترین درصد افت پخت در نمونه برنج اکستروژن شده با سطح ۴۰ درصد (وزنی/وزنی) ژل پر شده امولسیون (۷/۵۵ درصد) بود (جدول ۱) و با نمونه کنترلی (۱۲/۴۸) اختلاف معنادار آماری داشت ($p < 0/05$). به طور کلی جذب رطوبت بالا توسط نشاسته برنج سبب ژلاتیناسیون بیشتر و انتشار بیشتر مواد جامد در محیط پخت خواهد شد.

گزارش کردند کاساوا به دلیل این ظرفیت جذب آب بالا، مقدار مولکول‌های آب بیشتری را در طول فرآیند اکستروژن وارد بافت برنج اکستروژن شده کرد که در طی فرآیند خشک کردن، سبب ایجاد منافذ بیشتری نیز شد که در نهایت افزایش خروج مواد بیشتری از بافت نیز اتفاق افتاد (Xia, Lin, Wang, Liu, & Liu, 2024). در نتیجه می‌توان با توجه به نتایج آزمون رطوبت‌سنجی، مقادیر بالاتر افت پخت نمونه‌های برنج حاوی ۴۰ و ۳۵ درصد وزنی/وزنی را به جذب آب بیشتر آن‌ها نسبت داد. از سوی دیگر گزارش شده است، صمغ کربوکی متیل سلولز سبب کاهش افت پخت تا حدود ۰/۱۰ درصد و در مقابل صمغ زانتان سبب افزایش افت پخت تا حدود ۱/۳۱ درصد شد. آن‌ها تأثیر افزودن صمغ‌ها بر کاهش و یا افزایش افت پخت را به زنجیره‌های منشعب پلیمری آن‌ها نسبت دادند که با افزایش جذب آب، سبب رتروداداسیون بیشتر و افت پخت بیشتر خواهد شد. آنها همچنین گزارش کردند آلژینات-کلسیم به عنوان یک پلیمر مناسب با ایجاد پیوند با نشاسته میزان افت پخت را نسبت به سایر انواع صمغ‌ها کاهش داد (Kraithong, Theppawong, Lee, & Huang, 2023). در نتیجه در این تحقیق غلظت بهینه ژل پر شده امولسیونی که دارای بستر پلیمری آلژینات سدیم است نقش مهمی در کاهش افت پخت در برنج اکستروژن شده داشت.

ویژگی‌های رنگی

ویژگی‌های رنگی دانه برنج بر اساس مقادیر شاخص‌های a^* ، L^* و b^* محاسبه شد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد (جدول ۲)، تمام نمونه‌های برنج اکستروژن شده شامل غلظت‌های مختلف ژل پر شده امولسیونی (۳۵،۳۰ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) شفافیت بالایی داشته و اختلاف معنادار آماری در بین سطوح مختلف قبل و بعد از پخت آنها مشاهده نشد ($p > 0/05$) اما در مقایسه با نمونه کنترلی (بدون حضور ژل پر شده امولسیونی) اختلاف معنادار آماری داشت ($p < 0/05$). همچنین نتایج نشان داد که مقادیر شاخص a^* و b^* در بین نمونه‌های برنج اکستروژن شده، نمونه با کمترین غلظت ژل پر شده امولسیونی (۳۰ درصد وزنی-وزنی) با نمونه کنترلی در مرحله قبل از پخت اختلاف

ساختار ژلی متراکم‌تری ایجاد خواهد کرد و سبب افزایش زمان پخت خواهد شد. در مقابل افزودن برخی از ترکیبات پلی‌ساکاریدی مانند کربوکی متیل سلولز به دلیل کمک به نفوذ سریعتر آب و حرارت به مرکز هسته دانه برنج، ساختار شفاف گرانولی با سرعت بیشتری از بین خواهد رفت و بافت نرم‌تری را ایجاد خواهد کرد (Sun et al., 2023). در تحقیق مشابه گزارش شده که با افزودن صمغ زانتان میزان زمان پخت کاهش پیدا می‌کند، اما صمغ کربوکی متیل سلولز بر زمان پخت تأثیر معنی‌دار ندارد (Kraithong & Rawdkuen, 2020). همانطور که نتایج بافت سنجی نشان داد، بیشترین سختی در برنج اکستروژن با سطح ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیونی بود که در نتیجه افزایش ایجاد پیوند نشاسته با بستر آلژینات سدیم اتفاق افتاد. در نتیجه افزایش زمان پخت با افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی را تأیید شد.

جذب آب

همانطور که نتایج حاصل از آزمون جذب آب نمونه‌های برنج اکستروژن شده (جدول ۱) نشان می‌دهد، بیشترین مقدار نسبت جذب آب در تیمارهای حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی (۳۰۰ درصد) مشاهده گردید در حالی که کمترین مقدار مربوط به تیمار با سطح ۳۰ درصد ژل پر شده امولسیونی (۲۷۱ درصد) بود که با تیمار شاهد تفاوت معنادار آماری نداشت ($p > 0/05$). در نتیجه حضور صمغ‌های آلژینات سدیم میزان جذب آب را در نمونه‌های اکستروژن شده در مقایسه با شاهد افزایش داد. نسبت جذب آب به توانایی دانه‌های برنج برای جذب یا اتصال آب در حین فرآیند پخت برنج مربوط می‌شود. هرچه جذب آب بیشتر باشد، اندازه دانه‌های برنج پخته شده بزرگتر است (Puspitasari et al., 2024). نسبت جذب آب یکی از عوامل مهم برای ارزیابی تغییرات فیزیکوشیمیایی نیز می‌باشد، هر چه نسبت جذب آب بیشتر باشد، میزان ژلاتینه شدن آن نیز بیشتر است (Saadat et al., 2019). نمونه با سطوح بالاتر ژل پر شده امولسیونی با توجه به درصد بالای هیدروژل در ساختار برنج، اجازه جذب آسان‌تر آب را در ماتریکس هیدروکلوئید-نشاسته نسبت به سایر تیمارها فراهم آورد. برهمکنش‌های بین مولکولی عامل بسیار مهمی در افزایش جذب آب و ایجاد پیوندهای هیدروژنی است. ژلاتیناسیون نیز به افزایش جذب آب در مواد غذایی اشاره دارد که در آن عوامل ژل دهنده مانند انواع صمغ‌ها، در نتیجه تشکیل پیوند با مولکول‌های آب سبب ایجاد شبکه ژلی و ساختار متراکم پلیمری در محصول می‌شوند و سبب به دام انداختن مولکول‌های آب در ساختار خود می‌شوند (Zhang, Qin, Liang, Hu, & Luan, 2023). محصولات غذایی در فرآیند اکستروژن، تحت فشار و حرارت قرار می‌گیرند که تشکیل شبکه هیدروژلی می‌تواند از تأثیر تنش و ترک‌های برنج جلوگیری کند (Gao et al., 2023).

کاهش می‌دهند که این امر می‌تواند باعث شفافیت بالا در محصول نهایی شود (Naji-Tabasi et al., 2023b). طبق نتایج بیشترین مقدار ΔE در نمونه‌ها بعد از پخت و همچنین در نمونه‌های حاوی ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیون است. گزارش شده سطح اولیه رطوبت نمونه اکستروژن شده مقادیر اختلاف رنگ را افزایش خواهد. همچنین واکنش قهوه ای شدن نیز می‌تواند سبب افزایش اختلاف رنگ شود (Basilio-Atencio, Condezo-Hoyos, & Repo-Carrasco-Valencia, 2020). با توجه به سطح بالاتر رطوبت (با توجه به نتایج درصد رطوبت) میزان اختلاف رنگ در نمونه‌های حاوی سطح ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیون بیشتر است. همچنین حرارت پخت می‌تواند سبب ایجاد واکنش‌های قهوه‌ای شدن باشد.

معنادار آماری نداشت ($p > 0.05$) در صورتی که با افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی مقدار این دو شاخص افزایش یافته است. در همه نمونه‌های برنج اکستروژن شده بعد از پخت، بین مقادیر پارامتر b^* اختلاف معنادار آماری وجود داشت ($p < 0.05$). یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر رنگ محصولات اکستروژن شده دمای مخزن اکستروژن می‌باشد که باعث ایجاد واکنش‌های مایلارد و کاراملیزاسیون خواهد شد. با توجه به اینکه در این تحقیق از روش اکستروژن سرد استفاده شده، می‌توان عدم تفاوت رنگ بین محصولات و شفافیت بالای نمونه‌های برنج را به آن نسبت داد (Mitra, Pakki, Acharya, & Khanvilkar, 2023). از سوی دیگر گزارش شده هیدروکلوئیدها توزیع آب را در محصول افزایش و در مقابل واکنش‌های مایلارد و کاراملیزاسیون را

جدول ۲- مقادیر پارامترهای اختلاف رنگ در نمونه‌های برنج اکستروژن شده با سطوح مختلف ژل پر شده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) قبل و بعد از پخت

Table 2- Color difference parameter values in extruded rice samples with different levels of emulsion-filled gel (30, 35, and 40% w/w) before and after cooking

	قبل از پخت Before cooking				بعد از پخت After cooking			
	Control	%30	35%	40%	Control	30%	35%	40%
L*	59.56±0.02 ^b	65.18±0.00 ^a	68.19±0.00 ^a	69.19±0.00 ^a	52.95±2.48 ^c	62.95±2.48 ^b	65.18±4.40 ^{ab}	63.07±1.42 ^b
a*	-2.82±0.23 ^c	-2.39±1.56 ^c	-0.59 ±1.13 ^a	-1.17±1.22 ^b	0.80±0.02 ^b	1.17±0.01 ^a	1.17±0.04 ^a	1.07±0.10 ^a
b*	0.87±0.28 ^c	1.15±0.04 ^b	1.44±0.09 ^b	2.57±0.04 ^a	11.58±0.22 ^b	12.35±0.12 ^b	14.30±2.84 ^a	15.08±2.87 ^a

* حروف نامشابه در هر ستون (a, b, c)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح ($p < 0.05$) می‌باشد.

میانگین داده ها ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.

آلژینات سبب تشدید جذب آب و افزایش خاصیت الاستیک نسبت به نمونه برنج اکستروژن شده کنترلی می‌گردد (Saadat et al., 2019). علاوه بر این عوامل دیگری نیز بر انبساط برنج اکستروژن شده مؤثر است مانند میزان پروتئین و چربی. پروتئین به توزیع بهتر آب در طول فرآیند اکستروژن کمک می‌کند و انبساط را کاهش می‌دهد. چربی نیز به عنوان روان کننده عمل و از دانه‌های نشاسته در برابر ژلاتیناسیون محافظت می‌کند تا ژلاتینه شدن آنها و در نتیجه انبساط را کاهش دهد (Becker, Eifert, Soares Junior, Tavares, & Carvalho, 2014). در نتیجه می‌توان گفت با توجه ساختار تشکیل دهنده ژل پر شده امولسیون پیکرینگ حضور بیشتر این مواد در ساختار برنج اکستروژن شده نیز افزایش یافته است.

افزایش قد برنج

میزان افزایش قد نمونه‌های برنج اکستروژن شده تحت غلظت های ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد (جدول ۱) مقایسه تیمارها با نمونه شاهد نشان داد نمونه‌های برنج ساختاریافته جدید از لحاظ افزایش قد تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشتند ($p > 0.05$) (جدول ۱). هیدروکلوئیدها در مرحله ژلاتیناسیون باعث کاهش چگالی ظاهری و کشسانی شده و در مقابل سبب افزایش حجم جانبی و قد دانه‌های برنج خواهند شد. آنها با ایجاد پیوند بین رشته‌های پلیمری می‌توانند سبب حفظ یکپارچگی ساختاری محصول اکستروژن در طول تورم شوند و در نتیجه اندازه نهایی دانه را بیشتر کنند (Awolu, Magoh, & Ojewumi, 2020). افزایش جذب آب درون ساختار برنج اکستروژن شده به نرم شدن ساختار آمیلوپکتین و بهبود خواص الاستیک برنج کمک کرده و سبب انبساط جانبی آن خواهد شد. حضور ماده جذب کننده رطوبت مانند صمغ

نتایج آزمون بافت سنجی

ویژگی‌های بافتی برنج اکستروژن شده با غلظت‌های مختلف ژل پر شده امولسیون (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) قبل و بعد از پخت در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان داد، قبل از پخت افزایش غلظت ژل پر شده امولسیون از ۳۰ تا ۴۰ درصد وزنی/وزنی، به‌طور معناداری سبب افزایش سختی برنج شد ($p < 0.05$) به‌طوری‌که میزان سختی برنج خام از ۲۸۸/۷۰ تا ۴۳۷/۳۹ g افزایش یافت. بیشترین میزان سختی برنج بعد از پخت نیز در غلظت ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیون و کمترین در برنج اکستروژن شده کنترل (۵/۰۶) مشاهده شد. همچنین اختلاف معنادار آماری بین سطح ۳۵ و ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیون وجود نداشت ($p > 0.05$). افزایش سختی در نمونه‌های برنج اکستروژن شده را می‌توان به استحکام شبکه ژلی نشاسته ارتباط داد که سبب افزایش تراکم در ساختار محصول خواهد شد. در نتیجه ترکیبات ژلی با منبع پلی ساکاریدی، با تأثیر بر ساختار گرانیولی نشاسته و کمک به تشکیل شبکه ژلی منسجم، سبب افزایش سختی نهایی در برنج اکستروژن شده خواهند شد (Shao et al., 2021; Zheng et al., 2020). نتایج حاصل از سایر تحقیقات نشان داد افزودن پکتین چغندر قند باعث افزایش سختی در برنج اکستروژن شده است. آن‌ها گزارش کردند ترکیب پلی ساکاریدی پکتین با تأثیر بر پیوندهای شبکه ژلی گلوتمین برنج، سبب ایجاد ساختار متراکم و یکنواخت شده که در نهایت سختی برنج را افزایش داده است (Wang, Yang, Li-, Sha, & Chen, 2021). به‌طور کلی می‌توان بیان کرد میزان سختی در برنج اکستروژن شده به میزان پیوندهای درون پلیمری ارتباط دارد و ایجاد پیوندهای جدید، شبکه ژلی متراکم و بافت برنج اکستروژن شده سخت‌تر خواهد بود.

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های بافتی بعد از مرحله پخت برنج اکستروژن شده نشان داد، بین مقادیر چسبندگی بین غلظت‌های مختلف دانه‌های برنج اکستروژن شده با سطح ۴۰، ۳۵ و ۳۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیون اختلاف معنادار آماری وجود نداشت ($p > 0.05$) و بالاترین میزان چسبندگی در نمونه کنترلی مشاهده شد.

پارامتر چسبندگی نقش مهمی در تعیین نرمی و لطافت رشته‌های برنج اکستروژن شده دارد اما چسبندگی بسیار زیاد می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که مواد شسته شده از ساختار دانه‌های برنج^۱ در طول پخت تمایل دارند به یکدیگر بچسبند که در نهایت بر طعم نهایی آنها تأثیر گذار خواهد داشت (Castellanos-Gallo et al., 2019). از سوی دیگر طی فرآیند پخت، مولکول‌های نشاسته تمایل دارند با یکدیگر اتصال برقرار کنند و در نتیجه کاهش دما بعد از پخت، شروع به انبساط و ژلاتیناسیون می‌کنند. پلی‌ساکارید با ایجاد پیوند با نشاسته میزان

اتصالات بین گرانول‌ها را کاهش داده و سبب تشکیل یک لایه ژل مانند بر روی رشته‌های برنج اکستروژن شده خواهد شد. این لایه تشکیل شده ضمن جلوگیری از رترورگراسیون نشاسته و حفظ رطوبت بالای محصول از چسبندگی نامطلوب دانه‌های برنج به یکدیگر جلوگیری می‌کند (Guan et al., 2023). در نتیجه ژل پر شده امولسیون اگرچه میزان خروج مواد از ساختار برنج را افزایش داد (با توجه به نتایج افت پخت) اما میزان اتصال و چسبندگی نامطلوب بین دانه‌های برنج را کاهش داده است.

ناجی و همکاران (Naji-Tabasi et al., 2023a) در تحقق مشابه به بررسی پارامترهای کیفی برنج اکستروژن شده حاوی هیدروژل‌های ژلان، زانتان و آلرینات سدیم و مقایسه آن با برنج طبیعی پرداختند. نتایج آزمون بافت‌سنجی آن‌ها تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های برنج حاوی هیدروژل و شاهد برنج از نظر سختی نشان داد. آن‌ها گزارش کردند در میزان آب بالاتر، ژلاتینه شدن نشاسته سریعتر است، که به نوبه خود بافت برنج سخت‌تری ایجاد می‌کند. دو صمغ ژلان و آلرینات سختی بافت نمونه‌های اکستروژن شده را نسبت به شاهد افزایش بیشتری دادند. افزایش درصد هیدروژل در ساختار برنج باعث افزایش سفتی برنج ساختاریافته شد (Naji-Tabasi et al., 2023a).

نتایج ارزیابی حسی

اثر غلظت‌های مختلف ژل پر شده امولسیون (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) بر خصوصیات حسی شامل رنگ، بو، طعم، سفتی، چسبندگی، قابلیت جویدن و پذیرش کلی برنج اکستروژن شده بررسی شد (شکل ۱). از نظر پارامتر رنگی در بین نمونه‌های مختلف اختلاف معنادار آماری وجود نداشت ($p > 0.05$). اما از نظر پارامترهای طعم و قابلیت جویدن، کمترین امتیاز به نمونه کنترلی (نمونه بدون ژل پر شده امولسیون) داده شد. در نهایت بالاترین پارامتر برای پذیرش کلی مربوط به نمونه ۴۰ درصد و بعد از آن به نمونه ۳۵ درصد ژل پر شده امولسیون تعلق داشت. از سوی دیگر به دلیل ساختار متراکم برنج اکستروژن در غلظت ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پر شده امولسیون، خروج مواد جامد در هنگام پخت در آن کمتر و در نتیجه از نظر پارامتر نامطلوب چسبندگی پایین سطح را داشت. تحقیقات نشان داده است آرد کینوا در ساختار محصول اکستروژن یافته، بافت متراکم‌تر و فشرده‌تری را نسبت به آرد برنج ایجاد می‌کند که سبب کاهش نفوذ مولکول‌های آب، انبساط کمتر و شفافیت کمتر (شاخص رنگ) در محصول می‌شود (Alaji, Hymavathi, Robert, & Deepika, 2018). کربوهیدرات‌ها با ایجاد بافت دهانی مطلوب و اثر پوشاندگی بر طعم نامطلوبی که در فرآیند اکستروژن ممکن است ایجاد شود، میزان پذیرش کلی محصولات

اکستروژن شده را افزایش خواهند داد. همچنین با تأثیر بر ساختار و ایجاد بافت یکنواخت قابلیت جویدن را بهبود خواهد بخشید (Qi et al., 2023). ناجی و همکاران (Naji-Tabasi et al., 2023b) گزارش داد که که صمغ‌های ژلان، آلژینات سدیم و زانتان باعث بهبود

جدول ۳- ویژگی‌های بافتی نمونه‌های برنج حاوی مقادیر مختلف ژل پرشده امولسیون (با بستر ژلی آلژینات سدیم (غلظت ۴ درصد وزنی/وزنی) و نسبت ۱۵ درصد حجمی/حجمی امولسیون پیکرینگ در بستر ژلی پرشده امولسیونی)

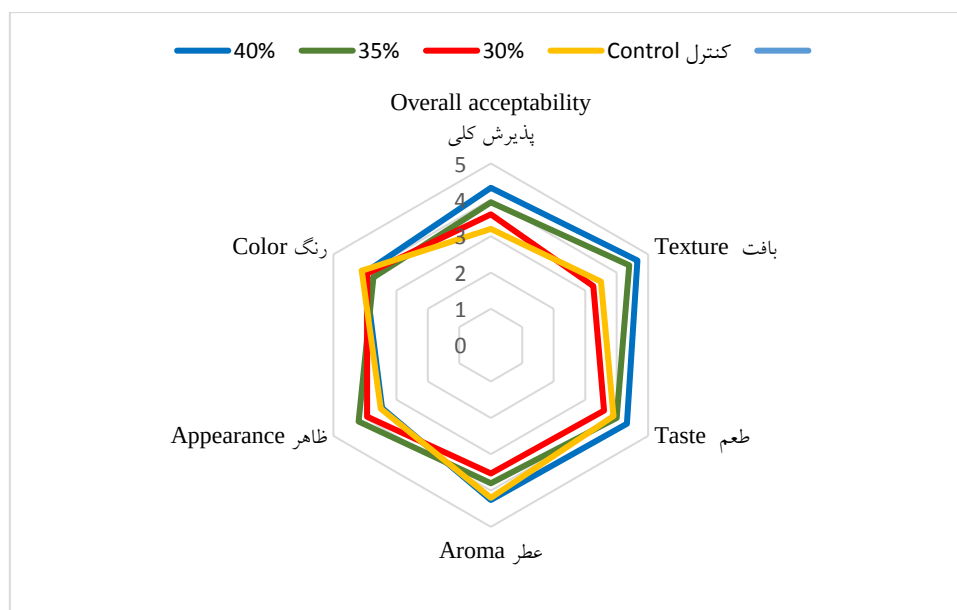
Table 3- Textural properties of rice samples containing different concentration of emulsion-filled gel (with sodium alginate gel matrix (4% w/w) and a 15% volume/volume ratio of Pickering emulsion in the emulsion-filled gel matrix)

غلظت ژل پرشده امولسیونی Emulsion-filled gel (%)	قبل از پخت Before cooking		بعد از پخت After cooking	
	سختی Hardness (g)	سختی Hardness (g)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)	
40	437.39±31.35 ^a	9.52±0.19 ^a	0.55±0.01 ^b	
35	367.80±17.93 ^b	8.50±1.00 ^a	0.55±0.05 ^b	
30	288.70±26.58 ^a	6.98±0.74 ^b	0.55±0.19 ^b	
Control	256.70±12.32 ^a	5.06±0.23 ^b	0.63±0.19 ^a	

* میانگین ± انحراف استاندارد.

** حروف نامشابه در هر ستون (a, b, c)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در بر اساس آزمون دانکن ($p < 0.05$) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.



(Meng, Sun, MU, & Garcia-Vaquero, 2024)

شکل ۱- ارزیابی حسی نمونه‌های برنج اکستروژده حاوی مقادیر مختلف ژل پرشده امولسیونی

(بستر ژلی با غلظت ۴ درصد وزنی-وزنی سدیم آلژینات و امولسیون پیکرینگ ۱۵ درصد حجمی/حجمی حامل بتاکاروتن با غلظت ۰/۱ درصد)

Fig. 1. Sensory evaluation of extruded rice samples containing different amounts of emulsion-filled gel (Gel matrix with 4% w/w sodium alginate concentration and 15% v/v Pickering emulsion carrier of beta-carotene with 0.1% concentration)

پایداری بتاکاروتن در برنج اکستروود شده مخلوط آرد

کینوا- برنج در طی دوره نگهداری و پخت

پس از بررسی نتایج آزمون‌های قبلی، نمونه برنج اکستروود شده با ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیون به عنوان نمونه منتخب مورد بررسی و از نظر پایداری بتاکاروتن با نمونه برنجی که حاوی بتاکاروتن بدون پوشش بود، طی دوره نگهداری و همچنین پس از پخت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان پایداری بتاکاروتن در نمونه حاوی ژل پر شده امولسیونی در مقایسه با نمونه‌ای که بتاکاروتن به طور مستقیم به برنج اضافه شده است، به طور معناداری پایداری بیشتری دارد ($p < 0.05$) (جدول ۴).

سیستم‌های انکپسولاسیون در سامانه‌های غذایی، عموماً با هدف حفظ پایداری ترکیبات مغذی در طی فرآیندهای حرارتی یا دوره نگهداری، طراحی می‌شوند (Wei et al., 2022). تشکیل شبکه ژلی آلزینات سدیم، به عنوان یک پوشش محافظ، قطرات امولسیون را در خود محصور و از اکسیداسیون و تجزیه بتاکاروتن در اثر عوامل محیطی مانند نور، گرما و اکسیژن جلوگیری می‌کند (Geng et al., 2022). بستر ژلی آلزینات سدیم با ایجاد پیوندهای غیرکوالانت با ذرات جامد موجود در سطح قطرات روغن (نانوذرات پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی)، سبب ایجاد شبکه ژلی قوی می‌شود. افزایش این پیوندهای عرضی

سبب کاهش تحرکات قطرات روغن و در نهایت با افزایش پایداری سامانه امولسیون پیکرینگ می‌شوند (Lv, Zhang, Chen, & Yin, 2022; Zhang et al., 2023).

به طور کلی، افزایش بار سطحی و کاهش اندازه ذرات پیکرینگ امولسیون به حفظ پایداری آن در برابر عوامل محیطی و در نتیجه حفظ ترکیب مغذی کمک می‌کند (Meng et al., 2024). صمغ شاهی یک پلی ساکارید با بار منفی هست که در محدوده زیادی از دما می‌تواند پایدار باشد و به عنوان یک ترکیب امولسیفایری در پایداری سامانه امولسیونی به کار برده شود (Davtalab et al., 2024). از سوی دیگر، تشکیل پیوند بین گروه‌های کربوکسیل آلزینات سدیم، به عنوان یک پلی ساکارید با بار منفی، با نانوذرات پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی دافعه الکترواستاتیک بین قطرات و بار سطحی سامانه را افزایش می‌دهد. مکانیسم دافعه الکترواستاتیک در نهایت سبب جلوگیری از افزایش اندازه قطرات امولسیون می‌شود (Cai, Zhang, & Xie, 2024; Xin, Liu et al., 2023). در نتیجه، می‌توان گفت ژل پر شده امولسیونی توانسته است ترکیب مغذی بتاکاروتن را در برنج اکستروود شده طی پخت و دوره نگهداری حفظ کند. در مقابل در نمونه بدون ژل پر شده امولسیونی، به دلیل افزایش سطح تماس بتاکاروتن با اکسیژن، اکسیداسیون آن سریع‌تر رخ داد و مقاومت آن در برابر حرارت بسیار کمتر بود.

جدول ۴- بررسی پایداری بتاکاروتن در برنج اکستروود شده مخلوط آرد کینوا- برنج در طی دوره نگهداری و بعد از پخت

Table 4- Investigation of β -carotene stability in extruded rice mixed with quinoa-rice flour during storage and after cooking

نمونه حاوی بتاکاروتن Sample containing beta-carotene	طی دوره نگهداری Storage stability (1 month)	پس از پخت After cooking
برنج اکستروود شده با ژل پر شده امولسیونی (۴۰ درصد) Extruded rice filled with emulsion gel (40%)	91.10 $\pm$ 0.43 ^a	87.32 $\pm$ 2.03 ^a
برنج اکستروود شده بدون ژل پر شده امولسیونی Extruded rice without Emulsion-gel	86.07 $\pm$ 0.32 ^b	47.21 $\pm$ 0.26 ^b

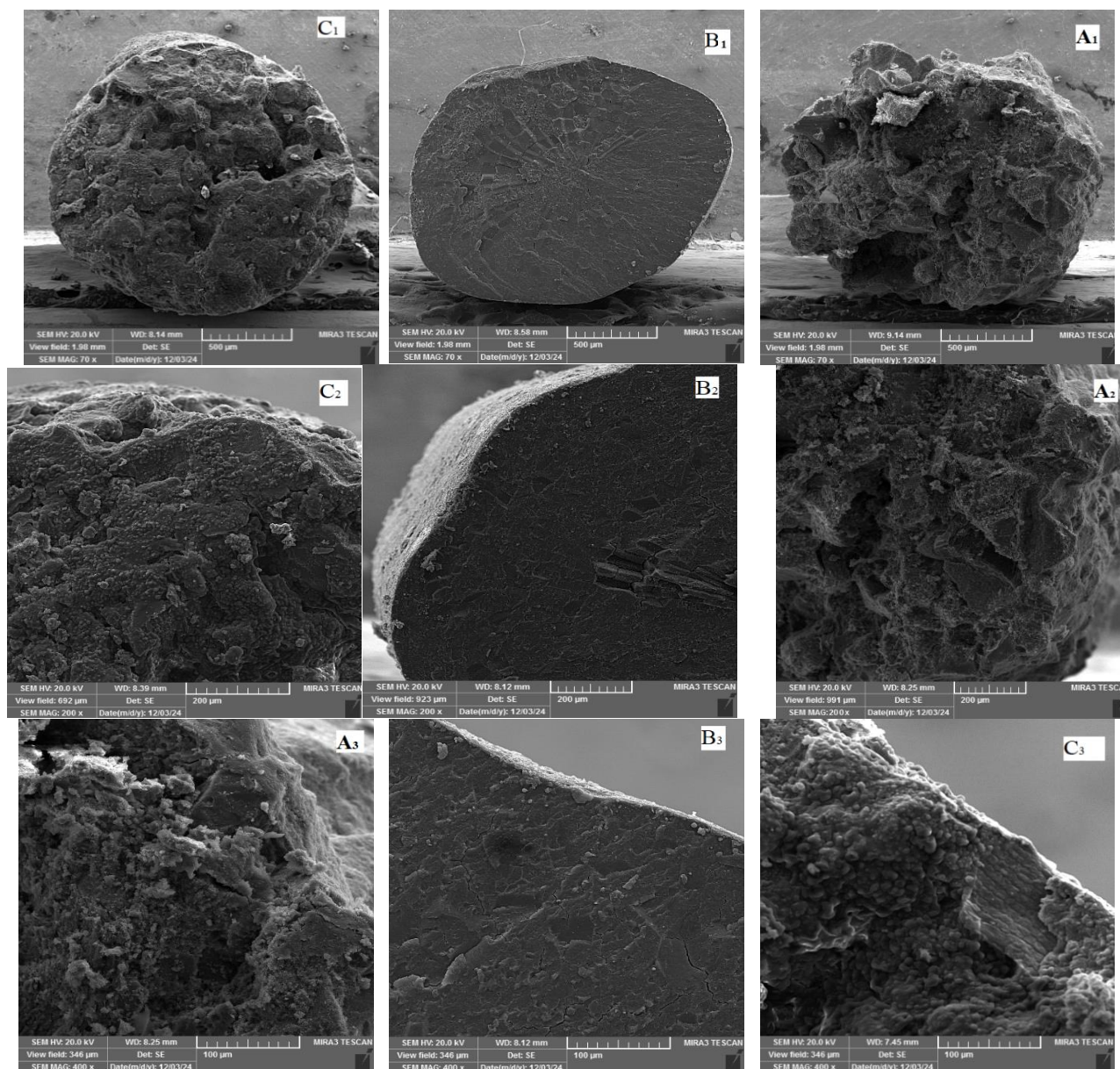
میانگین داده ها $\pm$ انحراف معیار هستند. حروف نامشابه در هر ستون (a, b, c)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح ($p < 0.05$) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means $\pm$ standard deviation.

متقابلاً در مقایسه با برنج طبیعی، ساختار بلوری نیز کاهش یابد. از سوی دیگر با افزودن یک ترکیب ماکرومولکولی که بتواند پراکندگی دانه‌های نشاسته کوچک را تسهیل می‌کند، باعث می‌شود دانه‌های نشاسته در طول فرآیند اکستروژن همگن‌تر و منسجم‌تر شوند (Liu et al., 2018). در نتیجه می‌توان گفت حضور آرد کینوا به عنوان ترکیب جدید سبب کاهش برهمکنش‌های نشاسته‌ای آرد برنج شده است و در مقایسه با نمونه طبیعی سختی کمتری دارد. در مقابل حضور هیدروژل و تشکیل شبکه، سبب شده بافت برنج اکستروود شده منسجم‌تر گردد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونیکی روبشی (SEM)

نتایج SEM نشان داد که برنج طبیعی در مقایسه با برنج اکستروود شده مخلوط آرد کینوا-برنج دارای پوسته‌ای بسیار سخت‌تر بود و در مقایسه بین دو نمونه برنج اکستروود شده، نمونه برنج بدون حضور هیدروژل ساختاری نسبتاً سست مشاهده شد. با افزودن ژل پر شده امولسیونی، ساختار برنج اکستروود شده پوسته سفت‌تری از خود نشان داد و ساختار داخلی آن منسجم‌تر شد (شکل ۲ (A1-C1)). افزودن فیبر گیاهی در ساختار برنج اکستروود شده، باعث می‌شود ساختار بلوری دانه‌های نشاسته برنج با یکدیگر برهمکنش کمتری داشته باشند و



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های برنج اکستروده شده بدون ژل پر شده امولسیون (A)، نمونه برنج هاشمی (B) و برنج اکستروده شده حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی (C)

Fig. 2. SEM images of extruded rice without emulsion -filled gel (A), Hashemi rice grain(B) and extruded rice with 40% emulsion filled gel (C)

امولسیونی (۳۰۰ درصد) بیشتر از برنج هاشمی (۲۰۱ درصد) بود که می‌توان به افزایش جذب آب بیشتر توسط ژل نسبت داد (جدول ۵). از نظر میزان افت پخت، تفاوت معنی‌دار آماری بین نمونه‌های برنج اکستروده شده در مقایسه با برنج هاشمی (۹/۲۱ درصد) وجود داشت ($p < 0.05$). ویژگی افزایش قد نمونه‌های برنج هاشمی پس از پخت مشابه دانه‌های برنج اکستروده شده بود.

مقایسه نمونه منتخب با نمونه برنج واریته هاشمی

برای توسعه برنج اکستروده شده حاوی ژل پر شده امولسیونی به عنوان جایگزینی برای برنج طبیعی، نمونه انتخاب شده (۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی) انتخاب و با برنج هاشمی مقایسه شدند. با توجه به نتایج جدول ۵، از نظر ویژگی‌های پخت، نمونه‌های برنج مخلوط زمان پخت کمتری داشتند که به دلیل تخریب ساختار نشاسته است (جدول ۵). نسبت جذب آب در برنج مخلوط حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده

جدول ۵- ویژگی‌های پخت و رنگی برنج منتخب و برنج هاشمی

Table 5- Cooking and color properties of optimum extruded rice and Hashemi rice

ویژگی نمونه برنج Rice properties	برنج حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیون Emulsion-filled gel -rice% 40	برنج هاشمی Hashemi rice
Cooking time (min) زمان پخت	9.66 ± 0.03 ^b	15.00 ± 2.49 ^a
Water absorption ratio (%) درصد جذب آب	300 ± 0.23 ^a	201.50 ± 8.59 ^b
Cooking loss (%) افت پخت	7.55 ± 0.02 ^b	9.21 ± 1.16 ^a
Lateral expansion (%) افزایش قد	86.26 ± 0.17 ^a	80.43 ± 2.23 ^a

* حروف نامشابه در هر ردیف، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p < 0.05) می‌باشد.

میانگین داده‌ها ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each row represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.

طبیعی برنج سبب افزایش جذب آب و کاهش سختی آن شده است (Naji-Tabasi et al., 2023a).

نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ویژگی‌های حسی نمونه‌های بهینه برنج کامپوزیت اکستروژده و برنج هاشمی وجود ندارد (شکل ۳). نتایج نشان داد که برنج اکستروژده حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیون می‌تواند جایگزین مناسبی برای برنج هاشمی باشد. ژل‌های امولسیون دارای خواص بافتی و رئولوژیکی خاصی هستند که درک حسی بیشتری را فراهم می‌کنند. پوشش‌دهی بتاکاروتن با ژل‌های امولسیون می‌تواند کاربردهای بتاکاروتن را در صنعت غذا گسترش دهد (Geng et al., 2022). یک ژل امولسیون با ساختار پیچیده می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که به آرامی و یا به سرعت توسط آنزیم‌های گوارشی تجزیه شود. این نوع امولسیون می‌تواند برای تحویل هدفمند مواد مغذی به بدن مفید باشد (Golding & Wooster, 2010).

برنج هاشمی سختی بیشتری از نمونه‌های برنج اکستروژده داشت (جدول ۶). برنج کامپوزیت اکستروژده حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیون دارای مقدار سختی کمتری نسبت به برنج هاشمی (g) ۱۴/۶۵ بود. از سوی دیگر تفاوت معنادار آماری بین میزان چسبندگی بعد از پخت در برنج هاشمی (۰/۳۶ g.s) با نمونه برنج کامپوزیت اکستروژده وجود نداشت (p > 0.05). مهمترین عامل تأثیرگذار بر بافت محصول و میزان سختی آن، جذب آب می‌باشد. گزارش شده در اسنک تهیه شده از آرد کینوا، با افزایش جذب آب تحت تیمارهای مختلف، میزان سختی آن کاهش یافته است. همچنین شرایط پخت با تبخیر آب از محصول خواص بافتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان سختی محصول را کاهش می‌دهد (Muñoz-Pabon, Roa-Acosta, Hoyos-Concha, Bravo-Gómez, & Ortiz-Gómez, 2022). از سوی دیگر حضور هیدروژل در محصول اکستروژده نسبت به نمونه

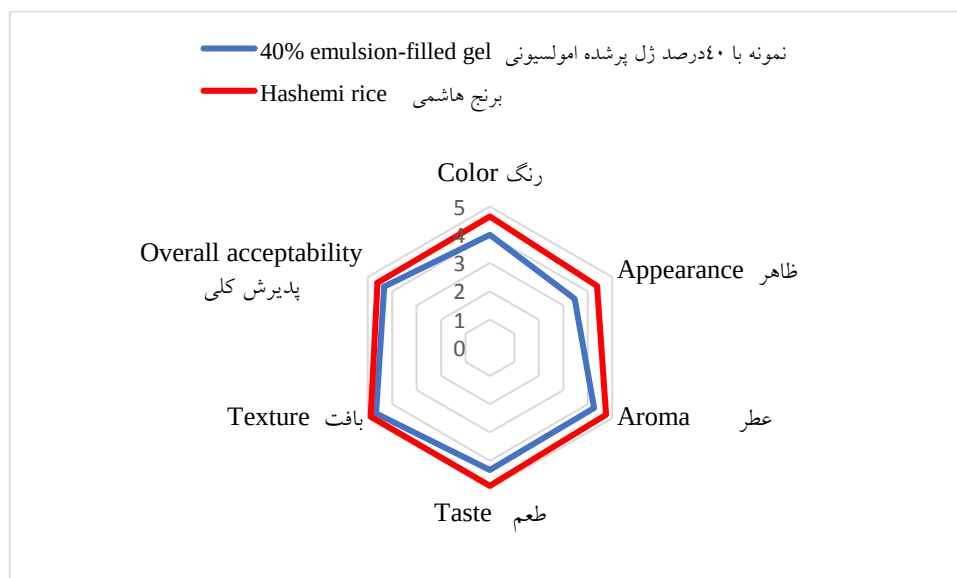
جدول ۶- ویژگی بافتی برنج کامپوزیت اکستروژده بهینه با برنج واریته هاشمی قبل و بعد از پخت

Table 6- Textural properties of optimum extruded rice and Hashemi rice before and after cooking

نوع نمونه برنج Rice sample	قبل از پخت Before cooking	بعد از پخت After cooking	
	سختی Hardness	سختی Hardness	چسبندگی Adhesiveness
	(g)	(g)	(g.s)
حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیون 40% emulsion-filled gel	437.39±31.35 ^b	9.52±0.19 ^b	0.55±0.01 ^a
برنج هاشمی Hashemi rice	633.89±22.45 ^a	14.65±1.30 ^a	0.36±0.44 ^a

میانگین داده‌ها ± انحراف معیار هستند. * حروف نامشابه در هر ستون (c, b, a)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p < 0.05) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.



شکل ۳- بررسی خواص حسی برنج اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج با نمونه برنج طبیعی واریته هاشمی
Fig. 3. Sensory properties evaluation of extruded rice mixed with quinoa-rice flour compared to natural rice (Hashemi variety)

نتیجه گیری

کینوا نیز می‌باشد. مقایسه نمونه برنج بهینه اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج با برنج طبیعی نشان داد، نمونه اکستروژده به دلیل نزدیک بود خواص حسی به نمونه طبیعی می‌تواند جایگزین مناسبی برای برنج طبیعی باشد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند هیچ تعارض منافی ندارند.

میزان مشارکت نویسندگان

مریم داوطلب: انجام آزمایشات، تحقیق و بررسی، مدیریت داده، نوشتن پیش‌نویس اصلی، سارا ناجی طبسی: مدیریت پروژه، نظارت، نوشتن- بررسی و ویرایش، مصطفی شهیدی نوقابی: نظارت، نوشتن- بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این مقاله توسط مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی حمایت مالی شده است که بدینوسیله از آنها قدردانی می‌شود.

در این پژوهش به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی-مکانیکی برنج کامپوزیت اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج، از ژل پر شده امولسیون پیکرینگ که حاوی ترکیب مغذی بتاکاروتن بود، استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی-وزنی) میزان رطوبت، خاکستر، افزایش قد و زمان پخت برنج ساختار یافته افزایش و در مقایسه با نمونه کنترلی بیشتر بود. با افزایش ژل پر شده امولسیونی کاهش چسبندگی و افزایش سختی در نمونه‌های برنج اکستروژده مشاهده شد به طوری که بیشترین چسبندگی و کمترین سختی مربوط به نمونه کنترلی بود. افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی تا سطح ۴۰ درصد وزنی-وزنی، میزان روشنایی دانه‌های برنج را نسبت به نمونه کنترلی افزایش داده است. از لحاظ ویژگی‌های حسی سطح ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی بیشترین امتیاز را دارا بود. با توجه به نتایج این تحقیق، افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی سبب بهبود خواص فیزیکی-مکانیکی محصول برنج شد. بنابراین می‌توان محصول برنج اکستروژده مخلوط آرد کینوا-برنج با سطح ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی را به عنوان محصولی پیشنهاد داد که ضمن غنی شدن با ترکیب مغذی بتاکاروتن، دارای اثرات سلامتی بخش آرد

References

1. Alajil, O., Hymavathi, T., Robert, P., & Deepika, L. (2018). Effect of flour composition and temperature on physico-chemical and sensory properties of quinoa based extrudates. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 24(5), 1-13. <https://doi.org/10.9734/JPRI/2018/45346>
2. Awolu, O.O., Magoh, A.O., & Ojewumi, M.E. (2020). Development and evaluation of extruded ready-to-eat snack from optimized rice, kersting's groundnut and lemon pomace composite flours. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 86-95. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04033-9>
3. Basilio-Atencio, J., Condezo-Hoyos, L., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2020). Effect of extrusion cooking on the physical-chemical properties of whole kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) flour variety centenario: Process optimization. *LWT*, 128, 109426. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109426>
4. Becker, F.S., Eifert, E.D.C., Soares Junior, M.S., Tavares, J.-A.S., & Carvalho, A.V. (2014). Physical and functional evaluation of extruded flours obtained from different rice genotypes. *Ciência e Agrotecnologia*, 38, 367-374. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000400007>
5. Bouasla, A., & Wójtowicz, A. (2021). Gluten-free rice instant pasta: Effect of extrusion-cooking parameters on selected quality attributes and microstructure. *Processes*, 9(4), 693. <https://doi.org/10.3390/pr9040693>
6. Buyukkesteli, H.I., & El, S.N. (2019). Development and characterization of double emulsion to encapsulate iron. *Journal of Food Engineering*, 263, 446-453. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.026>
7. Cai, J., Zhang, D., & Xie, F. (2024). The role of alginate in starch nanocrystals-stabilized Pickering emulsions: From physical stability and microstructure to rheology behavior. *Food Chemistry*, 431, 137017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137017>
8. Castellanos-Gallo, L., Galicia-García, T., Estrada-Moreno, I., Mendoza-Duarte, M., Márquez-Meléndez, R., Portillo-Arroyo, B., & Sanchez-Aldana, D. (2019). Development of an expanded snack of rice starch enriched with amaranth by extrusion process. *Molecules*, 24(13), 2430. <https://doi.org/10.3390/molecules24132430>
9. Committee, A.A.O.C.C.A.M. (2000). *Approved methods of the American association of cereal chemists*.
10. Davtalab, M., Naji-Tabasi, S., Shahidi-Noghabi, M., Martins, A.J., Bourbon, A.I., & Cerqueira, M.A. (2024). Pickering emulsion stabilized by different concentrations of whey protein-cress seed gum nanoparticles. *Foods*, 13(23), 3777. <https://doi.org/10.3390/foods13233777>
11. Farjami, T., & Madadlou, A. (2019). An overview on preparation of emulsion-filled gels and emulsion particulate gels. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.043>
12. Gao, L., Xu, Z., Zhang, R., Qin, Y., Ji, N., Wang, Y., & Sun, Q. (2023). Effects of erythritol on rheological properties of rice flour and structural characteristics of extruded dried rice noodles with rapid rehydration behaviors. *Food Hydrocolloids*, 109007. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109007>
13. Geng, M., Wang, Z., Qin, L., Taha, A., Du, L., Xu, X., & Hu, H. (2022). Effect of ultrasound and coagulant types on properties of β -carotene bulk emulsion gels stabilized by soy protein. *Food Hydrocolloids*, 123, 107146. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107146>
14. Godoy, R. (2015). Quinoa and rice co-products gluten free-cereals: Physical, chemical, microbiological and sensory qualities.
15. Golding, M., & Wooster, T.J. (2010). The influence of emulsion structure and stability on lipid digestion. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(1-2), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.006>
16. Guan, C., Liu, J., Gan, S., Xiong, G., Qiao, F., Mo, W., & Lin, Q. (2023). Effects of soluble soybean polysaccharide on cooking and eating quality of dry rice noodles under single-and twin-screw extrusions. *LWT*, 187, 115352. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115352>
17. Hooper, S.D., Bassett, A., Wiesinger, J.A., Glahn, R.P., & Cichy, K.A. (2023). Extrusion and drying temperatures enhance sensory profile and iron bioavailability of dry bean pasta. *Food Chemistry Advances*, 3, 100422. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100422>
18. Iqbal, S., Chen, X.D., Kirk, T.V., & Huang, H. (2020). Controlling the rheological properties of W1/O/W2 multiple emulsions using osmotic swelling: Impact of WPI-pectin gelation in the internal and external aqueous phases. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 185, 110629. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110629>
19. Kraithong, S., & Rawdkuen, S. (2020). Effects of food hydrocolloids on quality attributes of extruded red Jasmine rice noodle. *PeerJ*, 8, e10235. <https://doi.org/10.7717/peerj.10235>
20. Kraithong, S., Theppawong, A., Lee, S., & Huang, R. (2023). Understanding of hydrocolloid functions for enhancing the physicochemical features of rice flour and noodles. *Food Hydrocolloids*, 108821. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108821>
21. Lim, H.-P., Ho, K.-W., Singh, C.K.S., Ooi, C.-W., Tey, B.-T., & Chan, E.-S. (2020). Pickering emulsion hydrogel as a promising food delivery system: Synergistic effects of chitosan Pickering emulsifier and alginate matrix on

- hydrogel stability and emulsion delivery. *Food Hydrocolloids*, 105659. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105659>
22. Liu, X., Zhao, J., Zhang, X., Li, Y., Zhao, J., Li, T., & Qiao, L. (2018). Enrichment of soybean dietary fiber and protein fortified rice grain by dry flour extrusion cooking: The physicochemical, pasting, taste, palatability, cooking and starch digestibility properties. *RSC Advances*, 8(47), 26682-26690. <https://doi.org/10.1039/C8RA01781F>
23. Lv, D., Zhang, P., Chen, F., & Yin, L. (2022). Effects of emulsion concentration on the physicochemical properties of wheat bran arabinoxylan-soy protein isolate emulsion-filled gels used as β -carotene carriers. *Lwt*, 153, 112498. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112498>
24. Meng, W., Sun, H., MU, T.-H., & Garcia-Vaquero, M. (2024). Exploring pickering emulsions stabilized by chitosan and multiple seaweed polyphenols for an efficient protection and delivery of β -Carotene. *ACS Food Science & Technology*, 4(5), 1287-1300. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00178>
25. Miazek, K., Beton, K., Śliwińska, A., & Brożek-Pluska, B. (2022). The effect of β -carotene, tocopherols and ascorbic acid as anti-oxidant molecules on human and animal in vitro/in vivo studies: A review of research design and analytical techniques used. *Biomolecules*, 12(8), 1087. <https://doi.org/10.3390/biom12081087>
26. Mirzaei, M., Movahhed, S., Asadollahzadeh, M.J., & Ahmadi Chenarbon, H. (2021). Effect of carboxymethylcellulose and locust bean gums on some of physicochemical, mechanical, and textural properties of extruded rice. *Journal of Texture Studies*, 52(1), 91-100. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12563>
27. Mitra, P., Pakki, S.M., Acharya, B., & Khanvilkar, S. (2023). Optimization of single screw extrusion processing variables and soy and rice flour blend formulations based on physical properties of extrudates. *Current Chinese Science*, 3(4), 263-274. <https://doi.org/10.2174/2210298103666230203121700>
28. Muñoz-Pabon, K.S., Roa-Acosta, D.F., Hoyos-Concha, J.L., Bravo-Gómez, J.E., & Ortiz-Gómez, V. (2022). Quinoa snack production at an industrial level: effect of extrusion and baking on digestibility, bioactive, rheological, and physical properties. *Foods*, 11(21), 3383. <https://doi.org/10.3390/foods11213383>
29. Naji- Tabasi, S., Shahidi- Noghabi, M., Modiri Dovom, A., & Davtalab, M. (2023a). The use of hydrogel structures in production of extruded rice and investigation of its qualitative characteristics. *Food Science Nutrient*, 11(10), 5873-5881. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3466>
30. Naji- Tabasi, S., Shahidi- Noghabi, M., Modiri Dovom, A., & Davtalab, M. (2023b). The use of hydrogel structures in production of extruded rice and investigation of its qualitative characteristics. *Food Science & Nutrition*. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3466>
31. Naji, S., Razavi, S.M., & Karazhiyan, H. (2012). Effect of thermal treatments on functional properties of cress seed (*Lepidium sativum*) and xanthan gums: A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 28(1), 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.11.012>
32. Nourbehesht, N., Shekarchizadeh, H., & Soltanizadeh, N. (2018). Investigation of stability, consistency, and oil oxidation of emulsion filled gel prepared by inulin and rice bran oil using ultrasonic radiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 585-593. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.029>
33. Puspitasari, D.A., Pudjianto, K., Darussalam, A., Wicaksana, G.H., & Hastuti, H.P. (2024). The effect of sodium tripolyphosphate and guar gum on physical characteristics of analog rice from Gapelek flour. *AgriTECH*, 44(2), 153-160. <https://doi.org/10.22146/agritech.78300>
34. Putri, R., Rohmah, K., Lestari, I., Bahlawan, Z., Astuti, W., Kusumaningrum, M., & Purwanti, D. (2022). *Physical characteristics and nutritional value of cassava analogue rice with fortified protein tempeh and the addition of xanthan gum for healthy dieters*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/969/1/012036>
35. Qadir, N., & Wani, I.A. (2023). Functional properties, antioxidant activity and in-vitro digestibility characteristics of brown and polished rice flours of Indian temperate region. *Grain & Oil Science and Technology*, 6(1), 43-57. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.12.001>
36. Qi, W., Ma, C.M., Xing, W.J., Fan, J., Yang, Y., Yang, C.H., & Zhang, N. (2023). Effects of extrusion on physical properties of glutinous rice and its application in the improvement of quality characteristics of glutinous rice products. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16683>
37. Radu, G.L., Litescu, S.C., Albu, C., Teodor, E., & Truica, G. (2012). Beta-carotene and lycopene determination in new enriched bakery products by HPLC-DAD method. *Romanian Biotechnological Letters*, 17(1), 7006.
38. Ranjbar, S., Basiri, A., Elhamirad, A.H., Sharifi, A., & Chenarbon, H.A. (2018). Effect of hydrocolloids on physicochemical, sensory and textural properties of reconstructed rice grain by extrusion cooking technology. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 1622-1632. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9777-5>

39. Rehman, A., Ahmad, T., Aadil, R.M., Spotti, M.J., Bakry, A.M., Khan, I.M., & Tong, Q. (2019). Pectin polymers as wall materials for the nano-encapsulation of bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.015>
40. Rostamabadi, H., Falsafi, S.R., & Jafari, S.M. (2019). Nanoencapsulation of carotenoids within lipid-based nanocarriers. *Journal of Controlled Release*. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.02.005>
41. Saadat, S., Movahhed, S., & Ahmadi Chenarbon, H. (2019). Effect of guar and arabic gums on qualitative properties of extruded rice. *Journal of Food Process Engineering*, 42(2), e12959. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12959>
42. Semenova, M. (2017). Protein-polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 28, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.12.003>
43. Seo, Y., Moon, Y., & Kweon, M. (2021). Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions. *Applied Sciences*, 11(9), 4034. <https://doi.org/10.3390/app11094034>
44. Shao, Z., Han, J., Wang, J., Sun, Y., Li, X., & Liang, J. (2021). Process optimization, digestibility and antioxidant activity of extruded rice with *Agaricus bisporus*. *LWT*, 152, 112350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112350>
45. Sumardiono, S., Kusumayanti, H., Prakoso, N.I.A., Paundrianagari, F.P., & Cahyono, H. (2021). Influence of composite flour constituents and extrusion temperature in the production of analog rice. *Food Sci Nutr*, 9(8), 4385-4393. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2411>
46. Sun, Z., Lyu, Q., Zhuang, K., Chen, L., Wang, G., Wang, Y., & Ding, W. (2023). Impact of different preparation methods on the properties of brown rice flour and the cooking stability of brown rice noodles and the underlying mechanism: Microstructure, starch-protein distribution, moisture migration. *LWT*, 181, 114697. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114697>
47. Taheri, A., & Jafari, S.M. (2019). Nanostructures of gums for encapsulation of food ingredients. In *Biopolymer Nanostructures for Food Encapsulation Purposes* (pp. 521-578): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815663-6.00018-5>
48. Tangjaidee, P., Xiang, J., Yin, H., Wen, X., & Quek, S.Y. (2019). Selenium, fibre, and protein enrichment of rice product: extrusion variables and product properties. *Food quality and Safety*, 3(1), 40-51. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy028>
49. Torres, O.L., Lema, M., & Galeano, Y.V. (2021). Effect of using quinoa flour (*Chenopodium quinoa* Willd.) on the physicochemical characteristics of an extruded pasta. *International Journal of Food Science*, 2021(1), 8813354. <https://doi.org/10.1155/2021/8813354>
50. Wang, X., Zeng, M., Yu, Y.-H., Wang, H., Mannan, M.S., & Cheng, Z. (2017). Thermosensitive ZrP-PNIPAM Pickering emulsifier and the controlled-release behavior. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(8), 7852-7858. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b16690>
51. Wang, Y.-R., Yang, Q., Li-Sha, Y.-J., & Chen, H.-Q. (2021). Structural, gelation properties and microstructure of rice glutelin/sugar beet pectin composite gels: Effects of ionic strengths. *Food Chemistry*, 346, 128956. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128956>
52. Waterhouse, G.I., & Sun-Waterhouse, D. (2019). Encapsulation systems containing multi-nutrients/bioactives: From molecular scale to industrial scale. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21511-4>
53. Wei, Y., Wang, C., Liu, X., Mackie, A., Zhang, M., Dai, L., & Gao, Y. (2022). Co-encapsulation of curcumin and β -carotene in Pickering emulsions stabilized by complex nanoparticles: Effects of microfluidization and thermal treatment. *Food Hydrocolloids*, 122, 107064. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107064>
54. Xia, W., Lin, Y., Wang, F., Liu, Y., & Liu, R.H. (2024). Preparation and physicochemical properties: a new extruded rice using cassava starch and broken rice flour. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1383012. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1383012>
55. Xiong, G., Jia, L., Luo, L., Ding, Y., Lin, Q., & Liu, C. (2023). Improvement in texture and cooking quality of black rice (*Oryza sativa* L.) using different pretreatments. *Journal of Cereal Science*, 109, 103611. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103611>
56. Yan, M., & Jiang, S. (2023). Recent trends in functional characteristics and degradation methods of alginate. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 61, p. 01015). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236101015>
57. Zhang, H., Tan, S., Gan, H., Zhang, H., Xia, N., Jiang, L., & Zhang, X. (2023). Investigation of the formation mechanism and β -carotene encapsulation stability of emulsion gels based on egg yolk granules and sodium alginate. *Food Chemistry*, 400, 134032. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134032>
58. Zhang, Y., Qin, Y., Liang, Q., Hu, Y., & Luan, G. (2023). Breaking the temperature limitation of zein-rice starch dough by microwave pre-gelatinization: Morphological, structural and rheological properties of the dough. *Food Research International*, 173, 113465. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113465>

59. Zhao, Y., Dang, X., Du, H., Wang, D., Zhang, J., Liu, R., & Zhong, Q. (2024). Understanding the impact of extrusion treatment on cereals: Insights from alterations in starch physicochemical properties and in vitro digestion kinetics. *Animals*, 14(21), 3144. <https://doi.org/10.3390/ani14213144>
60. Zheng, Y., Tian, J., Ogawa, Y., Kong, X., Chen, S., Liu, D., & Ye, X. (2020). Physicochemical properties and in vitro digestion of extruded rice with grape seed proanthocyanidins. *Journal of Cereal Science*, 95, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103064>
61. Zhu, F. (2019). Starch based Pickering emulsions: Fabrication, properties, and applications. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.012>

The Effect of Serish Root Gum (*Eremurus luteus*) as Fat Replacer on Rheological, Physical and Sensory Properties of Low Fat Ice Cream

F. Sabzemeidani¹, M. Taghizadeh^{1*}, M.S. Hemmati Hasanpoor¹

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

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

Received: 20.09.2024	How to cite this article:
Revised: 04.01.2025	Sabzemeidani, F., Taghizadeh, M., & Hemmati Hasanpoor, M.S. (2025). The effect of Serish root gum (<i>Eremurus luteus</i>) as fat replacer on rheological, physical and sensory properties of low fat ice cream. <i>Iranian Food Science and Technology Research Journal</i> , 21(2), 199-219. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.89668.1363
Accepted: 19.02.2025	
Available Online: 23.04.2025	

Introduction

Ice cream is a frozen product, which is obtained from milk by adding compounds such as sweeteners, emulsifiers, stabilizers and flavoring agents. The structure of ice cream is a complex physicochemical system composed of three phases: liquid, solid and gas. Scientific results have shown that there is a connection between high fat consumption and cardiovascular diseases. Considering that ice cream is an almost fatty product and is particularly popular among people in the society, there is a greater demand for consuming low-fat varieties of this product. The food industry is also looking for new alternatives to minimize the negative effects of fat reduction on quality of ice cream. Hydrocolloids, are carbohydrate-based fat substitutes, which can mimic the mouthfeel and flow characteristics of fat cells due to their emulsifying and water binding capabilities. *Eremurus luteus* is one of the rhizome plants belonging to the Asphodelaceae family, cultivated around the world, including Iran. Cerise root gum is a new source of hydrocolloid with a glucose to mannose ratio of 1:1 to 1 from the family of glucomannans. The intrinsic viscosity of this gum was measured as 6.32 and 6.35 dl/g according to Huggins and Kramer equations, respectively, and it has the highest foam stability in concentrations of 0.2 to 0.5%. The rheological properties of cerise root gum have proven its important role as a new thickener, stabilizer and foaming agent.

Materials and Methods

In this research, sterilized and homogenized milk (1.5% fat) from Mihan Dairy Industries Company, sterilized and homogenized cream (25% fat) from Pegah Khorasan Dairy Industries Company, emulsifier 471 E from Beldom Belgium Company, powdered skim milk from Pegah company, Sugar and vanilla from confectionery store. Serish root gum was prepared according to the method of Salahi *et al.* (2021).

The amount of ingredients required for the normal sample (high-fat control) was determined based on primary sources, including 10% fat, 11% fat-free milk solids, 12% sugar, 0.25% stabilizer, 0.15% emulsifier and 0.1% vanilla. According to the definitions for reduced-fat ice cream, 75% fat reduction was made from the normal sample (10% fat). In this regard, the investigated treatments were as follow: the amount of fat (2.5% fat: L), the type of gum (SRG) and the concentration of gum (at four levels: 0.2, 0.3, 0.4, 0.5%) compared to the control sample as high fat (10% fat: F).

First, the liquid ingredients, including milk and cream, were continuously stirred while heating up to a maximum of 5 °C. After that, the mixture of solid materials (sugar, milk powder, gum, etc.) was added to the liquid part and mixed with a stirrer for three minutes after dissolving the solids. The resulting mixture was pasteurized at 80°C for 25 seconds and homogenized with a homogenizer at 22,000 rpm for 1 minute and transferred to a water, salt, and ice bath and cooled to 50°C. Then, it was kept in the refrigerator at a temperature of 5°C for 24 hours. Finally, the mixture was transferred to a non-continuous ice cream machine for 15 minutes for the freezing stage, and the samples were poured into special containers with lids and coded, and placed in a freezer at -18 °C



for at least 24 hours.

Results and Discussion

By adding gum and increasing its concentration, the amount of apparent viscosity, consistency coefficient, yield stress, plastic viscosity, textural characteristics (hardness, adhesion, continuity and apparent modulus of elasticity) increased. In the sensory evaluation section, the characteristics of creaminess, sweetness, viscosity, roughness, coldness and hardness were evaluated by transient dominant sensation test and these changes were significant in most cases. Sample containing 0.3% gum had the highest overall acceptance after the control sample compared to other samples. The results showed that these variables have the ability to simulate rheological properties (apparent viscosity, consistency coefficient, yield stress and plastic viscosity), melting speed and sensory characteristics such as creaminess, roughness, cryogenicity, viscosity, hardness and overall acceptance of the control sample with high fat as effective factors on the texture production process and the mouthfeel of the product in low-fat ice creams. On the other hand, due to the absence of significant differences between the data obtained from the pH and dry matter measurement tests, the applicability of Serish gum can be confirmed as a fat substitute.

Conclusion

The examined samples all showed the loosening behavior with cutting. In the sample containing 0.2% gum, the melting speed increased (from 0.32 to 0.39), also with the increase in the amount of gum in the samples, the freezing temperature decreased by one degree Celsius (from 39.4 to 39.5). Overall acceptance, pH and dry matter did not change significantly, which indicates the usefulness and applicability of this method. Also, regarding the rheological characteristics, the highest consistency coefficient in the 0.5% gum sample was 2.2605, similarly, the highest yield stress was in 0.5% gum sample and was 6.7076 pa. Similarly, the highest amount of Plastic viscosity and apparent viscosity belonged to the sample containing 0.5% gum. It was also shown that in the rheological characteristics, with the increase in the amount of gum in the samples, the amount of the relevant parameter increased significantly, and in all these parameters, sample containing 0.2% showed a lower amount than the control sample.

Keywords: Fat replacer, Hydrocolloid, Low fat ice cream, Rheology, Serish root Gum (*Eremurus luteus*)

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۹۹-۲۱۵

بررسی تأثیر صمغ ریشه گیاه سریش به عنوان جانشین چربی بر ویژگی‌های فیزیکی، حسی و رئولوژیکی بستنی کم چرب

فاطمه سبزه‌میدانی^۱ - مسعود تقی‌زاده^{۱*} - محمد صالح همتی حسن‌پور^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

چکیده

توسعه جانشین چربی که خصوصیات بافتی و کیفیت حسی بستنی را حفظ کند، همچنان یک چالش بزرگ در کاهش چربی بستنی است. در این پژوهش، در جهت کاهش میزان درصد چربی بستنی پرچرب به ۲/۵ درصد به‌وسیله صمغ ریشه گیاه سریش در سطوح مختلف (۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد) که به‌عنوان جایگزین چربی مورد استفاده قرار گرفت و پس از تولید مخلوط بستنی مدنظر، آزمون‌های فیزیکی، رئولوژیکی و حسی بر تیمارهای ایجاد شده در مقایسه با نمونه پرچرب (۱۰ درصد) انجام گردید. براساس نتایج حاصل، نمونه‌های مورد بررسی تماماً رفتار شل‌شونده با برش را از خود نشان دادند. در نمونه حاوی ۰/۲ در صد از صمغ، سرعت ذوب با افزایش (از ۰/۳۲ به ۰/۳۹) رو به رو شد، همچنین با افزایش میزان صمغ در نمونه‌ها، دمای خروج از انجماد یک درجه سلسیوس کاهش پیدا کرد (از ۴/۳۹- به ۵/۳۹-). پذیرش کلی، pH و ماده خشک تغییر واضحی نداشتند ($P \geq 0.05$) که نشان‌دهنده مفید و کاربردی بودن این روش می‌باشد. همین‌طور در خصوص ویژگی‌های رئولوژیکی، بیشترین میزان ضریب قوام در نمونه ۰/۵ در صد صمغ و برابر با ۲/۲۶۰۵، به‌طور مشابه بیشترین تنش تسلیم نیز در نمونه ۰/۵ در صد صمغ و برابر با ۶/۷۰۷۶ Pa و به همین شکل، بیشترین مقدار ویسکوزیته پلاستیک ($P < 0.05$) و ویسکوزیته ظاهری ($P \geq 0.05$) نیز متعلق به نمونه حاوی ۰/۵ در صد صمغ بود. همچنین نشان داده شد که در ویژگی‌های رئولوژیکی با افزایش میزان صمغ در نمونه‌ها، میزان پارامتر مربوطه افزایش قابل توجهی داشت که در تمام این پارامترها، نمونه حاوی ۰/۲ در صد به شکل استثنا از نمونه شاهد میزان کمتری را نشان داد، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از صمغ ریشه گیاه سریش به‌عنوان جایگزین چربی برخی خصوصیات نمونه‌های کم‌چرب را پرچرب نزدیک کرده و می‌تواند با ارائه یک محصول سالم‌تر با ویژگی‌های بافتی و حسی قابل قبول منجر به تولید محصولی مورد استقبال مصرف‌کنندگان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بستنی کم‌چرب، جایگزین چربی، رئولوژی، صمغ ریشه گیاه سریش، هیدروکلوئید

مقدمه

(2003). نتایج علمی نشان داده‌اند که میان مصرف چربی زیاد و بیماری‌های قلبی عروقی ارتباط وجود دارد، با نظر به اینکه بستنی فرآورده‌ای تقریباً چرب است و از محبوبیت ویژه‌ای نیز در بین افراد جامعه دارد، تقاضای بیشتری برای مصرف انواع کم‌چرب این فرآورده وجود دارد. سرانه مصرف بستنی در ایران به‌طور میانگین برای هر فرد ۳/۵ تا ۴ لیتر در سال گفته شده است (Iranian Dairy Products Industry

بستنی یک فرآورده منجمد است که از شیر با افزودن ترکیباتی مانند مواد شیرین‌کننده، امولسیفایر، پایدارکننده و مواد مولد عطر و طعم به‌دست می‌آید. ساختمان بستنی یک سیستم فیزیکوشیمیایی پیچیده است که شامل سه‌فاز مایع، جامد و گاز می‌باشد (Marshall et al.,

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

(Association, 2019). صنعت غذا نیز در جستجوی جایگزین‌های جدید است تا اثرات منفی کاهش چربی بر کیفیت بستنی را به حداقل برساند (Javidi et al., 2016). عمدتاً جایگزین‌های چربی بر پایه کربوهیدرات‌ها، هیدروکلوئیدها هستند که به دلیل قابلیت امولسیون کنندگی و اتصال به آب، می‌توانند ویژگی‌های حس دهانی و جریانی را از گلبول‌های چربی تقلید کنند (Lim, Inglett, & Lee, 2010).

سریش با نام علمی *Eremurus luteus* از گیاهان ریزوم‌دار بهار گل متعلق به خانواده آسفودلاسه است که به‌طور عمده در دنیا و از جمله ایران و در مناطقی مانند خراسان قابل رویش می‌باشد (Javidi et al., 2016). صمغ ریشه‌ی سریش به‌عنوان یک منبع جدید هیدروکلوئیدی است که با نسبت گلوکز به مانوز ۱/۱ به ۱ از خانواده گلوکومانان‌ها است. ویسکوزیته ذاتی این صمغ، بنا بر معادلات هاگینز و کرامر به ترتیب برابر ۶/۳۲ و ۶/۳۵ دسی‌لیتر بر گرم اندازه‌گیری شد و در غلظت‌های ۰/۲ تا ۰/۵ درصد، بالاترین ثبات کف را دارد. خواص رئولوژیکی صمغ ریشه سریش نقش مهم آن را به‌عنوان یک غلیظ‌کننده، پایدارکننده و عامل کف‌کننده جدید نشان داده است (Salahi, Razavi, & Amiri, 2022). پودر سریش مستخرج از غده‌های ریشه‌ای سریش *Eremurus luteus* بوده و حاوی ترکیبات مختلفی از جمله پروتئین (۶/۲۲ درصد)، کربوهیدرات (۸۶/۴۵ درصد) و اسیدهای اورونیک (۸/۶ درصد) است. کربوهیدرات‌های موجود در صمغ این گیاه می‌توانند مقادیر زیادی آب به خود جذب کرده و جزء هیدروکلوئیدها دسته‌بندی می‌شوند (Salahi et al., 2022). علاوه بر کربوهیدرات‌های مختلف از جمله گالاکتومانان، اینولین نیز بخش زیادی از محتوای مواد جامد پودر سریش را تشکیل می‌دهد. این ماده پلی‌ساکاریدی متشکل از گروه‌های تکرارشونده فروکتوز است که برخلاف نشاسته محلول در آب نیز هست (Hoseini-parvar et al., 2010). ماهیت محلول در آب اینولین به این معنی است که می‌تواند رطوبت سیستم را به خود جذب کرده و تشکیل شبکه ژل‌مانندی بدهد که در نهایت باعث تغییر خصوصیات رئولوژیکی سیستم بستنی از جمله ویسکوزیته آن می‌گردد (Amiri Aghdaei et al., 2012).

مطالعاتی بر روی صمغ دانه ریحان انجام گرفت که نشان داد، این صمغ رفتار سودوپلاستیک را با افزایش تدریجی غلظت دار می‌باشد (Bahramparvar & Gof, Hosseini-Parvar et al., 2010). صمغ دانه ریحان می‌تواند به‌عنوان عوامل کف‌کننده، امولسیون‌کننده، غلیظ‌کننده، ژل‌کننده، اتصال‌دهنده، جایگزین‌کننده چربی، تثبیت‌کننده و معلق‌کننده در بسیاری از محصولات غذایی عمل کند (Poursani et al., 2021).

اثر جایگزینی مقادیر متفاوت صمغ‌های کربوکسی‌متیل سلولز و ثعلب با صمغ دانه بالنگو شیرازی بر ویژگی‌های بستنی خامه‌ای سخت پژوهش گردید، نتایج بیان داشتند که استفاده از صمغ بالنگو و اثر هم‌افزایی آن همراه با سایر صمغ‌ها باعث کاهش اور ران^۱، افزایش ویسکوزیته و بهبود خصوصیات حسی بستنی می‌گردد. (Bahramparvar et al., 2013). همچنین لیو و همکاران از صمغ دانه‌های ریحان و بالنگو و همچنین گزانتان به‌عنوان جایگزین چربی در فرمولاسیون کره پسته کم‌چرب استفاده کرد و نتایج روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی جایگزین‌های چربی در فرمولاسیون کره پسته کم‌کالری مناسب تشخیص داده شد (Liu et al., 2018).

در این پژوهش، برای نخستین‌بار از صمغ ریشه گیاه سریش به‌عنوان جایگزینی برای چربی در بستنی استفاده شد و اثرات آن بر ویژگی‌های رئولوژیکی، فیزیکی و حسی بستنی کم‌چرب مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این پژوهش، ارزیابی توانایی این جایگزین در تقلید خصوصیات بستنی پرچرب بود به‌نحوی که ویژگی‌های رئولوژیکی، فیزیکی و حسی مطلوب آن حفظ شود.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

در این پژوهش شیر استریلیزه و هموژنیزه (۱،۵ درصد چربی) از شرکت صنایع لبنی میهن، خامه استریلیزه و هموژنیزه (۲۵ درصد چربی) از شرکت صنایع لبنی پگاه خراسان، امولسیفایر E۴۷۱ از شرکت بلدوم (Beldom Belgium, company)، شیر خشک بدون چربی از شرکت پگاه، شکر و وانیل از فروشگاه لوازم قنادی، صمغ ریشه سریش بر اساس روش صلاحی و همکاران (Salahi et al., 2021) تهیه و خریداری شد.

تهیه صمغ ریشه سریش

در این پژوهش، شرایط بهینه استخراج صمغ ریشه سریش شامل دمای ۷۹ درجه سلسیوس، نسبت آب به ماده جامد ۳،۹۸ به ۱ (وزنی/وزنی)، و زمان ۳ ساعت و ۱۲ دقیقه تعیین شد که طبق بررسی صلاحی و همکاران (۲۰۲۱) حداکثر بازدهی و کیفیت صمغ را به همراه داشته است.

روش تهیه بستنی

مقدار ترکیبات موردنیاز برای نمونه معمولی (شاهد پرچرب) بر اساس منابع اولیه مشخص شد که شامل ۱۰ درصد چربی، ۱۱ درصد

اندازه‌گیری ضریب افزایش حجم (درصد) بستنی با اندازه‌گیری وزن حجم مشخصی از بستنی پیش و پس از مرحله انجماد و تعیین درصد اختلاف آنها بر اساس رابطه‌ی (۱) محاسبه شد (Arbuckle, 1986).

$$(1) \times 100 = \frac{(Weight\ of\ ice\ cream\ mix - Weight\ of\ ice\ cream)}{Weight\ of\ ice\ cream}$$

(overrun) ضریب افزایش حجم بستنی

اندازه‌گیری سرعت ذوب بستنی

سرعت ذوب بستنی بعد از یک روز سفت‌شدن، اندازه‌گیری شد. مقادیر ذوب شده نمونه‌های ۵۰ گرمی بر روی توری فلزی قرار گرفت و وزن شد و در دمای محیط هر دو دقیقه ثبت شد. سپس با ترسیم نمودار از مقادیر تعیین شده در برابر زمان، شیب نمودار ($g\ min^{-1}$) به عنوان سرعت ذوب نمونه‌ها تعیین گردید (Arbuckle, 1986).

ارزیابی حسی

ارزیابان حسی شامل ۲۴ دانشجوی دانشگاه فردوسی مشهد در محدوده سنی ۲۳-۳۰ بودند. نمونه‌های تولیدی درون ظروف پلاستیکی قرار داده شد و از کدهای سه رقمی تصادفی برای نامگذاری نمونه‌ها استفاده گردید. نمونه‌ها بر اساس طرح مربع ویلیامز در اختیار ارزیاب‌ها قرار گرفت. آزمون‌ها در مرکز پیشرفته ارزیابی حسی و شناختی دانشگاه فردوسی مشهد در غرفه‌های انفرادی، زیر نور سفید مصنوعی، در دمای محیط ($25^{\circ}C$) انجام شدند. برای انتخاب ویژگی‌های حسی جلسه اول به تولید واژگان و تعاریف مرتبط با ویژگی‌های طعم و بافت اختصاص داده شد؛ به این صورت که دو نمونه متفاوت به گروه ارزیاب حسی ارائه و از آنها خواسته شد تا تعریف خود را درباره هر یک از ویژگی حسی که حین مصرف محصول ادراک می‌شود، بیان کنند. سپس در یک جلسه بحث آزاد، گروه به توافق رسیدند. ارزیاب حسی در مورد بهترین توصیف برای هر یک از صفات حسی طبق جدول ۱ به توافق رسیدند.

آزمون‌های رئولوژیکی

خصوصیات رئولوژیکی مخلوط را، پس از مدت‌زمان یک روز و با استفاده از دستگاه ویسکومتر چرخشی بوهلین (Bohlin Model Visco 88, Bohlin instruments, UK دارای سیرکولاتور حرارتی (Model F12-MC, Julabo Labortechnik, Germany Julabo)، در دمای $5 \pm 0.5^{\circ}C$ و درجه برش ($1400-14s^{-1}$) ارزیابی شد. انتخاب اسپیندل (کاپ و باب) مناسب بر اساس بررسی چشمی ویسکوزیته نمونه، تعیین و در نهایت از C_{52} استفاده شد (Akbari et al., 2016). ویسکوزیته ظاهری آمیخته نیز در درجه برش $50\ s^{-1}$ به دلیل درجه برش مؤثر دهانی طی آزمایشات بررسی شد.

ماده جامد بدون چربی شیر، ۱۲ درصد شکر، ۰/۲۵ درصد پایدارکننده، ۰/۱۵ درصد امولسیفایر و ۰/۱ درصد وانیل بود و باتوجه به تعاریف برای بستنی با چربی کاهش یافته، کاهش ۷۵ درصد از چربی نمونه معمولی (۱۰ درصد چربی) تعیین گردید. در این رابطه تیمارهای مورد بررسی شامل مقدار چربی (۲/۵ درصد چربی: L) نوع صمغ (ریشه سریش (SRG)) غلظت صمغ (در چهار سطح ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ درصد) در مقایسه با نمونه شاهد پرچرب (۱۰ درصد چربی: F) است.

ابتدا مواد مایع شامل شیر و خامه ضمن حرارت دادن تا حداکثر $5^{\circ}C$ به صورت مداوم هم زده شد. پس از آن مخلوط مواد جامد (شکر و شیرخشک و صمغ و...) به مایع اضافه گردید و پس از حل شدن، به وسیله همزن به مدت سه دقیقه کامل مخلوط شد. مخلوط حاصل در دمای $10^{\circ}C$ به مدت ۲۵ ثانیه پاستوریزه و با هموژنایزر به مدت ۱ دقیقه با دور ۲۲۰۰۰ هموژن گردید و به حمام آب، نمک و یخ منتقل و تا دمای $5^{\circ}C$ سرد شد. سپس، جهت طی کردن مرحله رسیدن به مدت زمان ۲۴ ساعت در یخچال در دمای $5^{\circ}C$ نگهداری شد. در نهایت آمیخته برای مرحله انجماد، به دستگاه بستنی‌ساز غیر مداوم به مدت ۱۵ دقیقه منتقل و نمونه‌ها در ظروف مخصوص درب‌دار ریخته و کدگذاری شد و حداقل به مدت زمان ۲۴ ساعت در فریزر $18^{\circ}C$ قرار گرفت (Poursani et al., 2021).

اندازه‌گیری ماده خشک

ماده خشک مخلوط بستنی پس از مرحله رسیدن در آون $100^{\circ}C$ درجه سلسیوس به مدت ۳/۵ ساعت تعیین شد (AOAC, 2005).

اندازه‌گیری pH

پس از مرحله رسیدن بستنی، pH توسط دستگاه pH متر (Instrument, 3P86A pH meter 86505 Z m)، اندازه‌گیری شد (National Standard of Iran, No. 2852).

اندازه‌گیری دمای خروج از بستنی‌ساز

بعد از تهیه بستنی در دستگاه بستنی‌ساز و پیش از ریختن نمونه‌ها در ظروف مخصوص، دمای خروج بستنی سریعاً با استفاده از دماسنج دیجیتال در داخل ظرف مخصوص دستگاه اندازه‌گیری شد (Goff et al., 1992).

اندازه‌گیری ضریب افزایش حجم بستنی

جدول ۱- تعاریف صفات حسی توافق شده توسط گروه ارزیاب حسی

Table 1- Definitions of sensory attributes agreed by the sensory evaluation group

صفات	تعاریف
Attributes	Definitions
خامامای	نمونه دارای بافت نرم و یکنواخت است.
Creaminess	Sample has a soft and uniform texture.
شیرینی	طعم مشابه طعم ساکارز خالص در هنگام خوردن است.
Sweetness	The taste is similar to that of pure sucrose when eaten.
صمغیت	درک بافت صمغی و چسبنده که نسبتاً حالت جویدنی دارد.
Gumminess	Understanding the gummy and sticky texture that is chewy state.
زبری	احساس زبری در دهان ناشی از احساس تکه‌های یخ در نمونه.
Roughness	A rough feeling in the mouth due to the feeling of ice pieces in the sample.
سردی	احساس سردی در دهان بعد از قراردادن نمونه.
Coldness	Cold feeling in the mouth after placing the sample.
سفتی	مقدار نیروی موردنیاز زبان برای صاف کردن نمونه بر روی کام.
Hardness	The amount of force required by the tongue to smooth the sample on the palate.

تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که اختلاف معنی‌داری در غلظت‌های مختلف صمغ سریش، موجب تأثیر بر میزان ماده خشک نمونه‌های آمیخته بستنی نشده است ($P \geq 0.05$) در استاندارد شماره ۱۱۹۰ سازمان ملی استاندارد ایران ذکر شده است که حداقل ماده خشک بستنی پرچرب باید ۳۲ درصد باشد که باتوجه به نتایج ارائه شده در **جدول ۲** تمام نمونه‌ها بیش از ۳۲ درصد ماده خشک را داشته‌اند. در پژوهش انجام شده توسط کدی و همکاران (Cody et al., 2007) مقدار ماده خشک نمونه‌های بستنی حاوی ۱۰/۰۴ تا ۱۰/۰۴ درصد چربی بین ۳۱/۳۱ تا ۴۱/۱۶ درصد گزارش گردید. در پژوهشی مشابه فرجی و همکاران (Faraji Kashefvari et al., 2013) مقدار ماده خشک نمونه‌های بستنی کم‌چرب حاوی کنسانتره پروتئین آب پنیر و ایزوله پروتئین سویا را ۳۴ درصد بیان داشتند که تأثیر این متغیرها بر ماده خشک از نظر آماری معنی‌دار نبودند. کورت و همکاران (Kurt et al., 2016) نیز تأثیر معنی‌داری را با افزایش غلظت صمغ کتیرا در ماده خشک نمونه‌های بستنی گزارش نکردند.

pH

در **جدول ۳** نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن تغییرات pH در نمونه‌های آمیخته بستنی بیان شده است. همان گونه که در جدول نیز نشان داده شده است، افزودن صمغ ریشه سریش تأثیر معنی‌داری بر pH نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد (بستنی پرچرب)، ایجاد نکرده است ($P \geq 0.05$) pH مطلوب بستنی در محدوده ۶/۲-۶/۶ قرار دارد (Marshall, 2003). عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین pH نمونه‌ها در تحقیقات مشابه، توسط پورثانی و همکاران (Poursani et al., 2021) و جاویدی و همکاران (Javidi et al., 2016) و بیگی و همکاران (Beige et al., 2019) نیز به ثبت رسیده است. در تحقیق دیگر انجام شده توسط پورثانی و همکاران (Poursani et al., 2021) مشخص

رفتار جریان نمونه‌ها با مدل‌های قانون توان (۲)، هرشل بالکی (۳)، کاسون (۴)، بینگهام (۵) مقایسه شد. روابط آنها در ادامه آورده شده است:

$$\tau = (\gamma^\circ)^n \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0^H + k(\gamma^\circ)^n \quad (2)$$

$$\tau = \sqrt{k^\circ C} + k_c \sqrt{\gamma^\circ} \quad (3)$$

$$\tau = \tau_{0B} + \mu_B (\gamma^\circ) \quad (4)$$

آنالیز آماری

آزمایش‌ها حداقل در دو تکرار و به صورت طرح کاملاً تصادفی انجام شد. آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ انجام گرفت. نتایج در معرض آنالیز واریانس قرار گرفتند. از آزمون دانکن در سطح آماری ۹۵ درصد برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. برای مدل سازی داده‌های رئولوژیکی از نرم‌افزار متلب ۲۰۱۸ و برای ترسیم منحنی‌ها از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ استفاده شد.

نتایج و بحث

خواص رئولوژیکی آمیخته بستنی بعد از ۲۴ ساعت از زمان تولید و نگهداری در فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس، مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها ارزیابی شد و در ادامه رفتار جریانی نمونه‌های آمیخته بستنی با مدل‌های قانون توان، هرشل بالکی، کاسون، بینگهام مقایسه و مدل نهایی ارائه شده است.

ماده خشک

در **جدول ۲** نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن تغییرات ماده خشک بستنی در نمونه‌های آمیخته بستنی بیان شده است. بررسی نتایج

گردید افزودن صمغ دانه بالنگو و پروتئین آب پنیر بر pH تأثیر معنی‌دار ندارد و مقدار pH را در حدود ۶/۳-۶/۶ گزارش نمودند. لو و همکاران (Lu et al., 2014) نیز با افزودن آرد موز سبز تغییر معنی‌داری را بر

جدول ۲- ماده خشک آمیخته بستنی به عنوان تابعی از غلظت‌های مختلف صمغ

Table 2- The dry matter of the ice cream mixture as a function of different concentrations of gum

Sample code کد نمونه	ماده خشک Dry Matter
Control	33.14 ^a ± 0.02
0.2%SRG	32.51 ^a ± 0.02
0.3%SRG	32.59 ^a ± 0.01
0.4%SRG	32.65 ^a ± 0.02
0.5%SRG	32.42 ^a ± 0.05

حروف یکسان نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است ($P \geq 0.05$) حروف کوچک مقایسه میانگین میان تیمارهای مورد آزمون (۵ تیمار)
Letters show significancy (same letters indicate no significant difference) lowercase letters show compare means

جدول ۳- pH آمیخته بستنی به عنوان تابعی از غلظت‌های مختلف صمغ

Table 3- pH of ice cream mixture as a function of different gum concentration

Sample code کد نمونه	pH
Control	6.63 ^a ± 0.01
0.2%SRG	6.35 ^a ± 0.03
0.3%SRG	6.20 ^a ± 0.00
0.4%SRG	6.62 ^a ± 0.00
0.5%SRG	6.62 ^a ± 0.01

حروف یکسان نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است ($P \geq 0.05$) حروف کوچک مقایسه میانگین میان تیمارهای مورد آزمون (۵ تیمار)
Letters show significancy (same letters indicate no significant difference) lowercase letters show compare means

خواص فیزیکی

تغییرات دمای خروج از بستنی‌ساز

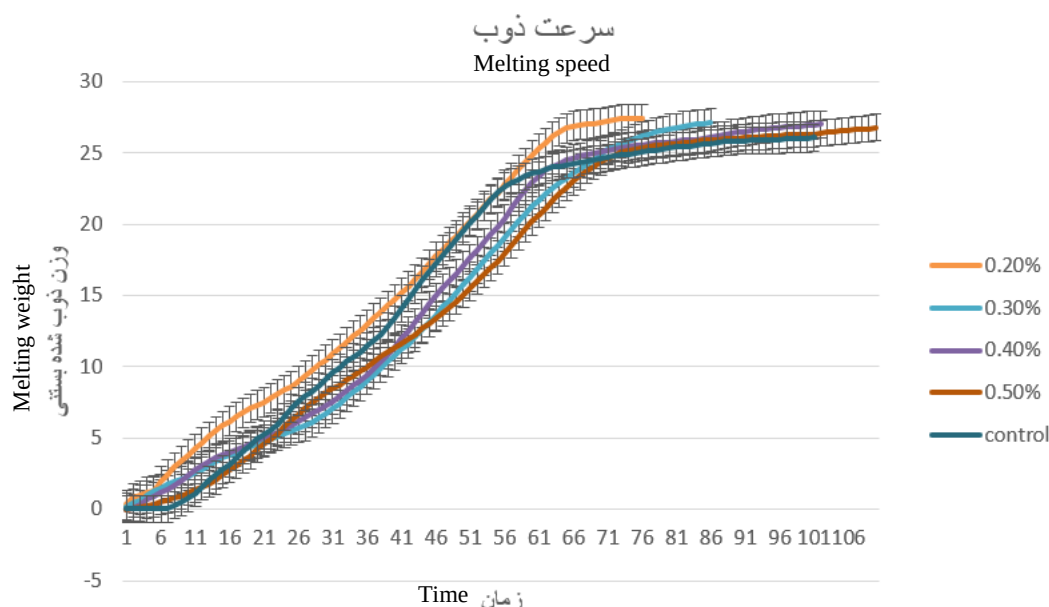
در شکل ۱ نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن تغییرات سرعت ذوب بستنی در نمونه‌های آمیخته بستنی آورده شده است. با بررسی تجزیه و تحلیل تغییرات سرعت ذوب تحت تأثیر غلظت‌های متفاوت صمغ سریش مشخص شد که سرعت ذوب تحت تأثیر معنی‌دار غلظت‌های صمغ ریش قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که نتایج آزمون دانکن نیز نشان داده است که میزان سرعت ذوب در نمونه‌ها با هم تفاوت آماری معنی‌داری را داشته است. بیشترین و کمترین سرعت ذوب به ترتیب مربوط به نمونه بستنی حاوی ۰/۲ درصد و نمونه ۰/۵ درصد صمغ ریشه سریش به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۲۸ بوده است. ذوب بستنی شامل پدیده‌های انتقال گرما و جرم است که در آن آب رسانی حرارتی بالاتری نسبت به چربی دارد (Soukoulis et al., 2008). ترکیبات مخلوط، ضریب قوام مخلوط، مقدار هوای موجود، حجم و ماهیت

کریستال‌های یخ و شبکه گلبول‌های چربی بر ویژگی‌های ذوب تأثیر می‌گذارند (Javidi et al., 2016). بطوری که ذرات چربی جامد ویسکوزیته ماتریس را افزایش و از این رو سرعت ذوب کاهش می‌یابد (Aziz, 2018)؛ لذا مقدار چربی در فرمولاسیون بستنی نقش مهمی دارد. کمپ و همکاران (Kemp et al., 2018) گزارش کردند که بستنی با جایگزین‌های چربی و چربی کاهش یافته سریع‌تر ذوب می‌شود، که در نتیجه پذیرش مصرف‌کننده از خامه بودن را کاهش می‌دهد؛ با این وجود به کارگیری هیدروکلوئیدها در بستنی به عنوان تثبیت‌کننده مقاومت در برابر ذوب را بهبود می‌بخشد (Kemp et al., 2018).

از آنجایی که سرعت انتقال حرارت آب محصور شده کمتر از آب آزاد است (Akbari et al., 2016)، سرعت ذوب نمونه‌های بستنی کم‌چرب، با افزایش مقدار صمغ ریشه سریش که موجب محصور شدن بیشتر آب آزاد می‌شوند منجر کاهش معنی‌دار سرعت ذوب نمونه‌های

و همکاران (Lim et al., 2010) دریافتند که افزودن جایگزین چربی کربوهیدراته، میزان سرعت ذوب نمونه‌های مربوطه را کاهش داد و به مقدار این خصوصیت در نمونه شاهد (پرچرب) نزدیک کرد، در این باره می‌توان به ظرفیت بالای صمغ‌ها برای اتصال به آب موجود در فرمولاسیون اشاره کرد (Lim et al., 2010).

بستنی کم‌چرب شدند. بهرام پرور و همکاران (Bahramparvar et al., 2013)، مشاهده کردند با افزایش سهم صمغ دانه ریحان، سرعت ذوب نمونه‌های بستنی کاهش یافت که این امر را می‌توان به ویسکوزیته و قدرت نگهداری آب بالاتر از آمیخته‌های تهیه شده از صمغ دانه ریحان نسبت دادند (Bahramparvar et al., 2013). لیم



شکل ۱- سرعت ذوب نمونه‌های بستنی به‌عنوان تابعی از درصد‌های مختلف صمغ ریشه سریش در مقایسه با نمونه شاهد پرچرب (شاهد)
Fig. 1. The melting speed of the ice cream samples of the title as a function of the different percentages of the root gum in comparison with the high-fat control sample

سریش قرار گرفته است؛ به‌گونه‌ای که نتایج آزمون دانکن نیز نشان داده است که امتیازات پذیرش کلی در برخی نمونه‌ها با هم تفاوت آماری معنی‌داری را داشته است. بیشترین و کمترین پذیرش کلی بستنی به‌ترتیب مربوط به نمونه شاهد و نمونه بستنی حاوی ۰,۲ درصد صمغ سریش بوده است.

خواص حسی

با بررسی تجزیه و تحلیل واریانس امتیازات پذیرش کلی بستنی تحت تأثیر غلظت‌های متفاوت صمغ ریشه سریش مشخص شد که امتیازات پذیرش کلی بستنی تحت تأثیر معنی‌دار غلظت‌های صمغ

جدول ۴- داده‌های مربوط به آزمون پذیرش کلی تحت تأثیر تیمار مستقل غلظت صمغ

Table 4- Data related to general acceptance test under the influence of independent treatment of gum concentration

کد نمونه Sample code	پذیرش کلی General admission
Control	7.63 ^a
0.2%SRG	6.15 ^d
0.3%SRG	7.56 ^a
0.4%SRG	7.17 ^b
0.5%SRG	6.45 ^c

حروف یکسان نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است ($P \geq 0.05$) حروف کوچک مقایسه میانگین میان تیمارهای مورد آزمون (۵ تیمار)

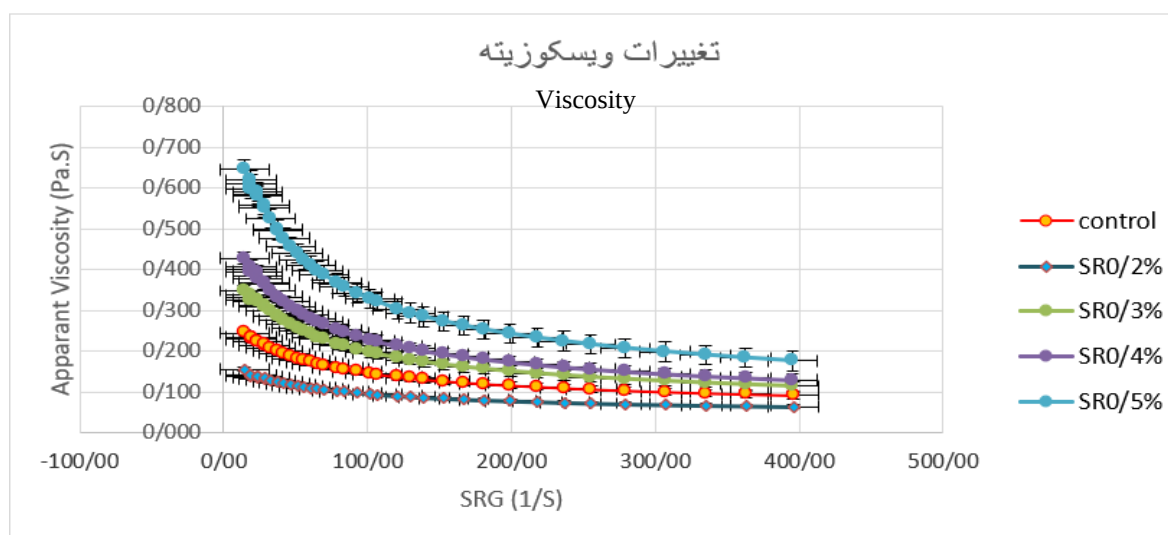
Letters show significancy (same letters indicate no significant difference) lowercase letters show compare means

خواص رئولوژیکی

رفتار جریان

نتایج آزمون رفتار جریانی بستنی شاهد (بدون صمغ سریش) نشان می‌دهد که نمونه‌های بستنی به‌طور کلی رفتار شل شونده با برش داشته و با افزایش سرعت برش، ویسکوزیته نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد با اضافه کردن ۰/۲ درصد صمغ سریش به بستنی کم‌چرب، خصوصیت سودوپلاستیک بستنی کاهش یافته اما با افزایش درصد صمغ سریش، خاصیت شل‌شوندگی آنها افزایش یافت به نحوی که ویسکوزیته نمونه حاوی ۰/۵ درصد سریش با افزایش سرعت برش بیش از سایر نمونه‌ها کاهش یافت. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، به‌طور کلی ویسکوزیته تمام نمونه‌ها با افزایش غلظت صمغ افزایش می‌یابد (بجز نمونه حاوی ۰/۲ درصد سریش). دلیل افزایش ویسکوزیته در اثر افزودن صمغ را می‌توان به ماهیت آبدوست سریش نسبت داد (Amiri Eghdaie et al., 2012). پودر سریش مستخرج از غده‌های ریشه‌ای سریش *Eremurus luteus* بوده و حاوی ترکیبات مختلفی از جمله پروتئین (۶/۲۲ درصد)، کربوهیدرات (۸۶/۴۵ درصد) و اسیدهای اورونیک (۸/۶ درصد) است. کربوهیدرات‌های موجود در صمغ این گیاه می‌توانند مقادیر زیادی آب به خود جذب کرده و جزو هیدروکلوئیدها دسته‌بندی می‌شوند (Salahi et al., 2021) علاوه بر کربوهیدرات‌های مختلف از جمله گالاتومانان، اینولین نیز بخش زیادی از محتوای مواد جامد پودر سریش را تشکیل می‌دهد.

گزارش شده است که پلیمرهای گالاتومانان که وزن مولکولی بالایی دارند از قانون ویسکوزیته نیوتن تبعیت نمی‌کنند. در مقابل، رفتار شل‌شونده با برشی یا شبه پلاستیک را نشان می‌دهند، یعنی ویسکوزیته آنها با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد (Shahrampour et al., 2023). افزایش ویسکوزیته در نتیجه افزودن صمغ به سیستم را از نقطه‌نظر فیزیکوشیمیایی می‌توان به درهم رفتن زنجیره‌های بلند هیدروکلوئید، و در نتیجه افزایش حجم هیدرودینامیک این مولکول‌ها در محلول‌های با پایه آب یا شیر مرتبط دانست (Alghuna et al., 2015). در حقیقت، در طول فرآیند تولید بستنی، کریستال‌های ناشی از هیدروکلوئیدها دانه‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند که آب را جذب کرده و شاخص ویسکوزیته بستنی را افزایش می‌دهد (Javidi et al., 2018). این امر به دلیل وجود مولکول‌های بزرگ در درجه برش‌های پایین و سپس همسو شدن آنها با جریان و نیز کوچک شدن برخی مولکول‌ها در اثر از بین رفتن پیوندهای شبه مولکولی و در نتیجه کاهش مقاومت درونی ناشی از افزایش درجه برش، چنین رفتاری دیده شده است (Poursani et al., 2021). از آنجایی که بیشترین اتصالات مولکولی در ابتدای افزایش درجه برش شکسته می‌شوند، کاهش ویسکوزیته ظاهری در ابتدا سریع‌تر بود؛ اما به تدریج کاهش می‌یابد و تقریباً ثابت می‌شود (Javidi et al., 2016, Bahramparvar et al., 2011).



شکل ۲- تغییرات ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های آمیخته بستنی کم‌چرب حاوی درصد‌های مختلف صمغ ریشه سریش در مقایسه با نمونه شاهد (پرچرب) در دمای $5 \pm 5^\circ \text{C}$

Fig. 2. Changes in the apparent viscosity of the low-fat ice cream mix samples containing different percentages of *Eremurus* root gum compared to the control (high-fat) sample at a temperature of $5 \pm 5^\circ \text{C}$

انتخاب مدل رئولوژیکی مناسب

باتوجه به غیرنیوتنی بودن تمامی نمونه‌های آمیخته بستنی، در این تحقیق از چهار مدل رئولوژیکی مستقل از زمان متداول شامل قانون توان، هرشل-بالکی، کاسون و بینگهام برای مدل‌سازی و توصیف رفتار جریان نمونه‌ها آمیخته بستنی استفاده شد. برای انتخاب بهترین مدل آماره‌های ضریب تبیین R^2 و میانگین مجذورات خطا (RMSE) برای هر مدل محاسبه شدند. در این بین مدلی که بالاترین ضریب تبیین و کمترین میانگین مجذورات خطا را دارا باشد به عنوان بهترین مدل در نظر گرفته می‌شود. آنالیز رفتار جریانی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در بین مدل‌های بررسی شده، مدل قانون توان یا پاورلا بیشترین مطابقت را با رفتار جریانی نمونه‌ها داشته است ($R^2 = 0.9997$) پس از آن نیز مدل کاسون در درجه دوم توانست رفتار جریانی نمونه‌ها را توصیف کند ($R^2 = 0.99415$) این مدل‌ها برتر از مدل بینگهام ارزیابی شدند. مدل هرشل بالکی نیز به دلیل وجود مقادیر منفی تنش تسلیم قادر به توصیف رفتار جریان نمونه‌ها نبود، بدین ترتیب از ذکر نتایج آن صرف نظر گردید. جاویدی و همکاران و پورثانی و همکاران (Poursani et al., 2021, Javidi et al., 2016) نیز به دلیل وجود مقادیر منفی تنش

پارامترهای رئولوژیکی

جدول ۵- مقادیر ضریب تبیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) مدل‌های رئولوژیکیTable 5- Values of explanation coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) of rheological models

Sample code کد نمونه	Herschel Barkley قانون توان		Bingham کاسون	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2
Control	0.1641	0.9997	0.0743	0.9999
0.2%SRG	0.4865	0.9998	0.0657	0.9999
0.3%SRG	0.3490	0.9992	0.1379	0.9998
0.4%SRG	0.3779	0.9992	0.1223	0.9999
0.5%SRG	0.5822	0.9989	0.1696	0.9999

جدول ۶- پارامترهای مدل توان برای آمیخته بستنی به عنوان تابعی از درصد‌های مختلف صمغ

Table 6- Power model parameters for ice cream mix as a function of different gum percentages

Sample code کد نمونه	R^2	$K_p (pa.s^n)$		$n_p (-)$	
		Average میانگین	Standard deviation انحراف معیار	Average میانگین	Standard deviation انحراف معیار
Control	0.9997	1.2344 ^b	0.046	0.6703 ^b	0.004
0.2%SRG	0.9998	0.3472 ^c	0.061	0.7190 ^a	0.009
0.3%SRG	0.9991	1.1535 ^b	0.113	0.6341 ^c	0.057
0.4%SRG	0.9992	1.4255 ^b	0.171	0.6175 ^c	0.012
0.5%SRG	0.9989	2.2605 ^a	0.206	0.5604 ^d	0.011

حروف یکسان نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است ($P \geq 0.05$) حروف کوچک مقایسه میانگین میان تیمارهای مورد آزمون (۵ تیمار)

Letters show significancy (same letters indicate no significant difference) lowercase letters show compare means

تسلیم در رفتار جریان نمونه‌های کره پسته کم کالری، نمونه‌های آمیخته بستنی کم‌چرب و نیم‌چرب این مدل را نامناسب ارزیابی کردند. در پژوهش دیگری که توسط مارشال و همکاران (Marshall et al., 2003) روی کنسانتره شیر پس چرخ منجمد روی خواص فیزیکی، شیمیایی، ساختاری و رئولوژیکی بستنی انجام شد گزارش گردید که دو مدل قانون توان و کاسون بهتر از سایر مدل‌ها رفتار جریانی نمونه‌های بستنی را منعکس می‌کنند که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر، مشابهت داشت (Marshall et al., 2003). دلیل رفتار سودوپلاستیک بستنی را می‌توان جهت‌گیری ذرات بستنی در جهت برش نسبت داد. به بیان بهتر، در سرعت‌های برشی پایین، مولکول‌های مختلف موجود در بستنی به صورت نامنظم آرایش یافته‌اند و هم راستایی چندانی بین آنها وجود ندارند. این شرایط باعث می‌شود که در ابتدای امر ویسکوزیته نمونه بالا باشد (نمونه ۵/۰ درصد صمغ در برابر نمونه ۲/۰ درصد و شاهد-شکل ۱). با این حال با افزایش سرعت هم‌زدن (سرعت برش)، این مولکول‌ها در راستای همدیگر قرار گرفته و در نتیجه ویسکوزیته آن به سرعت کاهش می‌یابد. رفتار سودوپلاستیک بستنی در مطالعات بسیاری گزارش شده است (Poursani et al., 2021).

جدول ۷- پارامترهای مدل کاسون برای آمیخته های بستنی به عنوان تابعی از درصدهای مختلف صمغ
Table 7- Casson model parameters for ice cream mixes as a function of different gum percentages

Sample code کد نمونه	R^2	$\tau_{0c} (Pa)$		$\mu c(Pa.s)$	
		Average میانگین	Standard deviation انحراف معیار	Average میانگین	Standard deviation انحراف معیار
Control	0.9941	3.0676 ^b	0.171	0.0596 ^c	0.002
0.2%SRG	0.9961	0.8154 ^c	0.155	0.0450 ^d	0.035
0.3%SRG	0.9902	2.9902 ^b	0.303	0.675 ^{bc}	0.002
0.4%SRG	0.9896	3.7080 ^b	0.453	0.0742 ^b	0.074
0.5%SRG	0.9938	6.7076 ^a	0.045	0.0954 ^a	0.091

حروف یکسان نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار است ($P \geq 0.05$) حروف کوچک مقایسه میانگین میان تیمارهای مورد آزمون (۵ تیمار)
Letters show significancy (same letters indicate no significant difference) lowercase letters show compare means

شاخص رفتار جریان

توان n در معادله قانون توان $\tau = k(\dot{\gamma})^n$ شاخص رفتار جریان نامیده می شود و در سیالات شل شونده با $n < 1$ و برای سیالات غلیظ شونده با $n > 1$ است. باتوجه به مقدار n در جدول ۷، شاخص رفتار جریان نمونه های مختلف بستنی با درصدهای مختلف صمغ ریشه سریش و نمونه شاهد مورد مقایسه قرار گرفت. ملاحظه می شود که در نمونه های مورد آزمایش، هر چه مقدار درصد صمغ سریش افزایش می یابد (به جز نمونه ۰/۲ درصد) مقدار شاخص رفتار جریان کاهش یافت، که این بدین معناست که چون هر چه مقدار n کمتر باشد، رفتار سیال سودوپلاستیک تر بوده و تفاوت آن با حالت نیوتنی بیشتر است که در این پژوهش نیز با افزایش مقدار سریش (به جز نمونه ۰/۲ درصد) رفتار بستنی حالت شل شونده با برش بیشتری پیدا کرد (Salahi et al., 2022).

همین طور صلاحی و همکاران (Salahi et al., 2022)، در مطالعه برروی صمغ ریشه سریش مدل پاورلا را بهترین مورد جهت توصیف رفتار جریانی این صمغ دانستند، بنابراین براین اساس بستنی حاوی این صمغ نیز، از این مدل رفتار پیروی خواهد کرد. همچنین مدل توان در محدوده نرخ برشی تعیین شده توصیف دقیقی از رفتار جریان نشان می دهد (Salahi et al., 2022)، درحالی که مدل هایی مثل کاسون از تنش تسلیم برحسب ویسکوزیته پلاستیک بستنی استفاده می شود (Poursani et al., 2021). در همین راستا سقایی شهری و همکاران (Saghaei et al., 2014) نتایج مشابهی با این پژوهش با افزودن صمغ شاهی به نمونه های بستنی (۰/۱ تا ۰/۴٪) بدست آوردند، به نحوی که شاخص جریان به نسبت افزایش میزان صمغ، کاهش یافت.

درمجموع گفته می شود که محلول های حاوی صمغ با مقدار n بیشتر، در دهان حس لزجی ایجاد می کنند که این ویژگی بستنی برای مصرف کننده مطلوب نیست. درمقابل ویسکوزیته بیشتر و شاخص رفتار

جریان کمتر، احساس دهانی مطلوبی را ایجاد می کند (مانند نمونه حاوی ۰/۵٪ سریش در برابر نمونه شاهد یا ۰/۲٪ درصد صمغ سریش) (SZCZESNIAK & Kahn, 1984) بنابراین طبق برازش با مدل پاورلا و یا قانون توان، بستنی حاوی ۰/۵٪ صمغ سریش احتمالاً مطلوب ترین خصوصیات دهانی را داراست.

در این بررسی مقدار شاخص جریان بررسی گردید، پورثانی و همکاران (Poursani et al., 2021) نیز با بررسی بستنی های بدون چربی، نیم چرب و کم چرب مقدار این ویژگی را بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۶ گزارش کردند. طبق گزارش گاف و داوینسون (Goff & Davidson, 1992)، شاخص رفتار جریان (n) در قانون توان برای نمونه های بستنی حدود ۰،۷ است. این پارامتر در مطالعه ما بین ۰/۵۶۴۵ (نمونه حاوی ۰/۵ درصد سریش) و ۰/۷۱۹ (نمونه حاوی ۰/۲ درصد سریش)، به دست آمد که با یافته های این محققان مشابَهت داشت (Poursani et al., 2021).

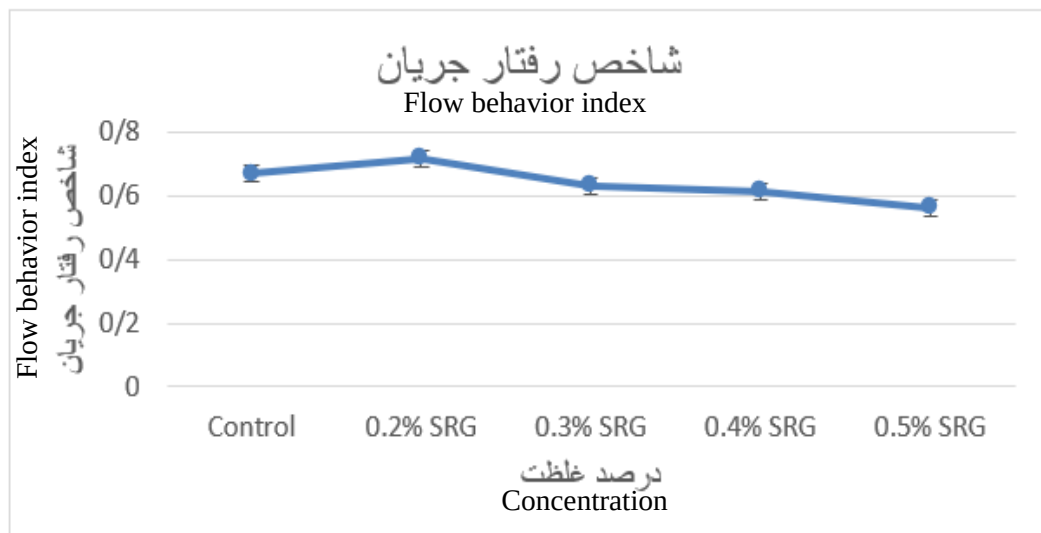
ضریب قوام

ضریب قوام معیاری برای تعیین طبیعت ویسکوز مواد غذایی و شاخص بزرگی ویسکوزیته ظاهری است (Aziz et al., 2018). اما تفاوت آن با ویسکوزیته ظاهری این است که ضریب قوام، مربوط به دامنه ای از درجات برش است؛ اما ویسکوزیته ظاهری در یک درجه برش مشخص اندازه گیری می شود (Poursani et al., 2021). برای سیالات نیوتنی ($n=1$) ضریب k در قانون توان ضریب قوام نامیده می شود و معیاری برای تعیین ماهیت ویسکوز مواد غذایی است. همچنین این ضریب می تواند شاخص بزرگی ویسکوزیته ظاهری نیز باشد (Rao et al., 2010).

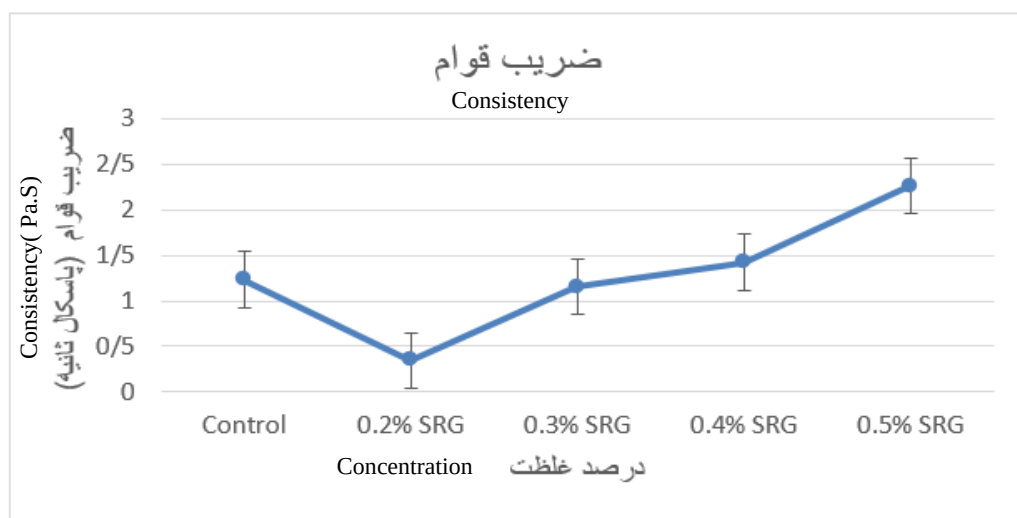
نتایج نشان داد که با افزودن صمغ سریش به آمیخته بستنی، ضریب قوام به صورت معنی داری افزایش می یابد. مقدار این ضریب برای

(Alghuna et al., 2015)، گزارش کردند که با افزودن پایدارکننده کنجاک گلوکومانان به بستنی، مقدار ضریب قوام به صورت معنی داری افزایش می یابد که با نتایج حاصل از کار ما مطابقت داشت. الغونه و همکاران مشاهده کردند تمامی فرمولاسیون های حاوی پایدارکننده هیدروکلوئیدی به وضوح دارای مقادیر بالاتری شاخص قوام نسبت به فرمولاسیون های بدون پایدارکننده بود (Alghuna et al., 2015).

نمونه شاهد و نمونه حاوی ۰/۵ درصد صمغ سریش به ترتیب برابر با ۲/۲۶۰۵ و ۱/۲۳۴۶ بود. افزایش مقدار ضریب قوام با افزودن صمغ را می توان به وجود مولکول های بزرگ و منشعب هیدروکلوئیدهای موجود در سریش نسبت داد که باعث می شوند بستنی در برابر تنش برشی مقاومت کند. این مولکول ها با پیوند با آب موجود در آمیخته و تشکیل ژل چنین نقشی را ایفا می کنند، در همین راستا، الغونه و همکاران



شکل ۲- تغییر شاخص رفتار جریان آمیخته های بستنی به عنوان تابعی از درصدهای مختلف صمغ
Fig. 2. Change in the flow behavior index of ice cream mixes as a function of different percentages of gum



شکل ۳- تغییرات ضریب قوام آمیخته های بستنی به عنوان تابعی از غلظت های مختلف صمغ
Fig. 3. Variations in the consistency coefficient of ice cream mixes as a function of different concentrations of the gum

مفید می باشد. در شکل ۲ برازش مدل کاسون برای نمونه های بستنی نشان داد که با افزایش غلظت سریش، تنش تسلیم (τ_0) نمونه های بستنی به طور معناداری افزایش می یابد. کمترین مقدار تنش تسلیم

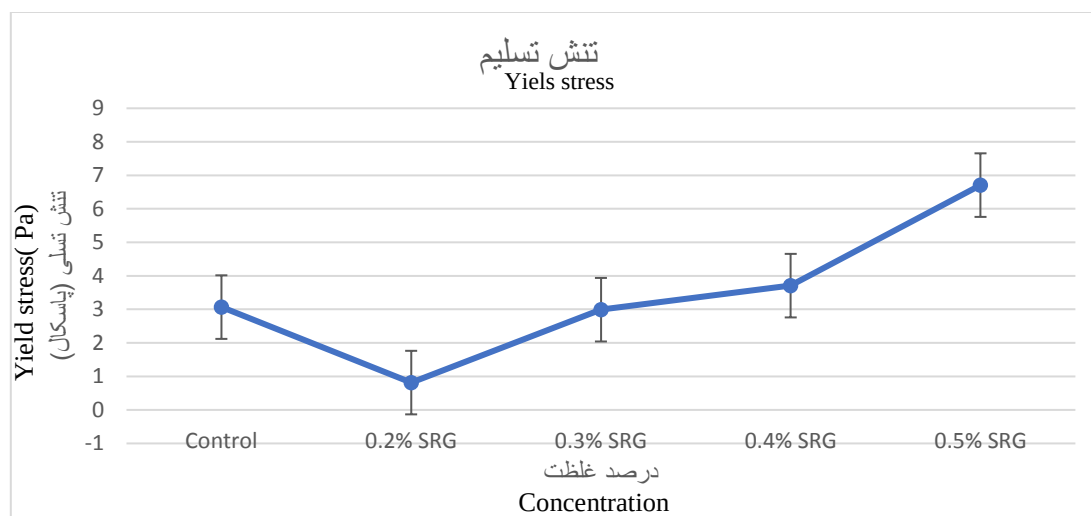
تنش تسلیم

تنش تسلیم حداقل تنش لازم برای شروع جریان ماده است. دانستن تنش تسلیم جهت طراحی فرآیندهای غذایی و ارزیابی حسی

بهتر، در نمونه شاهد که میزان چربی در حد استاندارد است، مقدار تنش تسلیم بالاتر است، اما با حذف چربی و جایگزین کردن آن با ۰/۲ درصد صمغ سریش، تنش تسلیم کاهش می‌یابد زیرا این مقدار صمغ در محیط آبی به اندازه‌ای زیاد نیست که بتواند با تمام آب موجود در محیط اتصال برقرار کرده و ویسکوزیته و در نتیجه تنش تسلیم را افزایش دهد. در همین راستا، (Poursani et al., 2021). نیز گزارش کردند که حذف چربی از مخلوط بستنی منجر به افزایش مقدار فاز مایع و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر جریان می‌شود که با نتایج حاصل از کار ما مطابق داشت.

مربوط به نمونه‌ی حاوی ۰/۲ درصد جایگزینی صمغ ریشه سریش ۰/۸۱۵۴ و بالاترین مقدار تنش تسلیم مربوط به ۰/۵ درصد جایگزینی صمغ ریشه سریش ۰/۷۶۶ است. باتوجه به آنالیز واریانس در نمونه های ۰/۲، ۰/۴ درصد و ۰/۵ درصد جایگزینی صمغ ریشه سریش و نمونه شاهد (پرچرب) تفاوت معناداری دیده نشد.

در بستنی با چربی کاهش یافته، مقدار تنش تسلیم کاهش می‌یابد درحالی که با افزایش حضور ترکیبات با وزن مولکولی بالا صمغ ریشه سریش به دلیل افزایش قابلیت اتصال به آب آنها مقدار تنش تسلیم افزایش می‌یابد. کاهش تنش تسلیم در تیمار حاوی ۰/۲ درصد سریش نسبت به شاهد را نیز می‌توان باتوجه به این مطلب تفسیر کرد. به بیان



شکل ۴- تغییرات تنش تسلیم نمونه‌های آمیخته بستنی به عنوان تابعی از درصدهای مختلف صمغ
Fig. 4. Variations in yield stress of mixed ice cream samples as a function of different percentages of gum

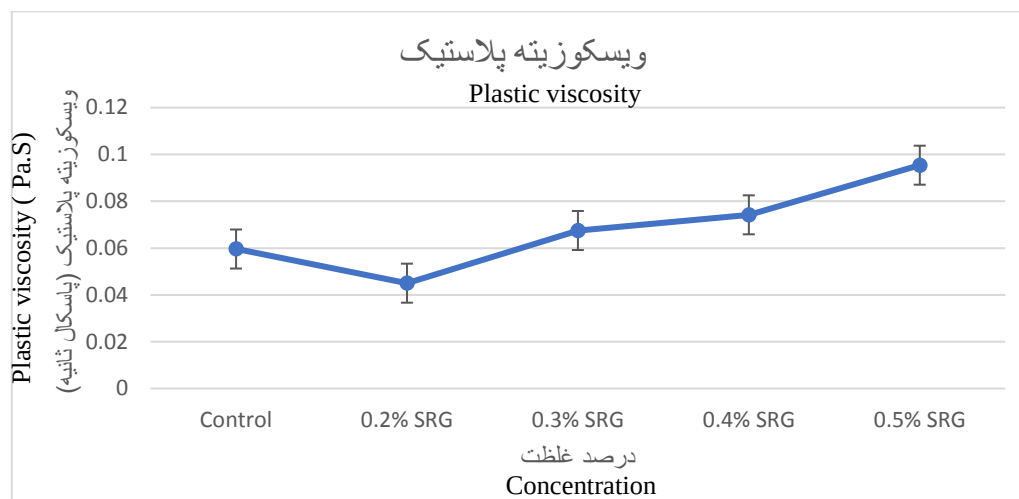
مقابل، با افزایش غلظت صمغ در محیط و به دام افتادن آب بیشتر در این هیدروکلوئید، ویسکوزیته پلاستیک افزایش می‌یابد.

ویسکوزیته کاسون

جهت مقایسه ویسکوزیته نمونه‌های تیمار شده با شاهد، این پارامتر در درجه برشی حدود $5 \cdot s^{-1}$ و دمای $5 \pm 0.5^\circ C$ یکدیگر مقایسه شد. علت انتخاب این سرعت برشی این بود که با سرعت پمپ کردن بستنی در در عملیات صنعتی تقریباً مشابهت دارد (Saghaei et al., 2014). به طور کلی در صنایع غذایی محاسبه ویژگی‌های رفتار جریان از جهت کنترل تولید و کیفیت محلول های هیدروکلوئیدی و توسعه محصول اهمیت داشته و در نتیجه می‌توان گفت که این پارامترها بر ترجیح مصرف کننده نیز مؤثر هستند (Kemp, 2018).

ویسکوزیته پلاستیک

تفاوت تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک در جریان یافتن مواد است به طوری تنش تسلیم نیروی لازم برای به حرکت در آمدن مواد اما ویسکوزیته پلاستیک جهت حفظ جریان است (Rao et al., 2010). برازش مدل کاسون برای نمونه‌های بستنی نشان داد که با افزایش غلظت صمغ ریشه سریش، ویسکوزیته کاسون (τ_c) نیز هم راستا با تنش تسلیم افزایش می‌یابد (به جز نمونه حاوی ۰/۲ درصد) و این افزایش معنی دار می‌باشد ($P < 0.05$). کاهش مقدار ویسکوزیته در تیمار حاوی ۰/۲ درصد صمغ ریشه سریش نسبت به شاهد را می‌توان در نتیجه حذف چربی دانست زیرا این مقدار صمغ در محیط آبی به اندازه ای زیاد نیست که بتواند با تمام آب موجود در محیط اتصال برقرار کند، لذا وجود مقدار آب بالا و چربی و ماده خشک پایین در محیط سبب می شود که ویسکوزیته پلاستیک یا ویسکوزیته کاسون کاهش یابد. در



شکل ۵- تغییرات ویسکوزیته پلاستیک به عنوان تابعی از درصدهای مختلف صمغ
Fig. 5. Changes in plastic viscosity as a function of different percentages of serish root gu

یافتند. همچنین، نمونه حاوی ۰.۳٪ صمغ دارای بیشترین پذیرش کلی پس از نمونه شاهد نسبت به دیگر نمونه‌ها بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که این متغیرها توانایی شبیه‌سازی خصوصیات رئولوژیکی (ویسکوزیته ظاهری، ضریب قوام، تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک)، سرعت ذوب و ویژگی‌های حسی نظیر خامه‌ای بودن، زبری، سرمازایی، صمغیت، سفتی و پذیرش کلی نمونه شاهد پرچرب را داشتند که به‌عنوان عوامل مؤثر بر فرآیند تولید بافت و احساس دهانی فرآورده در بستنی‌های کم‌چرب عمل کردند. از طرفی، به دلیل عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون‌های اندازه‌گیری pH و مقدار ماده خشک، قابلیت کاربرد ترکیبات هیدروکلوئیدی مذکور به‌عنوان جایگزین چربی تأیید می‌شود. در مجموع، از میان پارامترهای اندازه‌گیری‌شده، می‌توان نمونه حاوی ۰.۲٪ صمغ را به‌عنوان جایگزین مناسب برای تولید بستنی کم‌چرب پیشنهاد داد.

میزان مشارکت نویسندگان

فاطمه سبزمیدانی: انجام آزمایشات و استخراج داده‌ها، مسعود تقی زاده: مفهوم‌سازی، مدیریت پروژه، نظارت، بررسی و ویرایش، محمد صالح همتی: پیش‌نویس اصلی

منابع تأمین مالی

بودجه این کار توسط معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد پشتیبانی مالی شد.

باتوجه به جدول ۸ زیر کاملاً مشخص است که ویسکوزیته تمام نمونه‌ها با افزایش غلظت صمغ افزایش می‌یابد (به‌جز نمونه حاوی ۰.۲ درصد سریش). دلیل افزایش ویسکوزیته در اثر افزودن صمغ را می‌توان به آبدوست بودن صمغ سریش و توانایی آن برای به دام انداختن آب و تولید یک شبکه ژلی در بستنی نسبت داد (Amiri et al., 2012). امیری عقدایی و همکاران (Amiri Eghdaei et al., 2012)، یکی از دلایل بالاتر بودن ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های بستنی کم‌چرب و بدون چربی را نسبت به نمونه پر چرب، وجود جایگزین‌های چربی کربوهیدراته ذکر کردند. حذف چربی همان‌طور که در نمونه حاوی ۰.۲ درصد صمغ ریشه سریش مشاهده شد باعث کاهش ویسکوزیته ظاهری نمونه آمیخته بستنی شد، اما با افزودن صمغ در نقش جایگزین چربی و افزایش مقدار آن به ۰.۳ تا ۰.۵ درصد اثر مذکور جبران گردید و باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های آمیخته بستنی گردید. می‌توان گفت علت افزایش ویسکوزیته ظاهری در نمونه‌های آمیخته بستنی کم‌چرب اجتماع پروتئین در طول زمان رسیدن باشد (Poursani et al., 2021).

نتیجه‌گیری

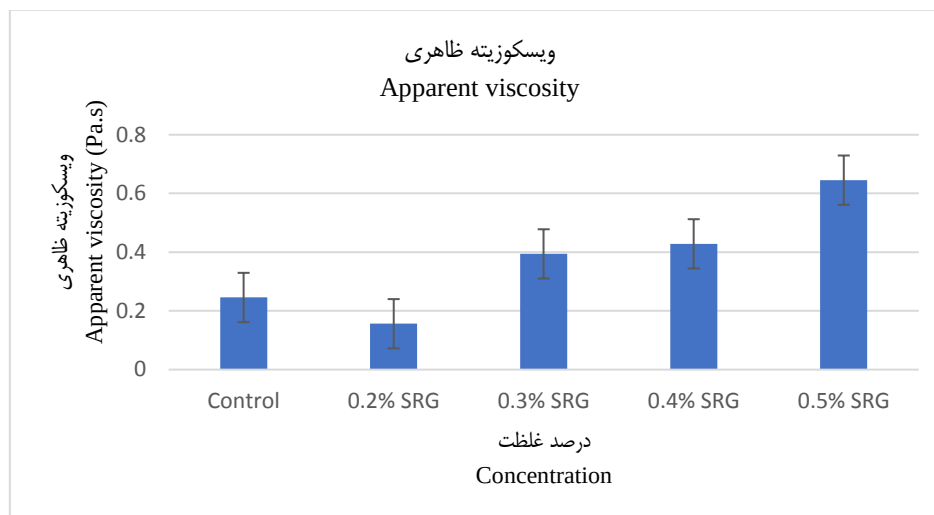
با افزودن صمغ و افزایش غلظت آن، ویسکوزیته ظاهری، ضریب قوام، تنش تسلیم، و ویسکوزیته پلاستیک افزایش یافتند. در بخش ارزیابی حسی، ویژگی‌های خامه‌ای بودن، شیرینی، صمغیت، زبری، سردی و سختی توسط آزمون احساس غالب گذرا بررسی شدند و این تغییرات در اکثر موارد معنی‌دار بودند. ویژگی‌های صمغیت، خامه‌ای بودن، شیرینی و سفتی افزایش یافتند، درحالی‌که زبری و سردی کاهش

جدول ۸- ویسکوزیته ظاهری در سرعت برش 50 s^{-1} و دمای 5°C درجه سلسیوس آمیخته بستنی به عنوان تابعی از غلظت‌های مختلف صمغ

Table 8- Apparent viscosity at cutting speed of 50 s^{-1} and temperature of 5 degrees Celsius of ice cream mixture as a

ویسکوزیته ظاهری	Apparent viscosity (Pa.s)	Standard deviation
Control	0.2457 ^a	0.1221
0.2%SRG	0.1562 ^d	0.2456
0.3%SRG	0.3941 ^c	0.1423
0.4%SRG	0.4284 ^b	0.313
0.5%SRG	0.6454 ^a	0.201

function of different gum concentrations



شکل ۶- تغییرات ویسکوزیته ظاهری به عنوان تابعی از درصد‌های مختلف صمغ

Fig. 6. Changes in apparent viscosity as a function of different percentages of gum

References

1. Akbari, M., Eskandari, M.H., Niakosari, M., & Bedeltavana, A. (2016). The effect of inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat ice cream. *International Dairy Journal*, 57, 52–55. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2016.02.040>
2. Al-Ghouana, A., Mohabi, M., Mir Arab, S., & Khodayi, D. (2015). The effect of feromulsion compounds on the sensory properties of low-fat ice cream using the response surface method and using the principal component analysis method to model overall acceptance. *Quarterly Journal of Science and Food Industries*, 53. (In Persian)
3. Amiri Eghdaei, Q.S., Scientific, M., Rezaei, R., Dadpur, M., & Khmeri, M. (2012). The effect of the mucilage of basil and asparagus seeds on the physicochemical, rheological and sensory characteristics of soft ice cream. *Research and Innovation in Food Science and Industry*, 1(1). (In Persian with English abstract).
4. AOAC. (2005). Official methods of analysis. In L. G. W. (Ed.) , 18th ed. Matyland: AOAC International Arbuckle, W. S. Wendell S. (1986). Ice cream (2rd Edition (ed.)). The AVI Publishing Company; INC; Westport. Arbuckle, W.S. 1997. Ice cream, third edition, AVI publishing company, inc, Westport, Connenticut, page 242. <https://doi.org/10.1002/star.19620140509>
5. Aziz, N.S., Sofian-Seng, N.S., Yusop, S.M., Kasim, K.F., & Razali, N.S.M. (2018). Functionality of Okra gum as a novel carbohydrate-based fat replacer in ice cream. *Food Science and Technology Research*, 24(3), 519–530. <https://doi.org/10.3136/FSTR.24.519>
6. Bahramparvar, M., & Tehrani, M.M. (2011). Application and functions of stabilizers in ice cream. 27(4), 389–407. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563399>

7. Bahramparvar, M., & Goff, H.D. (2013). Basil seed gum as a novel stabilizer for structure formation and reduction of ice recrystallization in ice cream. *Dairy Science and Technology*, 93(3), 273–285. <https://doi.org/10.1007/S13594-013-0122-9>
8. Beigi, M., & Jahanbin, K. (2019). A water-soluble polysaccharide from the roots of *Eremurus spectabilis* M. B. subsp. *spectabilis*: Extraction, purification and structural features. *International Journal of Biological Macromolecules*, 128, 648–654. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.01.178>
9. Cody, T.L., Olabi, A., Pettingell, A.G., Tong, P.S., & Walker, J.H. (2007). Evaluation of rice flour for use in vanilla ice cream. *Journal of Dairy Science*, 90(10), 4575–4585. <https://doi.org/10.3168/JDS.2006-531>
10. Faraji Kashefari, S., A'alami, M., Khamiri, M., & Motamedzadegan, A. (2013). Use of protein-based fat substitutes in the production of low-fat ice cream, Second National Conference on Food Science and Technology, Quchan, <https://civilica.com/doc/205883>
11. Goff, H.D., & Davidson, V.J. (1992). Flow characteristics and holding time calculations of ice cream mixes in HTST holding tubes. *Journal of Food Protection*, 55(1), 34–37. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-55.1.34>
12. Goff, H.D., & Hartel, R.W. (2013). Ice cream structure. *Ice Cream*, 313–352. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6096-1_11
13. Hosseini-Parvar, S.H., Matia-Merino, L., Goh, K.K.T., Razavi, S.M.A., & Mortazavi, S.A. (2010). Steady shear flow behavior of gum extracted from *Ocimum basilicum* L. seed: Effect of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 101(3), 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.025>
14. Iranian Dairy Products Industry Association, (2019) (<http://ir-dis.org/fa>). (In Persian)
15. Javidi, F., Razavi, S.M.A., Behrouzian, F., & Alghooneh, A. (2016). The influence of basil seed gum, guar gum and their blend on the rheological, physical and sensory properties of low fat ice cream. *Food Hydrocolloids*, 52, 625–633. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2015.08.006>
16. Javidi, F., & Razavi, S.M.A. (2018). Rheological, physical and sensory characteristics of light ice cream as affected by selected fat replacers. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 1872–1884. <https://doi.org/10.1007/S11694-018-9801-9>
17. Kemp, S.E., Hort, J., Hollowood, T., Kemp, S.E., & Hollowood, T. (2017). Time-dependent measures of perception in sensory evaluation. <https://doi.org/10.1002/9781118991640>
18. Kurt, A., Cengiz, A., & Kahyaoglu, T. (2016). The effect of gum tragacanth on the rheological properties of salepbased ice cream mix. *Carbohydrate Polymers*, 143, 116–123. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.02.018>
19. Lim, J., Inglett, G.E., & Lee, S. (2010). Response to consumer demand for reduced-fat foods; Multi-functional fat replacers. *Japan Journal of Food Engineering*, 11(4), 147–152. <https://doi.org/10.11301/JSFE.11.147>
20. Liu, R., Wang, L., Liu, Y., Wu, T., & Zhang, M. (2018). Fabricating soy protein hydrolysate/xanthan gum as fat replacer in ice cream by combined enzymatic and heatshearing treatment. *Food Hydrocolloids*, 81, 39–47. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.01.031>
21. Lu, J., Pua, X.H., Liu, C., Te, Chang, C.L., & Cheng, K.C. (2014). The implementation of HACCP management system in a chocolate ice cream plant. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22(3), 391–398. <https://doi.org/10.1016/J.JFDA.2013.09.049>
22. Marshall, R.T., Goff, H.D., & Hartel, R.W. (2003). *Ice cream*, (3rd ed.). New York: Aspen 507 Publishers.
23. National Standard of Iran, No. 2852.1371, the method of determining the total acidity of WPH or the density of H ions in milk and its products. (In Persian)
24. Poursani, P., Razavi, S.M.A., & Mazaheri Tehrani, M. (2021). Effect of selected fat replacers on textural, physical and sensory properties of non-fat ice cream. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 18(112), 97–112. <https://doi.org/10.52547/FSCT.18.112.97>
25. Poursani, P., Razavi, S.M.A., Mazaheri Tehrani, M., & Javidi, F. (2021). Rheological, physical, and sensory properties of non-fat ice creams as affected by selected fat replacers. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), e15010. <https://doi.org/10.1111/JFPP.15010>
26. Rao, M.A. (2010). *Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
27. Saghaei, A., Karjian, H. & Nafchi, M. (2014). Rheological and textural properties of ice cream containing watercress seed gum. 24(2). https://foodresearch.tabrizu.ac.ir/article_.188-179
28. Salahi, M., Razavi, S.M.A., & Sadegh Amiri, M.S. (2021). Optimization of hydrocolloid extraction from serish root (*Eremurus luteus*) using response surface method and examining physicochemical characterization of the optimized sample. *FSCT*, 18(112), 153–168. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.112.153>
29. Salahi, M., Razavi, S.M.A., & Hasanvand, E. (2022). Physicochemical, rheological and functional properties of a novel gum from *Eremurus luteus* root. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 27, 100296. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2021.100296>

30. Salahi, M., Razavi, S.M.A., & Sadegh Amiri, M.S. (2021). Optimization of hydrocolloid extraction from serish root (*Eremurus luteus*) using response surface method and examining physicochemical characterization of the optimized sample. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 18(112), 153–168. <https://doi.org/10.52547/FSCT.18.112.153>
31. Shahrampour, D., & Razavi, S.M.A. (2023). Novel antimicrobial/antioxidant *Eremurus luteus* root gum coating containing rosemary essential oil nanoemulsions for extension of chicken meat shelf life. *Food Science & Nutrition, February*, 3131–3140. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3295>
32. Soukoulis, C., Chandrinou, I., & Tzia, C. (2008). Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with κ -carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 1816–1827. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2007.12.009>
33. SZCZESNIAK, A.S., & Kahn, E.L. (1984). Texture contrasts and combinations: a valued consumer attribute. *Journal of Texture Studies*, 15(3), 285-301. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1984.tb00385.x>

Investigation and Evaluation of Dually Loaded Niosomes Containing Crocin and Omega-3 by Heating & Bubble Method

P. Mardani¹, Gh. Rajabzadeh^{1*}, B. Malaekheh-Nikouei², A. Bostan¹

1- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran
(Corresponding Author Email: gh.rajabzadeh@rifst.ac.ir)

2- Pharmaceutical Technology Institute, Mashhad University of Medical Science, Mashhad, Iran

Received: 17.09.2024
Revised: 03.12.2024
Accepted: 04.12.2024
Available Online: 23.04.2025

How to cite this article:

Mardani, P., Rajabzadeh, Gh., Malaekheh-Nikouei, B., & Bostan, A. (2025). Investigation and evaluation of dually loaded niosomes containing crocin and omega-3 by heating & bubble method. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(2), 217-234. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.88094.1367>

Introduction

The majority of pharmaceuticals and nutraceuticals are encapsulated in various delivery vehicles in order to avoid some restrictions. This is mainly due to the molecules' physicochemical instability in physiological structure and/or their low bioavailability. Food ingredients or bioactive components can be encapsulated inside delivery systems for protection and controlled release. Encapsulated ingredients are protected from unfavorable reactions, such as lipid oxidation and volatile loss during production, storage, and handling.

Materials and Methods

Flaxseed oil was purchased from Barij Essence Pharmaceutical Co., Tehran, Iran. Saffron was bought from Novin Saffron Co., Mashhad, Iran. Cholesterol, span 60 and tween 60 were from Sigma-Aldrich. Phosphate buffered saline, sodium azide, hydrochloric acid, and other chemicals were procured from Merck (Darmstadt, Germany). All other solvents and reagents were provided from Merck Pharmaceutical Co. (Germany) as analytical grade.

Crocin Extraction

The extraction of crocin from saffron was done based on crystallization method which has been explained by Mohajeri et.al.

Flaxseed Oil Extraction

Flaxseed is one of the richest plant sources of ω -3 fatty acids, alpha-linolenic acid (ALA, C18:3 ω -3). A Soxhlet extraction was carried out on flaxseed powder (20g) using n-hexane for 14 hours at 70°C. After extraction, the sample was concentrated in a rotary evaporator at 40°C.

Niosome Preparation

A surfactant with a HLB number between 3 - 8 is suitable for the co-encapsulation of hydrophobic and hydrophilic substances (Korani *et al.*, 2019). Hence, span 60: tween 60 variable ratios were selected to achieve HLB in this range. Additionally, the ratio of surfactants to Chol was considered variable. The DCP was applied at a constant concentration to enhance niosome stability.



Results and Discussion

Characterization of niosomes

The influence of experimental variables on the particle size, PDI and zeta potential of niosomes prepared by heating and bubble methods was investigated. In order to choose the appropriate ratios of surfactant, the physicochemical characteristics of niosomal particles, including particle size, zeta potential, PDI, and EE have been considered.

Tween 60 is a nonionic surfactant with a large hydrophilic head group and high HLB (14.9). In turn, span 60 has a large hydrophobic moiety (HLB 4.7) and low water solubility. The smaller head groups and longer alkyl chains in surfactant structure have led to larger vesicles. This might be the reason for the larger particle size of H1-H3 and B1-B3, containing higher amount of span 60 compared to other samples.

The PDI of the prepared samples was found in the range of 0.29 to 0.49. This value was considered to be within the range of sufficient for attaining stable and aggregation resistant systems. However, higher span 60 content showed comparatively a lesser degree of PDI.

Zeta potential is a respectable index of the quantity of the interaction between colloidal particles. In this work, the prepared niosomes had a zeta potential range of -31 to -48 mV, which was sufficient to maintain niosome stability without aggregation between vesicles. Negative zeta-potential in nonionic surfactant vesicles has been reported.

Based on the results, B12 and H12 samples with the span: tween ratio of 4:1 and surfactant: Chol ratio of 1:1 formed better niosomes based on particle size, PDI, EE, and zeta potential.

In the optimum conditions, the EE of crocin and ω -3 in heating method were 76% and 32%, and in bubble method they were 73% and 28%, respectively.

Stability of niosomes

The stability of the optimum niosomes prepared by bubble and heating methods were evaluated at $4^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$, $25^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$, and $37^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ for 90 days, by means of stability in size, PDI, and EE.

Conclusion

In conclusion, this study revealed that co-encapsulation of omega3 and crocin with niosome led to better stability, slower and more controlled release profile, suggesting a promising drug delivery system.

Keywords: Bubble method, Crocin, Heating method, Niosome, Omega-3

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۲۳۴-۲۱۷

بررسی و ارزیابی نیوزوم‌های حاوی روغن کتان و کروسین با دو روش حباب و حرارتی

پریسا مردانی^۱ - قدیر رجب زاده^{۱*} - بیژن ملائکه نیکویی^۲ - آرام بستان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

چکیده

مطالعه حاضر به ارزیابی پایداری و خواص فیزیکوشیمیایی نیوزوم‌های حاوی کروسین و امگا۳ پرداخته است. کروسین و امگا۳ در وزیکل‌های نیوزومی مبتنی بر اسپن ۶۰ و توئین ۶۰ با استفاده از روش‌های حرارتی و حباب درون پوشانی شدند. سپس خواص فیزیکوشیمیایی، پایداری و رفتار رهایش ترکیبات حاصل ارزیابی گردید. فرآیند بهینه‌سازی بر اساس بازدهی درون پوشانی (EE)، اندازه وزیکل، پتانسیل زتا و شاخص بس پا شیدگی (PDI) انجام شد. در فرمولا سیون بهینه، بازدهی درون پوشانی کروسین و امگا۳ در روش حرارتی به ترتیب ۷۶٪ و ۳۲٪ با اندازه ذرات ۱۲۹ نانومتر و در روش حباب به ترتیب ۷۳٪ و ۲۸٪ با اندازه ذرات ۱۳۱ نانومتر بود. پتانسیل زتا برای روش حرارتی و حباب به ترتیب ۳۹- و ۴۵- بود. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نشان داد که نیوزوم‌ها دارای ساختار کروی و وزیکلی هستند. همچنین الگوی رهایش و پایداری نیوزوم‌های بارگذاری شده در دماهای ۴، ۲۵ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که نانو سامانه‌های نیوزومی حاوی کروسین و امگا۳ سبب افزایش پایداری و رهایش تدریجی و کنترل شده آن‌ها می‌شود. مقایسه روش حباب و حرارتی نشان داد که نیوزوم‌های تهیه شده به روش حرارتی پارامترهای فیزیکوشیمیایی مناسب‌تری را ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: امگا۳، روش حباب، روش حرارتی، کروسین، نیوزوم

مقدمه

به کار برده می‌شود شامل لیپوزوم‌ها، فیتوزوم‌ها، نیوزوم‌ها، نانوامولسیون، نانوذرات لیپیدی جامد، حامل‌های لیپیدی نانو ساختار، نانوحامل‌های پلیمری می‌باشد (Saleh et al., 2022; Durak et al., 2020; Momekova et al., 2021). نیوزوم‌ها وزیکل‌های سورفکتانت‌های غیریونی با ساختارهای میکروسکوپی لایه لایه هستند که از مخلوط کلسترول با این سورفکتانت‌ها در محیط آبی تهیه شده و از سامانه‌های رسانش مهم محسوب می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نیوزوم‌ها جهت درون‌پوشانی مواد ترکیبات زیست‌فعال و غذایی تا حد زیادی باعث افزایش پایداری این مواد می‌گردد. همچنین این مطالعات نشان داده‌اند که نیوزوم‌ها آزادسازی کنترل شده‌ای را برای ترکیبات زیست‌فعال و مواد غذایی فراهم می‌کنند و به این ترتیب مانع از رهایش

در سال‌های اخیر صنعت غذا به دنبال روش‌هایی برای درون‌پوشانی ترکیبات زیست‌فعال برای افزایش دسترسی زیستی و همچنین حفاظت از این ترکیبات در مقابل تنش‌های محیطی می‌باشد. درون‌پوشانی فرآیندی است که در آن یک ماده و یا مخلوطی از مواد توسط دیگری پوشانیده و یا به دام انداخته می‌شوند. فناوری‌های درون‌پوشانی و رهایش کنترل شده در سه دهه گذشته سریع‌ترین رشد را در صنایع ترکیبات زیست‌فعالسازی و پزشکی داشته است (Madene et al., 2019). این روش موجب بهبود رسانش ترکیبات زیست‌فعال، افزایش حلالیت و افزایش دسترسی زیستی این ترکیبات شده است. انواع مختلفی از روش‌های درون‌پوشانی که در صنایع غذایی

۱- گروه نانو تکنولوژی مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۲- گروه فارماسیوتیکس دانشکده داروسازی مشهد، مشهد، ایران

(Email: gh.rajabzadeh@rifst.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

سریع آنها می‌گردند و غلظت تجمعی آنها را در بافت هدف افزایش می‌دهند (Tewabe et al., 2014; Das et al., 2023; Ghasemiyeh et al., 2019).

دانه کتان (*Linum usitatissimum* L.) یکی از قدیمی‌ترین گونه‌های زراعی می‌باشد که تا به امروز به دلیل روغن‌ها، فیبرها و مواد غذایی با ارزش موجود در آن بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. روغن کتان سرشار از امگا ۳ و اسیدهای چرب لینولئیک که معمولاً ۵۵٪ از سهم روغن آن را تشکیل می‌دهد، می‌باشد. اسید آلفالینولئیک (ALA) یک اسید چرب امگا ۳ است که سوسترای بالقوه سنتز سایر اسیدهای چرب امگا ۳ (ایکوزاپنتانوئیک اسید (EPA) و دکوزاهگزانوئیک اسید (DHA) می‌باشد. از نظر تکنیکی EPA اسید چرب ضروری نمی‌باشد، زیرا بدن می‌تواند ALA را به EPA تبدیل نماید؛ البته ضریب تبدیل ALA به EPA و DHA در بدن محدود می‌باشد (Kim et al., 2021).

زعفران از خانواده Iridaceae، گیاهی است علفی، بدون ساقه و پایا که در اسپانیا، فرانسه، یونان و به‌طور وسیعی در نواحی مرکزی و شرق ایران پرورش داده می‌شود. مهمترین ترکیبات موجود در کلاله گیاه زعفران عبارت‌اند از: کارتنوئیدها (مانند کروستین، کروسین، آلفا کاروتن، لیکوپن، زآگزانتین)، آلدئیدهای مونوترپن (مانند پیکروکروسین و سافرانال)، مونوترپنوئیدها (مانند کروکوسانتین‌ها)، ایزوفرون‌ها و فلاونوئیدها، کاروتنوئیدها مانند کروستین و کروسین عمده‌ترین ترکیبات ایجاد کننده رنگ در زعفران می‌باشند و آلدئیدهای مونوترپن عامل طعم تلخ و مولد بوی زعفران می‌باشند (Vignolini et al., 2008). رابطه نزدیکی بین میزان کروسین کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی زعفران در چندین مقاله در شرایط برون تن گزارش شده است و این ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گزارش شده تحت تأثیر درجه گلیکوزیسیون در ساختار کروسین می‌باشد. همچنین مشخص شده در چندین مکانیسم مانند توانایی گرفتن نیتريت، سرکوب کاتیون‌های رادیکالی، فعالیت شبه سوپراکسید دیسموتاز و طولانی کردن طول دوره پراکسید، شرکت می‌کند (Bathaie et al., 2014; Finley et al., 2014; Chen et al., 2008).

بررسی درون‌پوشانی همزمان اسکوربیک اسید با کوئرستین و گالیک اسید با کورکومین نشان داد در حالت درون‌پوشانی همزمان در هر دو مورد خصوصیات فیزیکوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌یابد و در واقع اثر سینرژیستی باعث افزایش خصلت آنتی‌اکسیدان می‌شود (Eratte et al., 2014). نیوزوم حاوی کلسترول و توئین ۶۰ برای بهبود پایداری خاصیت آنتی‌اکسیدانی اپی گالوکاتچین در روده استفاده شده و مشخص گردید پایداری این آنتی‌اکسیدان با نیوزوم در

روده بسیار بیشتر از حالتی است که این آنتی‌اکسیدان مستقیماً درون روده تزریق شود (Liang et al., 2022). همچنین نتایج بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی نیوزوم ساخته شده با اسپن و توئین ۶۰ به عنوان عامل حمل کننده آلفا توکوفرول و افزایش پایداری آن با استفاده از روش فیلم نازک نشان داد که نسبت ۳ به ۱ اسپن به توئین ۶۰ و مقدار ۴ میلی‌لیتر/میلی گرم آلفا توکوفرول بهترین شرایط برای افزایش کارایی درون‌پوشانی آلفا توکوفرول می‌باشد (Basiri et al., 2017). نتایج بررسی درون‌پوشانی ترکیب زیست‌فعال ایزولوسین- پرولین- پرولین در سیستم‌های رهایش لیپوزوم و نیوزوم و استفاده از آن در غنی سازی نوشیدنی نشان داد که نیوزوم پایداری بیشتری طی زمان داشته و زیست‌فراهمی بالاتری را ایجاد می‌کند (Rezvani et al., 2019). همچنین نتایج بررسی درون‌پوشانی ترکیب زیست‌فعال Taxifolin در سیستم‌های رهایش لیپوزوم و نیوزوم و استفاده از آن در غنی‌سازی نوشیدنی آب سیب نشان داد که سیستم‌های وزیکولی سیستم‌های مناسبی برای درون‌پوشانی این ترکیب هستند (Hasibi et al., 2019) و درون‌پوشانی کروسین در نانونیوزوم و اثرات درمانی آن و بررسی ویژگی‌های آنها از جمله اندازه ذرات، پایداری، دسترسی زیستی و خاصیت عملکردی آن انجام شده است (Naderi et al., 2021). در این مطالعه هدف بررسی درون‌پوشانی همزمان کروسین و امگا ۳ با استفاده از نیوزوم و مقایسه روش حباب و حرارتی و انتخاب بهترین روش جهت پایداری بالاتر این ترکیبات می‌باشد.

مواد و روش‌ها

اسپن ۶۰، توئین ۶۰، کلسترول، امگا ۳ و DCP از شرکت سیگما خریداری شد. برای استخراج کروسین ابتدا زعفران پودر شده با استفاده از اتانول عصاره‌گیری و سپس عصاره در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ روز جهت تشکیل کریستال‌های کروسین نگهداری و سپس با دستگاه HPLC خلوص آن اندازه‌گیری شد (خلوص ۹۰٪) (Mohajeri et al., 2010). و برای تهیه نیوزوم از بافر فسفات با ۷/۴ pH استفاده شد. در این طرح نسبت سورفکتانت (اسپن ۶۰ به توئین ۶۰) به یکدیگر و نسبت آن‌ها به کلسترول در ۱۸ سطح مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱).

بر اساس آزمایش مقسمی و حاجیزاده (Moghassemi & Hadjizadeh, 2014) HLB یک پارامتر برای سورفکتانت‌ها است که به‌عنوان راهنمای صرفه‌جویی در زمان برای انتخاب سورفکتانت شناخته می‌شود. همچنین، مقدار HLB یک سورفکتانت نقش مهمی در کنترل کارایی درون‌پوشانی ترکیبات زیست‌فعال دارد. سورفکتانت‌هایی با عدد HLB بین ۳ تا ۸ جهت درون‌پوشانی همزمان ماده هیدروفوب و هیدروفیل مناسب می‌باشد (Moghassemi & Hadjizadeh, 2014).

جدول ۱- طرح کامل فاکتوریل در فرآیند تهیه نیوزوم در روش حباب (B) و حرارتی (H)

Table 1- Full factorial design for bubble(B) and heating (H) method

Code کد	Treatment تیمار	HLB نسبت آبدوستی به چربی دوستی	Span/Tween اسپن / توئین	Surfactant: chol (mol ratio) نسبت مولی سورفکتانت به کلسترول
Code 1	H1 & B1	5.2	19	1:0
Code 2	H2 & B2			1:0.5
Code 3	H3 & B3			1:1
Code 4	H4 & B4	5.7	9	1:0
Code 5	H5 & B5			1:0.5
Code 6	H6 & B6			1:1
Code 7	H7 & B7	6.2	5.6	1:0
Code 8	H8 & B8			1:0.5
Code 9	H9 & B9			1:1
Code 10	H10 & B10	6.7	4	1:0
Code 11	H11 & B11			1:0.5
Code 12	H12 & B12			1:1
Code 13	H13 & B13	7.3	3	1:0
Code 14	H14 & B14			1:0.5
Code 15	H15 & B15			1:1
Code 16	H16 & B16	7.7	2.3	1:0
Code 17	H17 & B17			1:0.5
Code 18	H18 & B18			1:1

سنتز نیوزوم

روش حرارتی

ابتدا سورفکتانت (اسپن ۶۰ و توئین ۶۰) با DCP در دور ۱۰۰۰ rpm و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد (دمای ذوب سورفکتانت) تحت گاز نیتروژن به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد. سپس کلسترول در ظرفی جداگانه در بافر فسفات (pH ۷/۴) در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از سیستم رفلاکس به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۱۰۰ هم‌زده می‌شود. ماده هیدروفوب (امگا۳) به سورفکتانت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد اضافه می‌شود. پس از اینکه دمای کلسترول به ۷۰ درجه

سانتی‌گراد رسید، تحت گاز نیتروژن به این مخلوط اضافه می‌گردد. کروسین نیز در مخلوط ۳ درصد گلیسرول در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد حل می‌شود و سپس در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت گاز نیتروژن به مخلوط اضافه می‌گردد. سپس پس از ۶۰ دقیقه مخلوط بدون هم زدن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت گاز نیتروژن قرار می‌گیرد (مرحله تعادل). در مرحله بعد، مخلوط با توراکس به مدت ۵ دقیقه جهت هم‌گن‌سازی هم‌زده می‌شود و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. سپس بعد از ۲۴ ساعت جهت کاهش ابعاد

نیوزومها از تیمار اولتراسوند به مدت ۷ دقیقه (۱ ثانیه روشن و ۱ ثانیه خاموش) با شدت ۷۰٪ استفاده شد (Mozafari et al., 2002).

روش حباب

ابتدا سورفکتانتها (اسپن ۶۰ و توئین ۶۰) با DCP و امگا ۳ با اولترا توراکس مدل T10 basic ULTRA-TURRAX ساخت شرکت IKA آلمان با دور ۱۵۰۰۰ در داخل بالن سه دهانه به مدت ۳۰ ثانیه در دمای اتاق هم زده می شوند. سپس در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و تحت گاز نیتروژن سایر مواد شامل کلسترول و کروسین (همراه با گلیسرول ۳ درصد) که قبلاً جداگانه به ترتیب در دمای ۱۲۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه حل شده اند، اضافه می گردند. پس از ۶۰ دقیقه مخلوط بدون هم زدن در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد تحت گاز نیتروژن قرار می گیرد. (مرحله تعادل) و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری می شود. جهت کوچک نمودن سایز نیوزومها از تیمار اولتراسوند به مدت ۷ دقیقه (۱ ثانیه روشن و ۱ ثانیه خاموش) با شدت ۷۰٪ استفاده شد (Yeo et al., 2017).

تعیین اندازه ذرات و پتانسیل زتا نیوزومها

اندازه ذرات به وسیله دستگاه پارتیکل سایزر مدل Bettersizer ST صورت پذیرفت صورت می پذیرد. قطر هیدرودینامیک و توزیع اندازه ذرات نیوزوم پس از رقیق کردن نمونه به میزان ۱۰ برابر با بافر فسفات به روش تفرق نور پویا توسط Zetasizer Nano ZS انجام می شود. پتانسیل زتا توسط دستگاه Zetasizer Nano ZS به روش Laser Doppler Micro-electrophoresis انجام می گیرد. نیوزومها توسط بافر فسفات (pH=۷/۴، ۵۰ Mm) به میزان ۱۰ برابر رقیق شده و مورد ارزیابی قرار گرفت (Naderi et al., 2021).

کارایی درون پوشانی

بررسی کارایی درون پوشانی کروسین

برای بررسی مقدار کروسین کپسوله شده، سوسپانسیونهای حاوی نانوذره با سرعت ۸۰۰۰ rpm به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفوژ (مدل Hettich) شد و کروسین موجود در سوپرناتانت با استفاده از دستگاه HPLC تعیین مقدار و براساس فرمول ذیل میزان کروسین درون پوشانی شده محاسبه گردید.

(۱)

$$EE (\%) = \frac{[(\text{Amount of initial crocin} - \text{Amount of crocin in free supernatant}) / \text{Amount of initial crocin}] \times 100}{100}$$

بررسی کارایی درون پوشانی امگا ۳

برای اندازه گیری میزان امگا ۳ درون پوشانی شده یک میلی لیتر از محلول نیوزومی داخل کیسه دیالیز ۱۲ کیلو دالتون فعال شده ریخته شد و بعد از بسته شدن دو انتها، کیسه دیالیز داخل ۲۰۰ میلی لیتر مخلوط آب-اتانول (با نسبت ۵۰:۵۰) در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت (شیکر اینکوباتور) گذاشته و سپس با ایزوپروپانول دیواره را شکسته و میزان امگا ۳ درون پوشانی شده با استفاده از گاز کروماتوگرافی تعیین مقدار شد.

(۲)

$$EE(\%) = (\text{omega3 concentration in the dialysis bag} / \text{Initial omega3 concentration}) \times 100$$

بررسی پایداری نیوزومها

برای بررسی پایداری نیوزومها، نمونه ها در ویالهای شیشه ای پوشانده شده با پارافیلیم در یخچال (با دمای ۴ درجه سانتی گراد)، محیط اتاق (با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) و آون (با دمای ۳۷ درجه سانتی گراد) نگهداری شدند. سپس بعد از ۹۰ روز تغییرات اندازه ذرات و درصد درون پوشانی به عنوان شاخص های پایداری بررسی گردید (Naderi et al., 2021).

بررسی رهایش

رهایش ترکیبات زیست فعال در شرایط آزمایشگاهی اغلب با استفاده از یک محلول آزمایشی ایجاد می شود که شرایط مختلف فیزیولوژیکی را منعکس می کند، و می تواند کیفیت، کارایی و پایداری محصولات را ارزیابی کند. به منظور شبیه سازی شرایط معده و روده، پروفایل های رهایش در این دو محیط مورد ارزیابی قرار گرفتند و نمودارهای کالیراسیون در این دو محیط بافری رسم گردید و میزان ترکیبات زیست فعال تعیین مقدار گردید.

به منظور بررسی رهایش ترکیبات زیست فعال از نیوزومها، آزادسازی کروسین در محلول معده (۱/۲ pH، ۰/۳۲ w/v، Pepsin، ۰/۱M HCl) و روده (۷/۴ pH، ۱٪ Pancreatin، ۰/۱M KH₂PO₄) با استفاده از کیسه دیالیز در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفت. مقدار مناسبی از ترکیبات زیست فعال در کیسه دیالیز (D۰۶۵۵، سیگما، کانادا) با قطع ۱۲/۴ کیلو دالتون ریخته شد. سپس کیسه ها به مدت ۲ ساعت در ۵۰ میلی لیتر بافر معده قرار داده شدند و سپس به مدت ۶ ساعت در ۶۰ میلی لیتر از محیط شبیه سازی روده قرار گرفتند و سپس ترکیبات زیست فعالی آزاد شده تعیین مقدار شد. همچنین برای اندازه گیری میزان رهایش امگا ۳، ۵ میلی لیتر از محلول نیوزوم در محیط شبیه سازی شده روده و معده قرار گرفت و این محلول در دمای ۳۷ درجه با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه در شیکر اوربیتالی قرار داده شد و در فواصل زمانی معین

نمونه‌برداری انجام گرفت و میزان امگا ۳ با دستگاه GC تعیین مقدار گردید (Korani et al., 2019).

مورفولوژی ذرات نیوزومی

شکل و اندازه نیوزوم‌های حاوی امگا ۳ و کروسین با رنگ‌آمیزی منفی توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری مطابق روش مشرقی و همکاران (Mashreghi et al., 2020) مشاهده شد. پس از قرار دادن سوسپانسیون رقیق شده با بافر فسفات، با گلوترالدئید ۲/۵ درصد تثبیت می‌شود. سپس نمونه تثبیت شده با محلول آبی یورانیل استات ۲ درصد به مدت ۲ دقیقه رنگ‌آمیزی شده و محلول باقی‌مانده توسط فیلتر کاغذی جدا و در پایان، تصویر نمونه خشک شده توسط میکروسکوپ الکترونی دارای ولتاژ ۱۲۰ kv گرفته می‌شود (Mashreghi et al., 2020).

پایداری اکسایشی

ابتدا عدد پراکسید مطابق روش AOCS شماره ۵۳-۸، و سپس تیوبایتوریک اسید مطابق روش AOCS شماره ۱۹-۹۰ برای امگا ۳ آزاد، امگا ۳ درون‌پوشانی شده در نیوزوم و درون‌پوشانی هم زمان کروسین و امگا ۳ در نیوزوم به مدت سه هفته بررسی شد (Horwitz, 2004).

روش آنالیز داده‌ها

در این مطالعه از طرح فاکتوریل کامل برای بررسی تأثیر سه عامل بررسی شده بر روی درصد کارایی درون‌پوشانی نیوزوم‌های حاوی امگا ۳ و کروسین، سایز ذرات، PDI و پتانسیل زتا استفاده گردید. تجزیه و تحلیل آماری تفاوت بین تیمارهای مختلف با استفاده از تحلیل واریانس و مقیاس میانگین (ANOVA) انجام شد. سطح احتمال ۰/۰۵ به عنوان سطح معنی‌داری در نرم‌افزار SPSS ۱۶ (آزمون دانکن) در نظر گرفته شد. همه ارقام با نرم‌افزار اکسل نسخه ۲۰۱۶ ترسیم شدند.

نتایج و بحث

اندازه ذرات، پتانسیل زتا و کارایی درون‌پوشانی

همانطور که در نتایج **جدول ۲** و **۳** مشاهده می‌شود اندازه ذرات H1-H3 و B1-B3 که حاوی مقدار بیشتری از اسپن ۶۰ در مقایسه با فرمولاسیون‌های دیگر می‌باشند، بیشتر است. به خوبی ثابت شده است که اندازه نیوزوم‌ها به طول زنجیره آلکیل سورفکتانت‌ها بستگی دارد. سورفکتانت‌ها با زنجیره‌های آلکیل طولانی‌تر معمولاً وزیکول‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند مقادیر بیشتر اسپن ۶۰ نیز نسبتاً درجه کمتری از پراکندگی را نشان داد. PDI در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۴۱ یافت شد که

محدوده مناسب برای محصولات ترکیبات زیست‌فعال می‌باشد (Danaei et al., 2018).

در تمام فرمول‌های نیوزومی در این مطالعه با بار منفی تهیه شد و تفاوت معنی‌داری بین بار سطحی نیوزوم‌های بهینه ساخته شده به روش حرارتی (پتانسیل زتا: -۳۹ میلی‌ولت) و نیوزوم‌های بهینه ساخته شده به روش حباب (پتانسیل زتا: -۴۵ میلی‌ولت) مشاهده نگردید (Yamamoto et al., 2001).

نتایج **جدول ۲** و **۳** می‌دهد که افزایش نسبت توین ۶۰ در مخلوط سورفکتانت، کلسترول نقش عمده‌ای در افزایش کارایی درون‌پوشانی دارد. نتایج نشان می‌دهد که فرمول‌های مبتنی بر توین، کارایی درون‌پوشانی بالاتری برای ترکیبات زیست‌فعال آبدوست دارند و همچنین نیوزوم‌های مبتنی بر اسپن ۶۰ عملکرد خوبی برای به دام انداختن ترکیبات زیست‌فعال آبریز دارند. بنابراین، تعادل مناسب سورفکتانت‌ها برای همپوشانی مواد آبدوست و آبریز ضروری است. مولکول‌های آمفوفیل که دارای هر دو گروه آبدوست و آبریز بالا هستند، می‌توانند غشای مستحکمی تشکیل دهند. نیوزوم‌های ساخته شده با اسپن ۶۰ توین ۶۰ و کلسترول غشایی مناسب تری را تشکیل می‌دهد که دارای چگالی بالاتر، نفوذپذیری کمتر و نشتی کمتر بوده و منجر به کارایی درون‌پوشانی بالاتر می‌شود (Nandhakumar et al., 2017).

همانطور که در بالا ذکر شد، اسپن ۶۰ با بخش آبریز نسبتاً بزرگ می‌تواند یک ساختار وزیکول در محلول‌های آبی رقیق تشکیل دهد. در مقابل، توین ۶۰ با HLB بالاتر نمی‌تواند وزیکول ایجاد کند و برخی از مواد افزودنی مانند کلسترول برای دستیابی به هندسه مولکولی مناسب برای تشکیل وزیکول دولا به ضروری است.

نتایج **جدول ۲** و **۳** نشان می‌دهد درصد کارایی درون‌پوشانی با افزایش نسبت اسپن به توین افزایش می‌یابد، طول زنجیره آلکیل در سورفکتانت عامل مهمی است که بر کارایی درون‌پوشانی تأثیر می‌گذارد، در واقع این عامل بر HLB سورفکتانت تأثیر می‌گذارد. کارایی درون‌پوشانی بالا، فراهمی زیستی مواد مغذی را تضمین می‌کند. به منظور دستیابی به راندمان درون‌پوشانی بالا، دو عامل در سطوح مختلف شامل ماهیت و نسبت سورفکتانت‌ها و کلسترول مورد ارزیابی و بهینه سازی قرار گرفت. برخی از محققان مشاهده کردند که کارایی درون‌پوشانی تا حد زیادی تحت تأثیر نوع و محتوای سورفکتانت‌ها قرار می‌گیرد و گزارش کردند که افزایش طول زنجیره آلکیل منجر به کارایی بالاتر درون‌پوشانی می‌شود از این رو، سیستم‌هایی با ترکیبی از جفت سورفکتانت‌ها، قدرت امولسیون‌کنندگی بالا و غلظت بالا ممکن است نتایج بهتری در کارایی درون‌پوشانی ارائه دهند (Nandhakumar et al., 2017).

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ذرات نیوزومی تهیه شده به روش حرارتی

Table 2- Physicochemical properties of noisomes prepared by heating method

Code کد	HLB نسبت آبدوستی به چربی دوستی	Particle Size اندازه ذرات	PDI ضریب پراکندگی ذرات	EE of Crocin درصد درون پوشانی کروسین	EE of Omega3 درصد درون پوشانی امگا۳	Zeta potential پتانسیل زتا
1		350.1±0.3 ^a	0.41±0.005 ^a	20±0.32 ^a	55±0.25 ^a	-31±1.2 ^a
2	5.2	389.6±0.3 ^b	0.45±0.005 ^a	18±0.33 ^a	52±0.21 ^a	-38±1.2 ^b
3		321.0±0.3 ^c	0.44±0.005 ^a	23±0.32 ^a	58±0.22 ^a	-34±1.2 ^a
4		303.1±0.3 ^d	0.37±0.005 ^b	34±0.34 ^b	51±0.24 ^a	-37±1.2 ^b
5	5.7	348.2±0.3 ^a	0.33±0.005 ^b	30±0.33 ^b	49±0.22 ^a	-40±1.2 ^b
6		299.9±0.3 ^d	0.35±0.005 ^b	35±0.36 ^b	53±0.23 ^a	-42±1.2 ^b
7		245.6±0.3 ^e	0.33±0.005 ^b	45±0.37 ^c	48±0.26 ^a	-39±1.2 ^b
8	6.2	278.0±0.3 ^d	0.39±0.005 ^b	41±0.32 ^c	35±0.24 ^b	-44±1.2 ^b
9		230.1±0.3 ^e	0.35±0.005 ^b	52±0.31 ^d	44±0.22 ^b	-45±1.2 ^b
10		118.4±0.3 ^f	0.30±0.005 ^c	53±0.36 ^d	29±0.23 ^c	-30±1.2 ^a
11	6.7	169.7±0.3 ^g	0.39±0.005 ^b	42±0.38 ^c	25±0.23 ^c	-41±1.2 ^b
12		129.1±0.3 ^f	0.20±0.005 ^d	76±0.32 ^e	32±0.21 ^c	-39±1.2 ^b
13		149.8±0.3 ^h	0.26±0.005 ^d	69±0.31 ^f	29±0.26 ^c	-43±1.2 ^b
14	7.3	159.3±0.3 ^h	0.3±0.005 ^c	64±0.37 ^f	25±0.21 ^c	-45±1.2 ^c
15		132.2±0.3 ^f	0.33±0.005 ^b	70±0.35 ^f	31±0.26 ^c	-43±1.2 ^b
16		123.5±0.3 ^f	0.3±0.005 ^c	73±0.35 ^e	25±0.23 ^c	-44±1.2 ^b
17	7.7	131.3±0.3 ^f	0.29±0.05 ^c	71 ^e	19 ^d	-48±1.2 ^c
18		115.6±0.3 ^f	0.34±0.05 ^b	77 ^e	25 ^c	-46±1.2 ^c

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ذرات نیوزومی تهیه شده به روش حباب

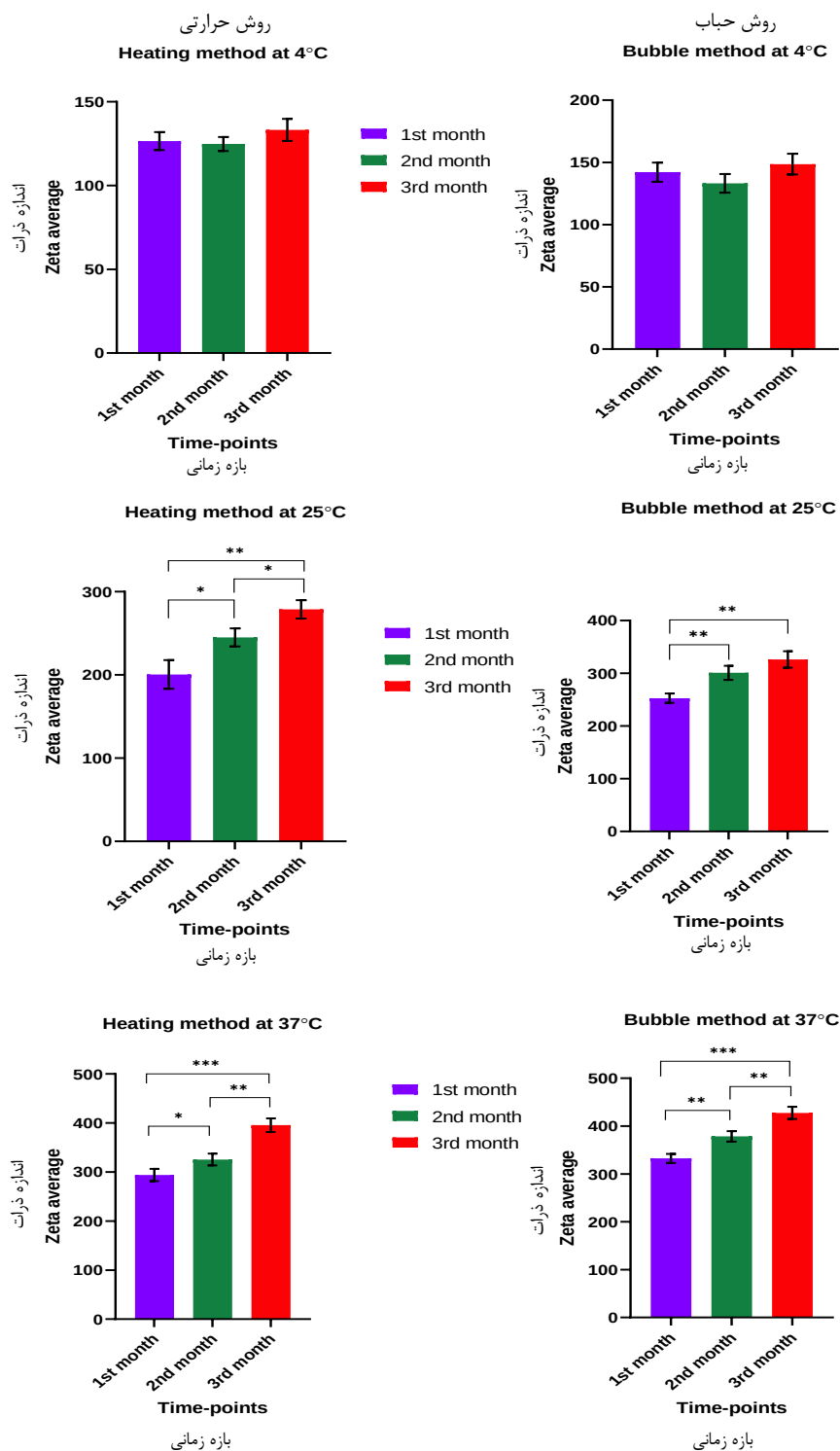
Table 3- Physicochemical properties of noisomes prepared by bubble method

Code کد	HLB نسبت آبدوستی به چربی دوستی	Particle Size اندازه ذرات	PDI ضریب پراکندگی ذرات	EE of Crocin درصد درون پوشانی کروسین	EE of Omega3 درصد درون پوشانی امگا۳	Zeta potential پتانسیل زتا
1		352.1±0.3 ^a	0.41±0.005 ^a	22±0.25 ^a	51±0.20 ^a	-35±1.2 ^a
2	5.2	389.6±0.3 ^b	0.45±0.005 ^a	19±0.31 ^a	55±0.21 ^a	-31±1.2 ^a
3		326±0.3 ^c	0.4±0.005 ^a	28±0.24 ^a	53±0.22 ^a	-32±1.2 ^a
4		303.1±0.3 ^d	0.49±0.005 ^a	31±0.27 ^b	50±0.22 ^a	-33±1.2 ^a
5	5.7	345±0.3 ^a	0.48±0.005 ^a	30±0.30 ^b	49±0.18 ^b	-28±1.2 ^b
6		300±0.3 ^d	0.44±0.005 ^a	37±0.27 ^b	52±0.18 ^a	-30±1.2 ^b
7		245.6±0.3 ^e	0.36±0.005 ^b	44±0.24 ^c	49±0.23 ^b	-39±1.2 ^a
8	6.2	276±0.3 ^f	0.39±0.005 ^b	41±0.24 ^c	35±0.17 ^c	-41±1.2 ^c
9		234.1±0.3 ^e	0.41±0.005 ^a	52±0.27 ^d	46±0.20 ^b	-41±1.2 ^c
10		118.4±0.3 ^g	0.30±0.005 ^b	55±0.23 ^d	31±0.24 ^c	-30±1.2 ^b
11	6.7	169.7±0.3 ^h	0.39±0.005 ^b	42±0.27 ^c	25±0.23 ^d	-41±1.2 ^c
12		131.2±0.3 ^g	0.21±0.005 ^c	73±0.24 ^e	28±0.18 ^d	-45±1.2 ^c
13		148.3±0.3 ^h	0.22±0.005 ^c	64±0.27 ^f	29±0.18 ^d	-43±1.2 ^c
14	7.3	159.3±0.3 ^h	0.29±0.005 ^c	62±0.21 ^f	27±0.21 ^d	-44±1.2 ^c
15		131.2±0.3 ^g	0.31±0.005 ^b	70±0.25 ^e	31±0.19 ^c	-45±1.2 ^c
16		123±0.3 ^g	0.33±0.005 ^b	71±0.23 ^e	25±0.18 ^d	-41±1.2 ^c
17	7.7	133.3±0.3 ^g	0.30±0.005 ^b	72±0.24 ^e	19±0.21 ^e	-45±1.2 ^c
18		125±0.3 ^g	0.29±0.005 ^c	73±0.23 ^e	22±0.19 ^d	-46±1.2 ^c

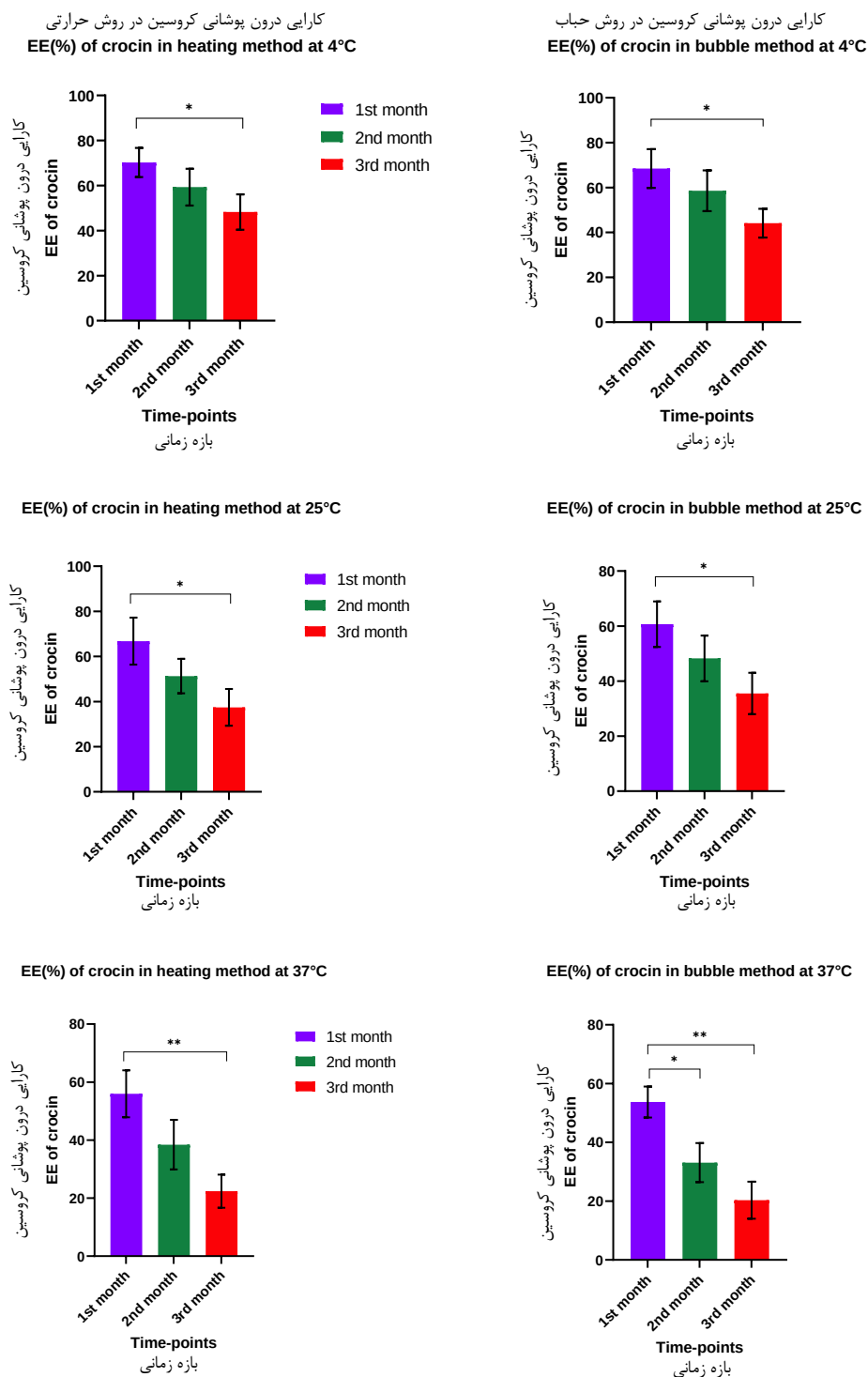
جدول ۴- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ذرات نیوزومی بهینه

Table 4- Physicochemical properties of optimal noisome

Code کد	(span/tween): chol نسبت سورفکتانت به کلسترول	Producing method روش تولید	Particle size اندازه ذرات	PDI ضریب پراکندگی ذرات	EE of Crocin درصد درون پوشانی کروسین	EE of Omega3 درصد درون پوشانی امگا۳	Zeta potential پتانسیل زتا
Code 12	(4:1)	Heating	129.1±0.3 ^f	0.20±0.005 ^d	76±0.32 ^e	32±0.21 ^c	-39±1.2 ^b
Code 12	(4:1)	Bubble	131.2±0.3 ^g	0.21±0.005 ^c	73±0.24 ^e	28±0.18 ^d	-45±1.2 ^c



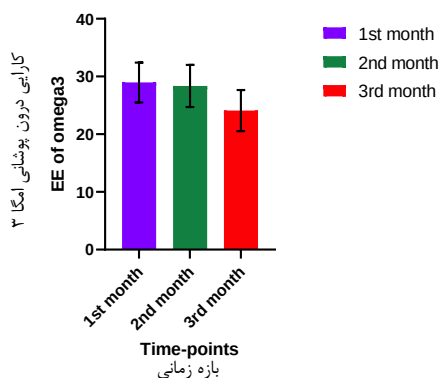
شکل ۱- مقایسه میانگین اندازه ذرات در دو روش حباب و حرارتی در طی زمان
Fig. 1. Comparison of Particle Size of Bubble and Heating method by the time



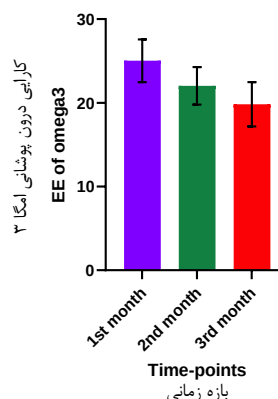
شکل ۲- مقایسه کارایی درون پوشانی کروسین در دو روش حباب و حرارتی در طول زمان

Fig. 2. Comparison of encapsulation efficiency of crocin with Bubble and Heating method by the time

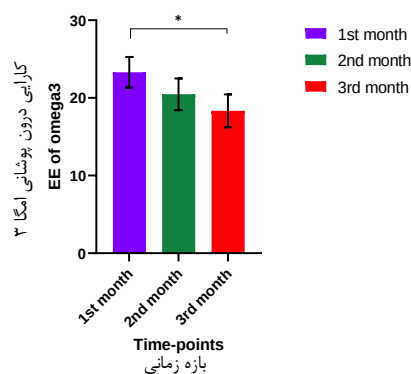
کارایی درون پوشانی امگا ۳ در روش حرارتی
EE(%) of omega3 in heating method at 4°C



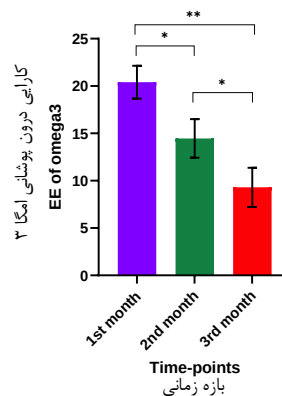
کارایی درون پوشانی امگا ۳ در روش حباب
EE(%) of omega3 in bubble method at 4°C



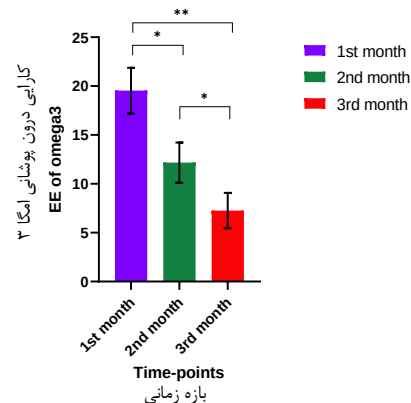
EE(%) of omega3 in heating method at 25°C



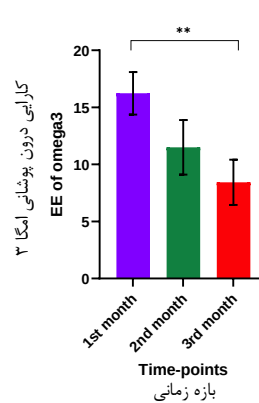
EE(%) of omega3 in bubble method at 25°C



EE(%) of omega3 in heating method at 37°C



EE(%) of omega3 in bubble method at 37°C



شکل ۳- مقایسه کارایی درون پوشانی امگا ۳ در دو روش حباب و حرارتی در طول زمان

Fig. 3. Comparison of encapsulation efficiency of omega3 Bubble and Heating method during the time

می‌دهد تا در یک دوره طولانی مدت باعث آزادسازی پایدار و کنترل شده گردیده و پایداری سوسپانسیون را در طول ذخیره‌سازی تضمین کند. مقایسه بین روش‌های حباب و حرارتی نشان داد که نمونه‌های به‌دست‌آمده از روش حرارتی رهاسازی پایداری را نشان می‌دهند (Farzaneh et al., 2018; Pamunuwa et al., 2016).

میکروسکوپ الکترونی TEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی که در شکل ۵ نشان داده شده است تأیید می‌کند که فرمولاسیون‌های نیوزومی بهینه به دو روش حباب و حرارتی تقریباً یکنواخت و کروی شکل با اندازه‌های حدود ۲۰۰ نانومتر است که با نتایج DLS سازگار است (Gaafar et al., 2014).

پایداری اکسایشی

به‌منظور اندازه‌گیری پایداری اکسایشی، مقدار پراکسید و تیوباربتوریک اسید اندازه‌گیری شدند. بدین منظور، مقدار پراکسید و لیو بر اساس پروتوکول AOAC بر حسب میلی‌اکی‌والان اکسیژن در هر کیلوگرم به‌ترتیب در امگا ۳، ذرات نیوزومی حاوی امگا ۳ به تنهایی و همراه با کروسین در سه هفته متوالی در دمای ۴ درجه اندازه‌گیری شدند. با توجه به شکل ۶، در هفته اول مقدار پراکسید و لیو در تمامی فرمول‌ها تقریباً ۰.۶ می‌باشد که در هفته‌های بعد دارای یک روند افزایشی است. به‌طور کلی در تمامی هفته‌ها، این مقدار برای ذرات انکپسوله شده در نیوزوم حاوی کروسین و امگا ۳ کمترین و برای امگا ۳ آزاد بیشترین می‌باشد. در هفته آخر مقدار پراکسید به بالاترین میزان خود رسیده است. همچنین، این روند افزایشی در مقدار تیوباربتوریک اسید همانند پراکسید در ۳ هفته متوالی می‌باشد. در هفته آخر نیز مقدار تیوباربتوریک اسید در بالاترین میزان بوده است. نتایج نشان می‌دهد درون‌پوشانی همزمان کروسین به همراه امگا ۳ به دلیل اثر آنتی‌اکسیدانی کروسین و ساختار کارتنوئیدی آن که امکان به دام انداختن رادیکال‌های آزاد را دارد و در قسمت مقدمه به آن اشاره شده است، در افزایش پایداری ترکیبات اولیه و ثانویه اکسیداسیون نقش دارد و باعث محافظت امگا ۳ در مقابل اکسیداسیون می‌شود. آزمون پایداری اکسایشی نیز نشان داد که در روز اول، همه نمونه‌ها سطح اکسیداسیون پایینی داشتند. سپس مقدار پراکسید (PV) در همه نمونه‌ها در طول نگهداری در دمای ۴ درجه افزایش یافته است.

همچنین، تفاوت معنی‌داری در مقدار TBA بین امگا ۳ آزاد و فرمول نیوزومال در طول ذخیره‌سازی مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش حفاظتی نیوزوم در برابر اکسیداسیون در طی ۲۱ روز نگهداری می‌باشد.

با توجه به جدول ۴، در روش حباب و حرارتی نمونه‌ای با بالاترین درصد درون‌پوشانی، و کمترین اندازه ذرات و پتانسیل زتا منفی انتخاب گردید.

بررسی پایداری ذرات نیوزومی

با توجه به شکل ۱ میزان پایداری ذرات نیوزومی بهینه تهیه شده به دو روش حباب و حرارتی، بر حسب کارایی درون‌پوشانی کروسین و امگا ۳ در طی ۳ ماه در دماهای ۴، ۲۵ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد بررسی گردید. همانطور که مشاهده می‌شود، پایداری ذرات ساخته شده با افزایش دما و همچنین زمان کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به کارایی درون‌پوشانی کروسین و امگا ۳ در شکل‌های ۲ و ۳، ذرات ساخته شده به روش حرارتی در تمام شرایط دارای پایداری بهتر و تغییرات کمتر می‌باشند.

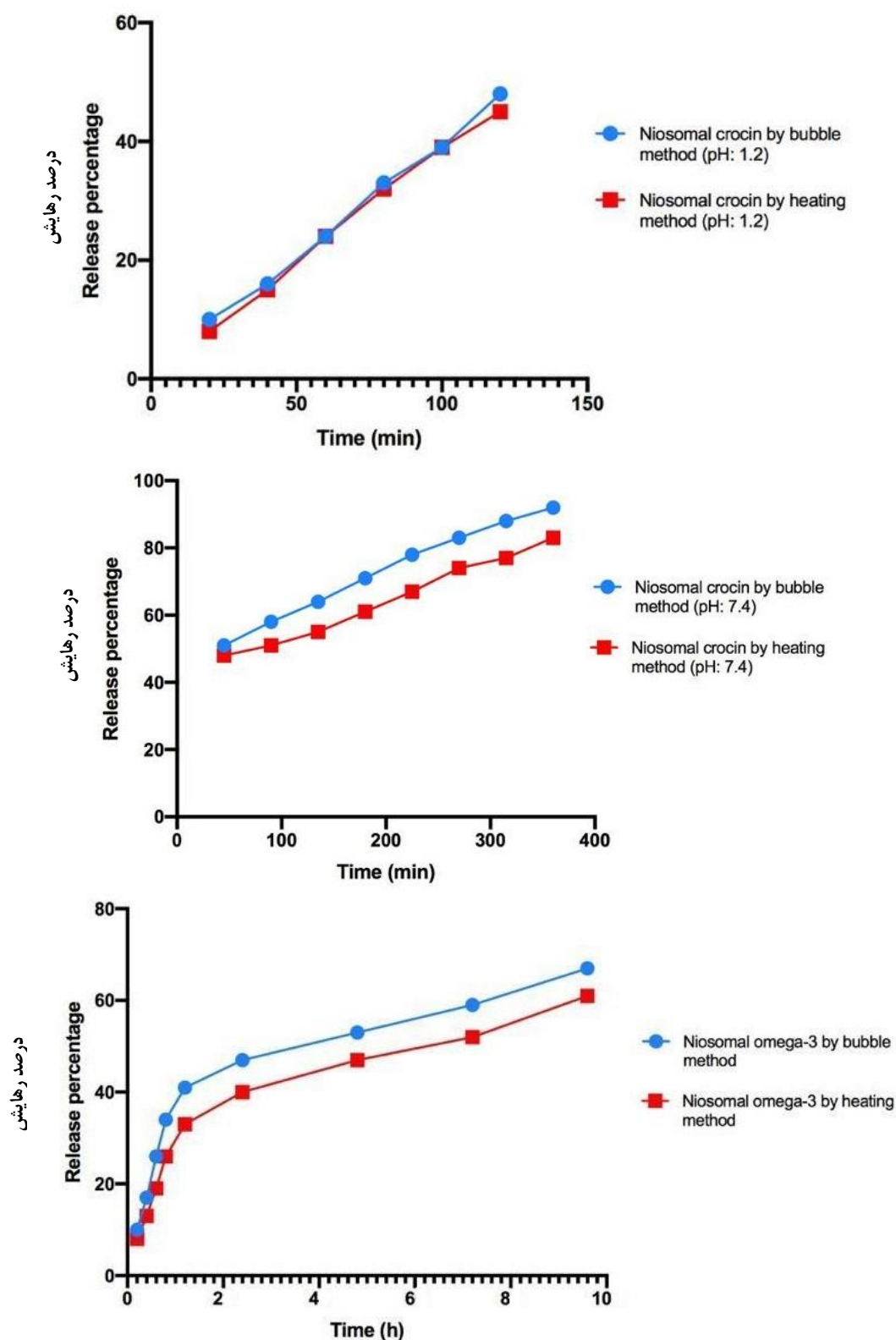
همچنین خصوصیات فیزیکوشیمیایی ذرات در طی ۳ ماه و تحت دماهای مختلف، روند تغییرات اندازه ذرات در شکل ۱ در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تغییرات قابل توجهی نداشتند و نسبتاً پایداری خود را حفظ کردند. اما در دماهای بالاتر، روند تغییرات اندازه ذرات به‌صورت قابل توجهی افزایشی بود.

بررسی رهایش

مطالعه رهایش کروسین و امگا ۳ در شرایط آزمایشگاهی برای ارزیابی کیفیت، کارایی و پایداری محصول در شرایط شبیه‌سازی دستگاه گوارش انجام شد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، رهایش کروسین و امگا ۳ در شرایط معده شیب بیشتری دارد که ممکن است به گرادبان غلظت اولیه نسبت به شرایط اسیدی نسبت داده شود. یافته‌های مشابهی در سایر وزیکول‌های نیوزومی حاوی دیاسرین و کلاریترومایسین مشاهده شده است (Shilakari Asthana, Sharma & Asthana, 2016).

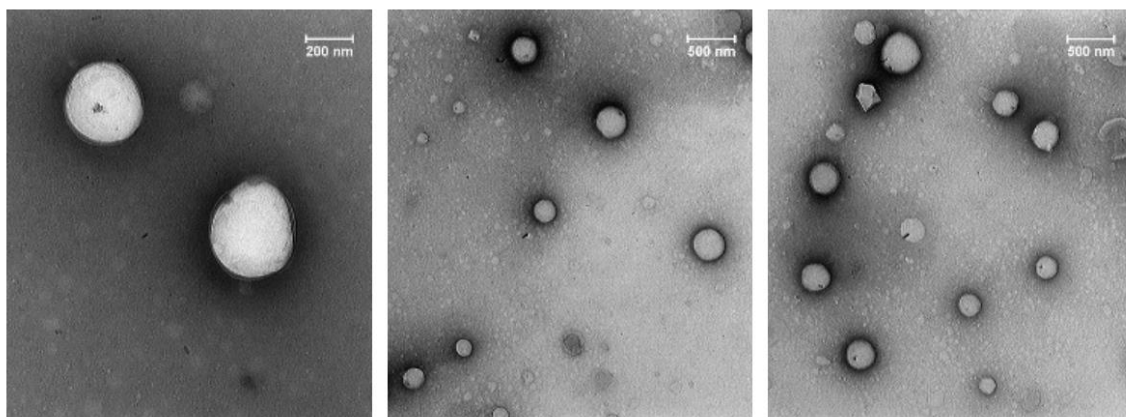
میزان آزادسازی کمتر امگا ۳ به ماهیت آبگریز آن و کاهش نیروی محرکه برای انتشار نسبت داده می‌شود. این روند به موازات نتایج سایر مواد آبگریز مانند تیاکسولون، نالترکسون HCl و کافئین است (Chen et al., 2017; Khazaeli, Pardakhty & Shoorabi, 2007; Parizi et al., 2019).

همبستگی بین انتشار در شرایط آزمایشگاهی و داده‌های پایداری نشان می‌دهد که پایداری بالا منجر به پروفایل انتشار کندتر می‌شود. وجود Chol و اسپن و توئین ۶۰ در ساختار نیوزوم به پایداری بالای غشا کمک می‌کند. درون‌پوشانی کروسین و امگا ۳ در نیوزوم اجازه

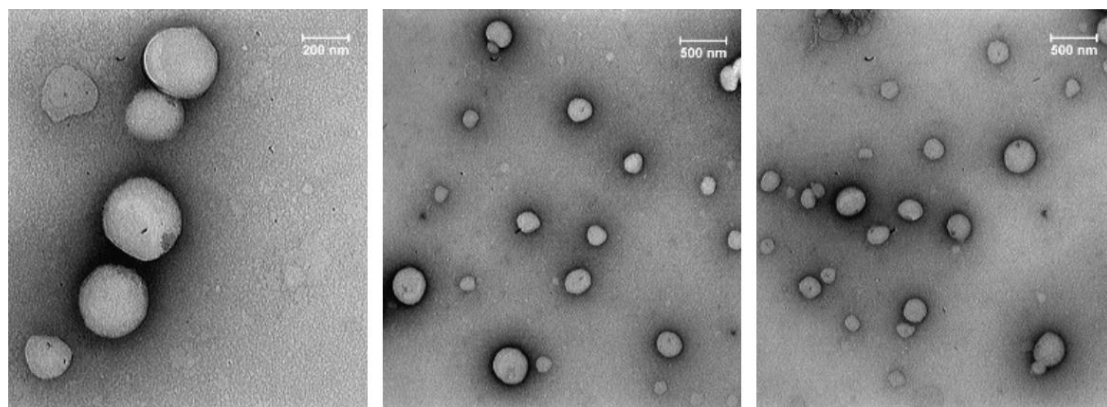


شکل ۴- پروفایل رهائش کروسین و امگا۳ در محیط شبیه‌سازی شده دستگاه گوارش
Fig. 4. Release profile of crocin and omega3 in simulated gastrointestinal fluid

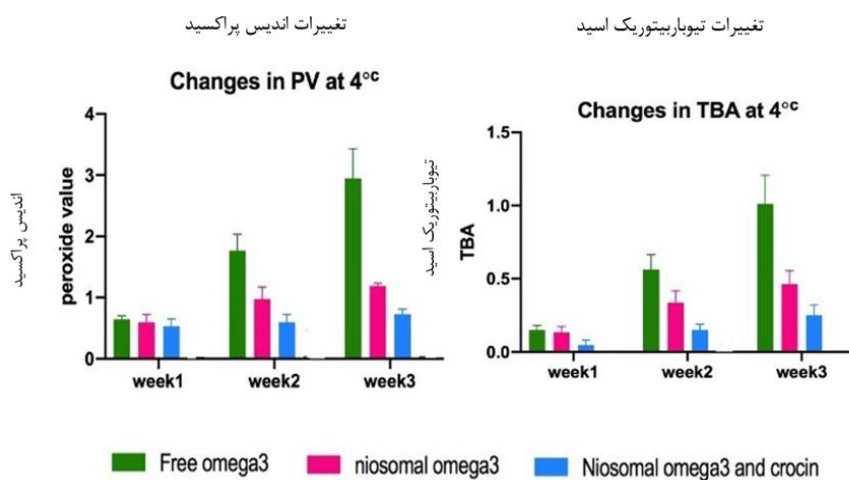
(الف) (A)



(ب) (B)



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نئوزوم‌های تهیه شده به روش حرارتی (الف) و روش حباب (ب)
Fig. 5. TEM image of niosome prepared by heating (A) and bubble method (B)



شکل ۶- تغییرات اندیس پراکسید و تیوباربیتوریک اسید نمونه‌ها در طی سه هفته
Fig. 6. Variation of PV and TBA over three weeks

نتیجه‌گیری

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که کروسین و امگا ۳ درون‌پوشانی شده در نیوزوم تهیه شده به روش حرارتی پایداری بیشتری نسبت به روش حباب دارند و این تکنیک می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد در افزایش پایداری این‌گونه محصولات در شرایط نامساعد و تنش‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد شرایط دمایی بهینه نگهداری ذرات نیوزومی ساخته شده ۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

علاوه بر این درون‌پوشانی همزمان کروسین و امگا ۳ در بهبود پایداری اکسایشی و جلوگیری از ترکیبات اولیه و ثانویه نیز نقش مؤثری دارد. همچنین الگوی رهایش امگا ۳ و کروسین درون‌پوشانی شده در هر دو روش به‌صورت تدریجی و کنترل شده می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

میزان مشارکت نویسندگان

پریسا مردانی: انجام آزمایشات، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، مدیریت داده‌ها، نگارش پیش‌نویس؛ **قدیر رجب زاده:** مدیریت پروژه، مدیریت داده‌ها، نظارت و نگارش؛ **بیژن ملانکه:** نظارت پروژه؛ **آرام بستان:** بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم پریسا مردانی با شماره مصوبه ۷۱۲۹۶۰۱۲ بوده و منابع مالی آن توسط موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی تأمین شده است.

سپاسگزاری

به این وسیله از مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی در حمایت از این رساله قدردانی می‌گردد.

References

- Basiri, L., Rajabzadeh, G., & Bostan, A. (2017). Physicochemical properties and release behavior of Span 60/Tween 60 niosomes as vehicle for α -Tocopherol delivery. *LWT*, 84, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.009>
- Bathaie, S.Z., Farajzade, A., & Hoshyar, R. (2014). A review of the chemistry and uses of crocins and crocetin, the carotenoid natural dyes in saffron, with particular emphasis on applications as colorants including their use as biological stains. *Biotechnology Histochemistry*, 89, 401–411. <https://doi.org/10.3109/10520295.2014.890741>
- Bazana, M. T., Codevilla, C. F., & de Menezes, C. R. (2019). Nanoencapsulation of bioactive compounds: Challenges and perspectives. *Curr Opin Food Sci.*, 26, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.03.005>
- Chen, F., Liang, L., Zhang, Z., Deng, Z., Decker, A.E., & McClements, D.J. (2017). Inhibition of lipid oxidation in nanoemulsions and filled microgels strengthened with omega-3 fatty acids using casein as a Natural Antioxidant. *Journal Food Hydrology*, 63, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.001>
- Danaei, M., Dehghankhold, M., Ataei, S., Hasanzadeh Davarani, F., Javanmard, R., & Dokhani, A. (2018). Impact of particle size and polydispersity index on the clinical applications of lipidic nanocarrier systems. *Pharmaceutics*, 10, 57. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10020057>
- Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, N. (2023). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin*, 80, 7247–7312. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04443-4>
- Durak, S., Esmaeili Rad, M., Alp Yetisgin, A., Eda Sutova, H., Kutlu, O., Cetinel, S., & Zarrabi, A. (2020). Niosomal drug delivery systems for ocular disease—recent advances and future prospects. *Nanomaterials*, 10, 1191. <https://doi.org/10.3390/nano10061191>
- Eratte, D., Wang, B., Dowling, K., Barrow, C.J., & Adhikari, B.P. (2014). Complex coacervation with whey protein isolate and gum arabic for the microencapsulation of omega-3 rich tuna oil. *Food Function*, 5, 2743–2750. <https://doi.org/10.1039/C4FO00296B>
- Farzaneh, H., Ebrahimi Nik, M., Mashreghi, M., Saberi, Z., Jaafari, M.R., & Teymouri, M. (2018). A study on the role of cholesterol and phosphatidylcholine in various features of liposomal doxorubicin: From liposomal preparation to therapy. *International Journal Pharmacological*, 551, 300–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.09.047>

10. Finley, J.W., & Gao, S. (2017). A perspective on *Crocus sativus* L.(Saffron) constituent crocin: a potent water-soluble antioxidant and potential therapy for Alzheimer's disease. *Journal Agriculture Food Chemistry*, 65, 1005–1020. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04398>
11. Gaafar, M.R., Mady, R.F., Diab, R.G., & Shalaby, T.I. (2014). Chitosan and silver nanoparticles: promising anti-toxoplasma agents. *Experimental Parasitology*, 143, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2014.05.005>
12. Ghasemiyeh, P., & Mohammadi-Samani, S. (2019). Hydrogels as drug delivery systems; pros and cons. *Trends in Pharmaceutical Sciences*, 5, 7–24. <https://doi.org/10.30476/TIPS.2019.81604.1002>
13. Hasibi, F., Nasirpour, A., Varshosaz, J., GarcíaManrique, P., Blanco -López, M.C., Gutiérrez, G., & Matos, M. (2020). Formulation and characterization of Taxifolin - loaded lipid nanovesicles (Liposomes, Niosomes, and Transfersomes) for beverage fortification. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122(2), 1900105.
14. Horwitz, W. (2004). Official methods of analysis of AOAC International, 17th ed., Gaithersburg, Maryland.
15. Kim, S., Chen, J., Cheng, T., Gindulyte, A., He, J., & He, S. (2021). New data content and improved web interfaces. *Nucleic Acids Res. PubChem in 2021*: 49 (D1), D1388–D1395. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa971>
16. Khazaeli, P., Pardakhty, A., Shoorabi, H. (2007). Caffeine-Loaded Niosomes: Characterization and in Vitro Release Studies. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 14, 447–452. <https://doi.org/10.1080/10717540701603597>
17. Korani, M., Ghaffari, S., Attar, H., Mashreghi, M., & Jaafari, M.R. (2019). Preparation and characterization of nanoliposomal bortezomib formulations and evaluation of their anti-cancer efficacy in mice bearing C26 colon carcinoma and B16F0 melanoma. *Nanomedicine Nanotechnology, Biology and Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2019.04.016>.
18. Liang, R., Chen, L., Yokoyama, W., Williams, P.A., & Zhong, F.(2016). Niosomes consisting of tween-60 and cholesterol improve the chemical stability and antioxidant activity of (–)-epigallocatechin gallate under intestinal tract conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64, 9180–8. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04147.s001>
19. Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release—a review. *International Journal Food Science Technology*, 41, 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>
20. Moghassemi, S., & Hadjizadeh, A. (2014). Nano-niosomes as nanoscale drug delivery systems: an illustrated review. *Journal Control Release*, 185, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.04.015>
21. Mashreghi, M., Karimi, M., Gheybi, F., Zamani, P., Golmohammadzadeh, S., & Darban, S.A. (2020). Preparation and characterization of stable nanoliposomal formulations of curcumin with high loading efficacy: In vitro and in vivo anti-tumor study. *International Journal of Pharmaceutics*, 580, 119211. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119211>
22. Mohajeri, S.A., Hosseinzadeh, H., Keyhanfar, F., & Aghamohammadian, J. (2010). Extraction of crocin from saffron (*Crocus sativus*) using molecularly imprinted polymer solid-phase extraction. *Journal of Separation Science*, 33, 2302–2309. <https://doi.org/10.1002/jssc.201000183>
23. Momekova, D.B., Gugleva, V.E., & Petrov, P.D. (2021). Nanoarchitectonics of multifunctional niosomes for advanced drug delivery. *ACS Omega*, 6, 33265–33273. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05083>
24. Mozafari, M.R., Reed, C.J., Rostron, C., Kocum, C., & Piskin, E. (2002). Construction of stable anionic liposome-plasmid particles using the heating method: a preliminary investigation. *Cellular & Molecular Biology Letters*, 7, 923–8.
25. Naderi, R., Pardakhty, A., Abbasi, M.F., Ranjbar, M., & Iranpour, M. (2021). Preparation and evaluation of crocin loaded in nanoniosomes and their effects on ischemia–reperfusion injuries in rat kidney. *Scientific Reports*, 11, 23525. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02073-w>
26. Nandhakumar, S., Dhanaraju, M.D., Sundar, V.D., Heera, B. (2017). Influence of surface charge on the in vitro protein adsorption and cell cytotoxicity of paclitaxel loaded poly (ε-caprolactone) nanoparticles. *Bulletin of Faculty of Pharmacy Cairo University*, 55, 249–58. <https://doi.org/10.1016/j.bfopcu.2017.06.003>
27. Parizi, M.H., Sharifi, I., Farajzadeh, S.P., Audacity, A., Parizi, M.H.D., Sharifi, H., Keyhani, A.R., Mostafavi, M., Bamorovat, M., Khosravi, A., & Ghaffari, D. (2019). Tioxolone niosomes exert antileishmanial effects on

- leishmania tropica by promoting promastigote apoptosis and immunomodulation. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 12, 365-374. <https://doi.org/10.4103/1995-7645.262566>
28. Pamunuwa, G., Karunaratne, V., & Karunaratne, D. (2016) Effect of lipid composition on in vitro release and skin deposition of curcumin encapsulated liposomes. *Journal Nanomater*, <https://doi.org/10.1016/10.1155/2016/4535790>
29. Rezvani, M., Hesari, J., Peighambaroust, S.H., Manconi, M., Hamishehkar, H., & Escibano -Ferrer, E. (2019). Potential application of nanovesicles (niosomes and liposomes) for fortification of functional beverages with Isoleucine -Proline -Proline: A comparative study with central composite design approach. *Food Chemistry*, 293, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.015>
30. Saleh, A., Pirouzifard, M., & Almasi, H. (2022). Optimization and characterization of *Lippia citriodora* essential oil loaded niosomes: A novel plant-based food nano preservative. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 650, 129480. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129480>
31. Shilakari Asthana, G., Sharma, P.K., & Asthana, A. (2016). In vitro and in vivo evaluation of niosomal formulation for controlled delivery of clarithromycin. *Scientifica*. <https://doi.org/10.1155/2016/6492953>
32. Tewabe, A., Abate, A., Tamrie, M., Seyfu, A., & Abdela Siraj, E. (2021). Targeted drug delivery—from magic bullet to nanomedicine: principles, challenges, and future perspectives. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, 1711-1724. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S313968>
33. Vignolini, P., Heimler, D., Pinelli, P., Ieri, F., Sciallo, A., & Romani, A. (2008). Characterization of by-products of saffron (*Crocus sativus* L.) production. *Natural Product Communications*, 3, 1934578X0800301203. <https://doi.org/10.1177/1934578X0800301203>
34. Yamamoto, Y., Nagasaki, Y., Kato, Y., Sugiyama, Y., & Kataoka, K. (2001). Long-circulating poly (ethylene glycol)–poly (d, l-lactide) block copolymer micelles with modulated surface charge. *Journal Control Release*, 77, 27–38. [https://doi.org/10.1016/s0168-3659\(01\)00451-5](https://doi.org/10.1016/s0168-3659(01)00451-5)
35. Yeo, P.L., Lim, C.L., Chye, S.M., Ling, A.P.K., & Koh, R.Y. (2017). Niosomes: a review of their structure, properties, methods of preparation, and medical applications. *Asian Biomedicine*, 11, 301–14. <https://doi.org/10.1515/abm-2018-0002>

Investigating the Effect of Natural Coating of Chitosan Nanoparticles and Nanohydroxyapatite on the Physiological Characteristics and Shelf Life of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*)

Z. Ziaei Ghahnavieh¹, M. Raji^{1*}, A. Ehteshamnia¹, S.S. Sohrabi²

1- Department of Horticultural Science Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

(*- Corresponding Author Email: raji.m@lu.ac.ir)

2- Department of Production Engineering and Plant Genetic, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 22.10.2024

Revised: 30.11.2024

Accepted: 04.12.2024

Available Online: 23.04.2025

How to cite this article:

Ziaei Ghahnavieh, Z., Raji, M., Ehteshamnia, A., & Sohrabi, S.S. (2025). Investigating the effect of natural coating of chitosan nanoparticles and nanohydroxyapatite on the physiological characteristics and shelf life of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(2), 235-251. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.90381.1376>

Introduction

Excessive human exposure to chemicals in agricultural practices contribute to the production of unhealthy and environmentally destructive products. For this reason, natural coatings are used to prevent adverse changes in the quality of various products. Natural coatings can be a barrier on the outer surface of food to prevent the loss of aromatic compounds, and moisture content and provide the possibility of selective natural exchange of some gases and increase shelf life post harvest. Considering the economic importance of button mushrooms and the need to provide optimal solutions to increase shelf life post harvest, the present study was conducted to investigate the effect of natural coatings based on chitosan nanoparticles and nanohydroxyapatite on increasing the shelf life of button mushrooms.

Materials and Methods

For this purpose, the effect of these coatings was evaluated in a factorial experiment in the form of a completely randomized design with three repetitions to prevent adverse changes in button mushroom quality. Button mushrooms were covered with different concentrations of chitosan nanoparticles (zero, 1% and 2%) and nanohydroxyapatite (0, 40, 80 mg) for 28 days. The mushrooms that were prepared for coating were divided into 9 groups. One sample without coating and 8 samples were coated with different percentages of chitosan nanoparticles and nanohydroxyapatite and coded. All mushroom samples were immersed in each of the coating solutions for five minutes. The mushrooms were then taken out of the solutions and placed on the mesh basket (at room temperature) for 15 to 30 minutes so that the additional amount of coating material drips. Then the mushrooms were weighed individually and six numbers were transferred in three replicates in single-use plastic containers with perforated lids. Then they were transferred to the refrigerator. The control sample was immersed in distilled water for 5 minutes instead. The data was measured on days 0, 7, 14, 21 and 28. After coating, the characteristics of total phenol, flavonoid, antioxidant capacity, total protein, ascorbic acid content, and electrolyte leakage of mushrooms were recorded and analyzed during 28 days of storage.

Results and Discussion

Based on the results, the highest amount of total phenol, flavonoid, antioxidant capacity, ascorbic acid content, total protein, and the lowest amount of electrolyte leakage were obtained in 1% nano chitosan coating containing 40 mg of nanohydroxyapatite during 28 days of storage. In the control treatment (without coating), the lowest



©2025 The author(s). 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.2024.90381.1376>

amount of total phenol, flavonoid, antioxidant capacity, ascorbic acid content, total protein, and the highest amount of electrolyte leakage were obtained during 28 days of storage.

Conclusion

Due to the high perishability of button mushroom, its maintenance is very important. Coating is considered as one of the methods of keeping quality of button mushrooms. The purpose of this study was to evaluate the effect of natural coating based on chitosan nanoparticles and nanohydroxyapatite on the total phenolic, flavonoid, antioxidant capacity, ascorbic acid content, electrolyte leakage, and total protein of mushrooms on zero, 7, 14, 21, and 28 day, in order to maintain quality and increase the shelf life of button mushroom. For this purpose, the coating of chitosan nanoparticles (zero, 1%, 2%), nanohydroxyapatite (zero, 40, 80 mg), and the combination of chitosan nanoparticles with nanohydroxyapatite in the mentioned concentrations were used. Finally, according to the findings of this study, it can be stated that coating with 1% nano chitosan containing 40 mg of nanohydroxyapatite can increase the shelf life of button mushroom up to 14 days post harvest, with increased marketability.

Author Contributions

Zahra Ziaei Ghahnavieh: data collection, writing - original draft, Mohammad Reza Raji: project management, writing - review and editing, Abdullah Ehtsham Nia: project management, data management, writing - review and editing, Seyed Sajjad Sohrabi: data management.

Keywords: Edible coating, Edible mushrooms, Nanochitosan, Nanohydroxyapatite, Post-harvest life

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۲۳۵-۲۵۱

بررسی اثر پوشش طبیعی نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر صفات فیزیولوژیکی و ماندگاری قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*)

زهرا ضیائی قهنویه^۱ - محمد رضا راجی^{۱*}  - عبدالله احتشام نیا^۱ - سید سجاده سهرابی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

چکیده

امروزه در بخش کشاورزی تولید محصولات ناسالم باعث استفاده از پوشش‌های طبیعی جهت جلوگیری از تغییرات نامطلوب کیفی و افزایش ماندگاری پس از برداشت محصولات مختلف شده است. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر پوشش‌های طبیعی مبتنی بر نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر افزایش ماندگاری قارچ دکمه‌ای انجام شد. بدین منظور اثر این پوشش‌ها در آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار جهت جلوگیری از تغییرات نامطلوب بر روی کیفیت قارچ دکمه‌ای ارزیابی شد. فاکتورهای آزمایش شامل سطوح پوشش‌دهی قارچ دکمه‌ای با غلظت‌های مختلف نانوکیتوزان (صفر، ۱ و ۲ درصد) و نانوهیدروکسی آپاتیت (۰، ۴۰ و ۸۰ میلی گرم) به مدت ۲۸ روز بود. بعد از پوشش‌دهی صفات فنل کل، فلاونوئید، ظرفیت آنتی اکسیدانی، پروتئین کل، محتوای اسید اسکوربیک و نشت الکترولیت قارچ‌ها طی ۲۸ روز نگهداری یادداشت برداری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم بیشترین میزان فنل کل، فلاونوئید، ظرفیت آنتی اکسیدانی، محتوای اسید اسکوربیک، پروتئین کل و کمترین میزان نشت الکترولیت در طی ۲۸ روز ذخیره سازی نسبت به تیمار شاهد حاصل شد. در تیمار شاهد (بدون پوشش) کمترین میزان فنل کل، فلاونوئید، ظرفیت آنتی اکسیدانی، محتوای اسید اسکوربیک، پروتئین کل و بیشترین میزان نشت الکترولیت در طی ۲۸ روز ذخیره سازی حاصل شد. در نهایت با توجه به یافته‌های این مطالعه می‌توان چنین اظهار نمود که پوشش‌دهی با نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم می‌تواند ماندگاری پس از برداشت قارچ دکمه‌ای را تا ۱۴ روز افزایش دهد که قابلیت بازاریابی را دارد.

واژه‌های کلیدی: پوشش خوراکی، عمر پس از برداشت، قارچ خوراکی، نانوکیتوزان، نانوهیدروکسی آپاتیت

مقدمه

قارچ دکمه‌ای با نام علمی (*Agaricus bisporus*) به دلیل ارزش غذایی بالا یکی از مهم‌ترین گونه‌های قارچ خوراکی از نظر اقتصادی می‌باشد. قارچ خوراکی منبع خوبی از پروتئین، مواد معدنی، پلی ساکاریدها، آنتی اکسیدان‌ها، فیبر غذایی و ویتامین‌ها است، اما محتوای کربوهیدرات و چربی کمی دارد (Qian et al., 2021). همچنین حاوی

ترکیبات بیولوژیکی مختلف با خواص ضدتوموری، ضد میکروبی، آنتی-اکسیدان‌ها، سیستم ایمنی تعدیل کننده و ضد التهابی است (Karimirad et al., 2019).

ماندگاری کوتاه قارچ‌ها مشکل اصلی در توزیع پس از برداشت و بزرگ‌ترین محدودیت در توسعه صنعتی آن‌ها است. دلایل اصلی ماندگاری محدود آن‌ها شامل از دست دادن آب، قهوه‌ای شدن، فعالیت

۱- گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
(Email: raji.m@lu.ac.ir)

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

نفوذپذیری انتخابی در برابر گازها است. علاوه بر این، ادغام ترکیبات ضد میکروبی و یا آنتی اکسیدانی در پوشش کیتوزان می تواند خواص فیزیکی، مکانیکی و بیولوژیکی پوشش را بیش تر بهبود بخشد (Zhang et al., 2019). باین وجود، پوشش کیتوزان خالص دارای خواص بازدارنده ضعیف، پایداری مکانیکی و انحلال پذیری آسان است (Zhang et al., 2019).

مواد ضد میکروبی و ضد باکتری طبیعی به دست آمده از ضایعات موجودات را می توان برای توسعه بسته بندی فعال زیست تخریب پذیر، که جایگزین جالبی برای صنعت بسته بندی مواد غذایی است، استفاده کرد (Shao et al., 2021). هیدروکسی آپاتیت پایدارترین و زیست سازگارترین شکل فسفات کلسیم با فرمول شیمیایی $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ است که یکی از مواد معدنی اولیه است (Sharifianjazi et al., 2021). هیدروکسی آپاتیت یک نمونه معمولی از مواد زیست فعال است (Victor Aberea et al., 2022). نانوهیدروکسی آپاتیت باید پایداری مکانیکی خوبی داشته باشد تا ساختار خود را حفظ کند در مقایسه با سایر فسفات های کلسیم، هیدروکسی آپاتیت یک ترکیب پایدارتر در شرایط فیزیولوژیکی مانند ترکیب مایعات بدن، دما و pH است (Victor Aberea et al., 2022). هیدروکسی آپاتیت نانوساختار (FNHAp) به کار گرفته شده از ضایعات فلس ماهی فراوان به دست آمده از ماهی *Garra mullya* از طریق یک روش عملیات حرارتی قلیایی آسان مشتق شده است. افزایش مسائل زیست محیطی و کاهش سوخت های فسیلی منجر به ظهور فناوری های پایدار و اقتصادی شده است (Eswaran et al., 2021).

قرچلو و همکاران (Gharejelo et al., 2020) در مطالعه ای تأثیر پوشش دهی با کیتوزان و اسانس گیاه چویل (*Ferulago angulate*) بر روی ماندگاری قارچ دکمه ای را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که ساختار کیتوزان و خاصیت ضد میکروبی و ترکیبات فنی موجود در اسانس علت اصلی حفظ کیفیت نمونه های قارچ در طی نگهداری بود. کریمی راد و همکاران (Karimirad et al., 2019) به بررسی اثر نانوذرات کیتوزان حاوی اسانس زیره سبز (CEO-CSNPs) بر ماندگاری قارچ دکمه ای طی ۲۰ روز نگهداری در سردخانه پرداختند و نتیجه گرفتند که در مقایسه با نمونه های کنترلی که پس از ۱۰ روز ذخیره سازی کیفیت خود را از دست می دهند، به کیفیت کلی قابل قبول اشاره کرد. در مطالعات مختلف اثر نانوهیدروکسی آپاتیت بر روی رشد محصولات مختلف بررسی شده است. در پژوهشی کارایی بالاتر نانوهیدروکسی آپاتیت نسبت به کودهای فسفر معمولی مشاهده شد (Priyam et al., 2022). در مطالعه جیانگ و همکاران مهار طویل شدن هیپوکوتیل جوانه های ماش به حضور نانوساختارها در سلول ها و افزایش غلظت کلسیم نسبت داده شد (Landa et al., 2024).

پلی فنل اکسیداز (PPO) ناشی از آسیب بافتی، تهاجم میکروبی، فعالیت متابولیک بالا، تنفس و پیری طبیعی است (Fattahifar et al., 2018). پوشش چتر به راحتی باز می شود و قهوه ای می شود و بافت نیز به راحتی نرم و اسفنجی می شود (Shao et al., 2021). مدت ماندگاری قارچ دکمه ای از یک تا سه روز در دمای محیط، تا حدود هشت روز در شرایط سردخانه در نوسان است (Paula et al., 2021).

روش های زیادی برای افزایش ماندگاری قارچ های پس از برداشت وجود دارد. این روش ها را می توان به سه نوع، بسته بندی اتمسفر اصلاح شده، پوشش کیتوزان، و خیس اندن شیمیایی طبقه بندی کرد. به عنوان مؤثرترین روش فیزیکی، بسته بندی در اتمسفر اصلاح شده بسیار پرهزینه است و امکان پذیر نیست و برخی از معرف های شیمیایی ممکن است برای سلامتی انسان خطرناک باشند (Hu et al., 2020). بنابراین، برای افزایش دوره نگهداری پس از برداشت و حفظ کیفیت *A. bisporus*، استفاده از روش های نگهداری مناسب ضروری است.

امروزه استفاده از پوشش های طبیعی به عنوان یک فناوری به نسبت جدید و ساده در جلوگیری از تغییرات نامطلوب کیفی محصولات مختلف بسیار مؤثر می باشد (Qian et al., 2021). پوشش های طبیعی از پلیمرهای طبیعی تهیه می شوند و استفاده از آن ها باعث ارتقاء کیفی و بهداشتی مواد غذایی می شود (Khosravi et al., 2022). پوشش های طبیعی و خوراکی به پوشش های پروتئینی، پلی ساکاریدی، لیپیدی و یا ترکیبی از آن ها تقسیم بندی می شوند و می توانند با به تأخیر انداختن در کاهش از دست دهی آب، حفظ ترکیبات معطر، کاهش تنفس و تأخیر در تغییرات ساختاری میوه، موجب افزایش نگهداری محصولات غذایی شوند (Karimirad et al., 2020).

رویکرد جدید فناوری نانو یکی از مهم ترین اولویت های تحقیقاتی محسوب می شود (Huang et al., 2023). تفاوت اصلی فناوری نانو با فناوری های دیگر تنها کوچک بودن اندازه نیست بلکه زمانی که اندازه مواد در این مقیاس قرار می گیرد، خصوصیات ذاتی آن ها از جمله رنگ و استحکام تغییر می کند (Pabast et al., 2018). محصور کردن ترکیبات فعال زیستی در اندازه نانومتر موجب افزایش فعالیت بیولوژیکی آن ها شده و آزادسازی تدریجی اسانس از سطح بزرگ را فراهم می کند (Karimirad et al., 2020).

کیتوزان یک پلی ساکارید کاتیونی است که از استیل زدایی کیتین، که جزء اصلی اسکلت بیرونی سخت پوستان و دومین پلی ساکارید فراوان در طبیعت است، به دست می آید. به دلیل خواص غیر سمی، زیست تخریب پذیر، زیست سازگار، آنتی اکسیدانی ذاتی و تشکیل پوشش، کیتوزان به عنوان یک جزء ایده آل برای پوشش های طبیعی در نظر گرفته می شود (Liu et al., 2019). فیلم کیتوزان دارای انعطاف پذیری، دوام، استحکام، مقاومت در برابر شکستگی بالا، ضد میکروبی و

ابتدا محلول پوشش‌دهی با افزودن دو گرم پودر کیتوزان، ۹۹ سی سی آب مقطر و یک سی سی استیک اسید و هم زدن بدون حرارت‌دهی انجام شد و سپس برای تبدیل به نانوکیتوزان و اعمال تیمار به ترتیب زیر عمل شد.

محلول پوشش‌دهی نانوکیتوزان دو درصد

محلول پوشش‌دهی با افزودن ۰/۵ گرم پودر سدیم تری‌پلی‌فسفین در ۱۵۰ سی سی آب مقطر حل شد و سپس در بورت ریخته شد و قطره قطره به محلول کیتوزان دو درصد اضافه شد و به‌طور مکرر سونیک و هم زدن بدون حرارت‌دهی انجام شد (Karimirad et al., 2020). در نهایت pH محلول به ۵/۵ رسانده شد و سپس فقط محلول پوشش‌دهی نانوکیتوزان برای اعمال تیمار استفاده شد.

تهیه محلول‌های میکس

محلول‌های پوشش‌دهی نانوکیتوزان یک درصد و دو درصد با نانوهیدروکسی آپاتیت

محلول پوشش‌دهی نانوکیتوزان یک درصد را با اضافه کردن ۵ سی سی توپین ۸۰ درصد و ۱۰ قطره گلیسرول ۸۵ درصد بار دیگر تهیه کرده و سپس ۱۰۰ سی سی از آن را برداشته و با افزودن ۴۰ میلی گرم نانوهیدروکسی آپاتیت به ۱۰۰ سی سی آب مقطر مخلوط کردیم و در نهایت درون ۳ لیتر آب مقطر حل کرده و دو قطره توپین به آن اضافه شد. سپس برای غلظت نانوکیتوزان یک درصد حاوی ۸۰ میلی گرم نانوهیدروکسی آپاتیت نیز به همین ترتیب عمل کردیم. تهیه محلول میکس نانوکیتوزان دو درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت به همین ترتیب صورت گرفت.

محلول پوشش‌دهی غلظت‌های مختلف نانوهیدروکسی آپاتیک

غلظت‌های مختلف نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ و ۸۰ میلی گرم وزن گردید و سپس افزودن ۴۰ میلی گرم نانوهیدروکسی آپاتیت به ۱۰۰ سی سی آب مقطر انجام شد و برای حل شدن، استیرر صورت گرفت. در نهایت غوطه‌وری قارچ‌ها در محلول به‌دست آمده، ۳ لیتر آب مقطر و اضافه کردن دو قطره توپین انجام شد. تهیه این محلول پوشش‌دهی برای غلظت نانوهیدروکسی آپاتیت ۸۰ میلی گرم نیز مانند غلظت ۴۰ میلی گرم انجام شد.

در پژوهش حاضر، فرض بر این است که تیمار نانوکیتوزان، تیمار نانوهیدروکسی آپاتیت و ترکیب این تیمارها باعث افزایش ماندگاری پس از برداشت می‌شود. با توجه به اهمیت اقتصادی قارچ دکمه‌ای و ضرورت ارائه راهکارهای مطلوب افزایش ماندگاری پس از برداشت، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر پوشش طبیعی نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر ویژگی‌های مختلف قارچ دکمه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

ابتدا قارچ دکمه‌ای در مهرماه ۱۴۰۲ از کارگاه پرورش قارچ واقع در شهرک صنعتی استان لرستان تهیه شد. کیتوزان با مشخصات (وزن مولکولی: ۳۱۰-۱۹۰ کیلو دالتون بر اساس ویسکوزیته؛ ویسکوزیته: ۸۰-۲۰۰ cP؛ درجه استیلاسیون: ۷۵-۸۵٪)، و نانوهیدروکسی آپاتیت با مشخصات (وزن مولکولی: ۱۰۴/۶ گرم بر مول؛ اندازه ذرات: ۱۰-۳۰ نانومتر؛ چگالی ۳/۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، از شرکت تماد کالا تهران تهیه شد. سپس مراحل تیمار و پوشش‌دهی به شرح ذیل انجام شد.

تهیه محلول‌های پوشش‌دهی

محلول پوشش‌دهی کیتوزان یک درصد

برای تهیه تیمار محلول پوشش‌دهی نانوکیتوزان ابتدا باید محلول پوشش‌دهی کیتوزان تهیه شود. بنابراین برای تهیه محلول پوشش‌دهی کیتوزان ابتدا با افزودن یک گرم پودر کیتوزان، ۹۹ سی سی آب مقطر و یک سی سی استیک اسید و هم زدن بدون حرارت‌دهی انجام شد و سپس برای تبدیل به نانوکیتوزان و اعمال تیمار به ترتیب زیر عمل شد.

محلول پوشش‌دهی نانوکیتوزان یک درصد

محلول پوشش‌دهی با افزودن ۰/۵ گرم پودر سدیم تری‌پلی‌فسفین در ۱۵۰ سی سی آب مقطر حل شد و سپس در بورت ریخته شد و قطره قطره به محلول کیتوزان یک درصد اضافه شد و به‌طور مکرر سونیک و هم‌زدن بدون حرارت‌دهی انجام شد (Karimirad et al., 2020). در نهایت pH محلول به ۵/۵ رسانده شد و سپس فقط محلول پوشش‌دهی نانوکیتوزان برای اعمال تیمار استفاده شد. از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FE-SEM, Mara3 Tescan, Czech Republic) برای بررسی اندازه نانو و خصوصیات مورفولوژیکی نانوکیتوزان استفاده شد.

محلول پوشش‌دهی کیتوزان دو درصد

آماده‌سازی نمونه

قارچ‌های دکمه‌ای برداشت شده از چین دوم در کم‌ترین زمان به آزمایشگاه انتقال داده شدند سپس با آب مقطر شست و شو و ساقه آن‌ها کوتاه شد و برای غوطه‌وری در تیمارهای مورد مطالعه آماده شدند.

پوشش‌دهی قارچ‌ها

قارچ‌هایی که برای پوشش‌دهی آماده شدند به ۹ گروه تقسیم شدند. یک نمونه بدون پوشش و ۸ نمونه حاوی پوشش با درصدهای متفاوت نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت تهیه و کدگذاری شدند. قارچ‌ها به روش غوطه‌وری طبق تیمار مورد نظر داخل هر کدام از محلول‌های پوشش‌دهی به مدت پنج دقیقه قرار گرفتند. قارچ‌ها از محلول‌ها خارج شدند و به مدت ۱۵ الی ۳۰ دقیقه بر روی سبد مشبک (در دمای آزمایشگاه) قرار گرفتند تا مقدار اضافه ماده پوشش‌دهنده چکه کند. سپس قارچ‌ها به صورت انفرادی توزین شده و تعداد شش عدد در سه تکرار درون ظروف پلاستیکی بسته‌بندی یک بار مصرف دارای درب سوراخ‌دار منتقل شدند. سپس به یخچال با دمای چهار درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. نمونه شاهد به مدت ۵ دقیقه داخل آب مقطر غوطه‌ور شد. اندازه‌گیری داده‌ها در روزهای صفر، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ انجام گرفت.

اندازه‌گیری محتوای فنل کل

عصاره‌گیری قارچ‌ها

عصاره‌گیری قارچ دکمه‌ای برای اندازه‌گیری فنل کل با استفاده از روش بخشی و آراکاوا (Bakhshi & Arakawa, 2006) انجام شد. به این منظور در ابتدا مقدار یک گرم از بافت تازه قارچ در هاون چینی پودر و سپس ۳ میلی‌لیتر حلال استخراج (متشکل از ۸۰ درصد متانول + ۲۰ درصد آب مقطر) به آن اضافه شد. آن گاه عصاره حاصل از نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری و در نهایت پس از ریخته شدن در لوله فالکون با دور ۱۰۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس محلول رویی را برداشته و رسوب دور ریخته شد.

محتوای فنل کل در عصاره‌ها با روش فولین سیو کالچو انجام شد. ابتدا ۵۰ میکرولیتر عصاره نمونه‌ها با آب مقطر به حجم ۲۰۰ میکرولیتر رسانده و ۱۰۰۰ میکرولیتر فولین ۱۰ درصد به آن اضافه کردیم. پس از ۵ دقیقه از افزودن فولین مقدار ۸۰۰ میکرولیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد نیز به آن اضافه کردیم. سپس محلول به دست آمده به مدت ۹۰ دقیقه در تاریکی و در دمای اتاق نگهداری و آن گاه میزان جذب عصاره توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۵ نانومتر قرائت شد. در نهایت

میزان فنل کل از روی میزان جذب نمونه و مقایسه آن با استاندارد بر حسب میلی گرم اسید گالیک در یک گرم بافت تازه محاسبه شد.

اندازه‌گیری فلاونوئید

محتویات فلاونوئیدی قارچ دکمه‌ای با استفاده از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم (Chang et al., 2002) انجام شد. با استفاده از عصاره تهیه شده برای فنل‌ها ابتدا ۱۰۰۰ میکرولیتر از عصاره را برداشته و با ۱۰۰۰ میکرولیتر آلومینیوم کلرید مخلوط کردیم. سپس به مدت ۱۵ دقیقه ورتکس کردیم و به مدت ۱۵ دقیقه استراحت و سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر با طول موج ۴۱۵ نانومتر قرائت کردیم. محتوای فلاونوئید کل محاسبه و به صورت میکروگرم معادل روتین (RE) در هر گرم نمونه بیان شد.

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (FRAP)

برای اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای محتوای مواد واکنش شامل ۸۰ میکرولیتر از عصاره نمونه مورد نظر (از همان عصاره تهیه شده برای فنل‌ها) به ۷۲۰ میکرولیتر از معرف FRAP (۱۰۰ میلی‌لیتر از بافر استات سدیم ۳۰۰ میلی‌مولار در pH 3.6، ۱۰ میلی‌لیتر از TPTZ ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰ میلی‌لیتر از $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ۲۰ میلی‌مولار) اضافه شد و مخلوط واکنش آنکوبه شد. در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه و افزایش جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۳ نانومتر اندازه‌گیری شد. FeSO_4 برای کالیبراسیون استفاده شد. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بر اساس توانایی کاهش یون‌های آهن نمونه از منحنی کالیبراسیون خطی محاسبه شده و به صورت mmol FeSO_4 در هر گرم نمونه بیان شد (Benzie & Strain, 1996).

نشت الکترولیت

برای تعیین نشت یونی از روش ارائه شده توسط سایرمان و همکاران استفاده شد (Sairam & Srivastava, 2002). برای اندازه‌گیری این پارامتر از نمونه‌های درون هر بسته (کلاهی و پایه قارچ) ۲ گرم (از هر نمونه ۲ سری) درون فالکن حاوی ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر منتقل شدند. سپس یک گروه از نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه به مدت ۳۰ دقیقه و سری دیگر در دمای ۱۰۰ درجه به مدت ۱۵ دقیقه در بن‌ماری (مدل دنا ساخت کشور ایران) قرار داده شدند، میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها بعد از رسیدن به دمای اتاق توسط EC متر (مدل 400L، ساخت

به لوله‌های آزمایش مقدار ۵۰ میکرولیتر از محلول رویی عصاره پروتئینی و ۲۹۵۰ میکرولیتر معرف بردفورد افزوده و پس از ۱۵ دقیقه و قبل از یک ساعت جذب آن‌ها را با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۵ نانومتر قرائت کردیم و غلظت پروتئین با استفاده از منحنی استاندارد با کمک آلومن گاهی محاسبه گردید. میزان پروتئین کل برای تک تک نمونه‌ها بر حسب میلی گرم بر گرم وزن تر بیان شد.

طرح آماری و آنالیز داده‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. از نرم افزار SAS جهت تجزیه و تحلیل آماری استفاده گردید.

نتایج و بحث

مورفولوژی نانوکیتوزان توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FESEM) آنالیز شد. تصاویر FESEM از نانوکیتوزان یک شکل کروی و توزیع منظم را نشان دادند. اندازه متوسط نانوکیتوزان بین ۱۳ و ۵۱ نانومتر توزیع شد (شکل ۱).

جدول ۱ تجزیه واریانس اثر نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر صفات فنل کل، فلاونوئید، FRAP، نشت الکترولیت، پروتئین کل و ویتامین C بر ماندگاری پس از برداشت قارچ دکمه‌ای را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول اثرات یگانه، دوگانه و اثر سه گانه تیمارها بر روی اندازه‌گیری صفات ذکر شده بر عمر ماندگاری قارچ دکمه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار شد.

کشور کره جنوبی) اندازه‌گیری شد. سپس درصد نشت یونی با فرمول (۱) محاسبه گردید:

$$(1) \quad EC(2) - EC(1) / EC(2) \times 100 = \text{نشت الکترولیت}$$

در معادله فوق EC(1) و EC(2) به ترتیب بیانگر هدایت الکتریکی در دمای اولیه و هدایت الکتریکی در دمای ثانویه است.

ویتامین C

محتوای ویتامین C با روش تیتراسیون انجام شد. بدین صورت که ۵ میلی لیتر از عصاره قارچ را با ۱۰ میلی لیتر آب مقطر و ۲ میلی لیتر چسب نشاسته یک درصد مخلوط شد. سپس با استفاده از محلول یدید تیترا شد تا به رنگ مایل به بنفش شود و عدد بورت را یادداشت کردیم میزان ویتامین C با فرمول (۲) محاسبه گردید:

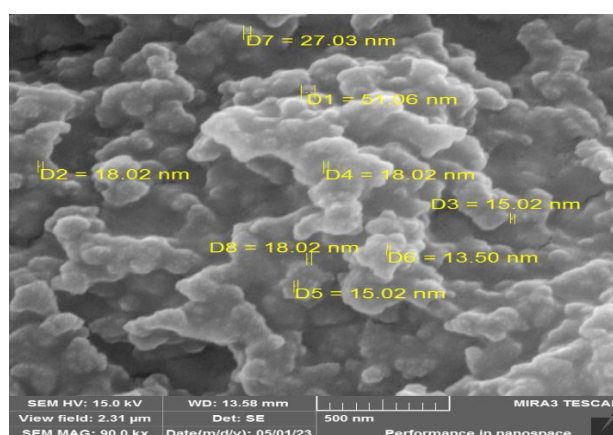
$$(2) \quad A = S \times N \times F \times 88.1 / 10 \times 100$$

$$F = A / B \times N \times 88.1$$

در معادله فوق A، N، F، S و B به ترتیب بیانگر میزان اسید آسکوربیک در عصاره، نرمالیتته محلول ید مصرف شده، فاکتور محلول ید مصرف شده، محلول ید مصرف شده و مقدار محلول ید مصرف شده است.

پروتئین کل

سنجش پروتئین کل بر اساس روش بردفورد و همکاران (Bradford et al., 1976) انجام گرفت. به این منظور ۰/۵ گرم از بافت تازه قارچ با ازت مایع در هاون چینی پودر شد و یک سی سی از بافر فسفات تهیه شده به آن اضافه شد و پس از ورتکس و سانتریفیوژ با دور ۱۴۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد محلول رویی را جدا کرده و مجدد به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ کردیم سپس



شکل ۱- میکروگراف FESEM از نانوذرات کیتوزان تهیه شده

Fig. 1. FESEM micrograph of prepared chitosan nanoparticles

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر ماندگاری پس از برداشت قارچ دکمه‌ای
Table 1- Variance analysis of the effect of nanochitosan and nanohydroxyapatite, on shelf life after harvesting button mushroom

منابع تغییرات Sources of change	df	فنل کل Total phenol	فلاونوئید Flavonoid	ظرفیت آنتی اکسیدانی FRAP	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	پروتئین کل Total protein	ویتامین C Vitamin C
روز Day	4	10758.73**	5069.43**	0.077**	0.59**	0.838**	0.000012**
نانوکیتوزان Nanochitosan	2	10059.58**	10716.63**	0.00018**	0.29**	1.147**	0.0000077**
نانوهیدروکسی آپاتیک Nano hydroxyapatite	2	2037.31**	1748.46**	0.017**	0.056**	0.129**	0.0000018**
روز* نانوکیتوزان Day* Nanochitosan	8	1538.78**	136.33**	0.0037**	0.054**	0.082**	0.00000067*
روز* نانوهیدروکسی آپاتیک Day* Nano hydroxyapatite	8	342.58**	41.24**	0.0023**	0.011**	0.016**	0.00000030*
نانوکیتوزان* نانوهیدروکسی آپاتیک Nanochitosan* Nanohydrox yapatite	4	426.006**	351.22**	0.0086**	0.004**	0.013**	0.00000005*
روز* نانوکیتوزان* نانوهیدروکسی آپاتیک Day* Nanochitosan* Nano hydroxyapatite	16	70.30**	7.16**	0.0021**	0.001**	0.0007**	0.00000001*
خطا Error	90	0.059	0.19	0.0000060	0.000013	0.00014	0.00000
کل Total	134	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات Coefficient of Variation	-	0.061	0.99	0.716	1.35	1.68	1.17

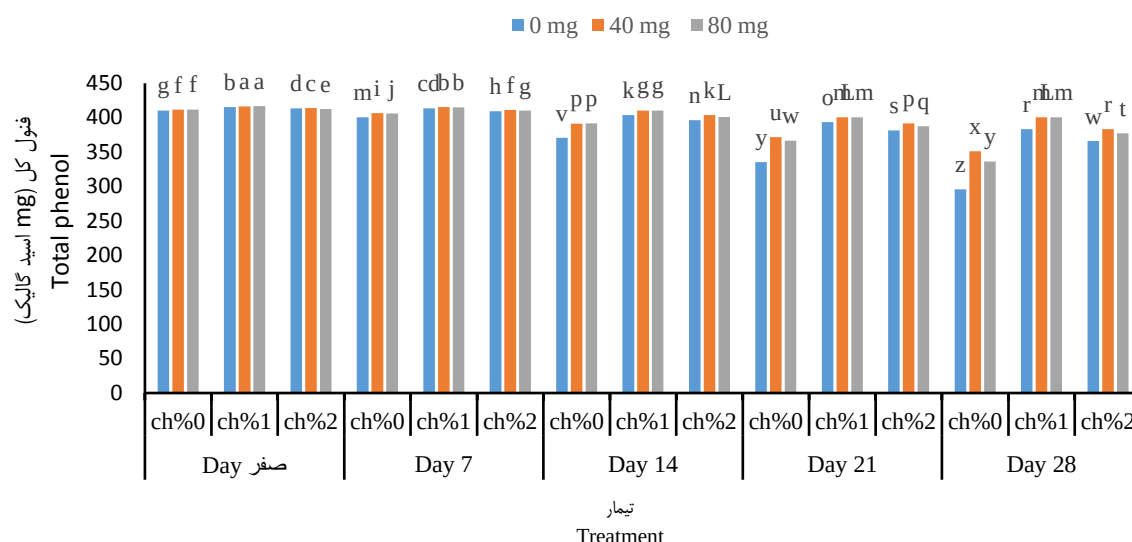
ns و * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح آماری یک و پنج درصد و غیرمعنی‌دار است.

ns, * and ** are respectively significant at the statistical level of one and five percent and insignificant

محتوای فنل کل

همان‌طور که در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است، کاهش تدریجی محتوای فنل کل در قارچ‌های بدون پوشش و پوشش داده شده در طول ذخیره‌سازی مشاهده شد. با این وجود، استفاده از پوشش‌های نانوهیدروکسی آپاتیت به تنهایی یا همراه با نانوکیتوزان منجر به افزایش سطوح فنل کل در مقایسه با گروه کنترل (بدون پوشش) شد. بیش‌ترین میزان فنل کل در تیمار نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم روز صفر نگهداری به ترتیب با میزان (۴۱۶/۵۲) و (۴۱۶/۶۱) بود که تفاوت معنی‌داری با سایر پوشش‌ها بجز تیمار بدون پوشش روز ۲۸ نگهداری داشت. به‌طور خاص، در تمام روزهای نگهداری، گروه کنترل بدون پوشش کم‌ترین فنل کل را نشان داد. و در روز ۲۸ نگهداری نسبت به سایر روزها به میزان کم‌تر ۲۹۵/۷۳ شد که با کم‌ترین تیمار سایر روزهای نگهداری تفاوت معنی‌داری را نشان داد. در مقابل، نمونه تیمار شده با پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بیش‌ترین فنل کل را

نشان داد که تأثیر قابل توجهی از تیمار ترکیبی نانوکیتوزان با غلظت یک درصد و نانوهیدروکسی آپاتیت را برجسته می‌کند. قارچ منبعی غنی از بسیاری از مواد با خواص آنتی‌اکسیدانی، به‌ویژه اجزای پلی‌فنلی است که یکی از گروه‌های اصلی متابولیت‌های ثانویه هستند (Louis et al., 2021). به‌طور کلی، فنل‌ها عملکرد دوگانه‌ای در قارچ دارند (Dokhanieh & Aghdam, 2016). از یک طرف، فنل‌ها می‌توانند توسط PPO اکسید شوند که منجر به قهوه‌ای شدن می‌شود، که به‌عنوان اصلی‌ترین علامت استرس پس از برداشت قارچ است. از سوی دیگر، فنل‌های انباشته شده در قارچ دارای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قوی است که می‌تواند پراکسیداسیون لیپیدی را از طریق مهار شروع یا انتشار واکنش‌های زنجیره‌ای اکسید کننده به تأخیر بیندازد (Dokhanieh & Aghdam, 2016). گزارش شده است که بین دما و محتوای فنلی کل میوه‌ها رابطه وجود دارد، زیرا ذخیره‌سازی سرد با تغییر متابولیسم فنل منجر به افزایش محتوای فنلی می‌شود (Camargo & Dunoyer, 2016).



شکل ۲- ارزیابی پوشش دهی با نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر محتوای فنل کل نمونه های قارچ دکمه ای

حروف متفاوت بالای ستون ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Fig. 2. Evaluation of coating with nanochitosan and nanohydroxyapatite on the total phenolic content of button mushroom samples

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

نانومواد مغذی فسفر استفاده شد. در این مطالعه محتوای فنل ها در عصاره گیاهان تازه پس از ۳۰ روز پس از تیمار با کمترین (C1 ¼ 12.5 میکروگرم/mL1) و بالاترین (C3 ¼ 1000 میکروگرم/mL1) دوز nHAPs و nP بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که محتوای فنل با کنترل تیمار نشده قابل مقایسه بود. و تیمار با NM های مبتنی بر P در شرایط خاک اسیدی و بازی به جوانه زنی، زیست توده و طول گیاه در آزمایش گلدانی اتاق رشد کمک می کند. این نشان می دهد که گیاهان در هنگام اعمال NM ها تنش را تجربه نمی کنند. هیچ گزارش قابل توجهی در مورد شاخص های تنش در گیاهان در معرض NM های مبتنی بر P با استفاده از ویژگی های بیوشیمیایی وجود ندارد (Priyam et al., 2022).

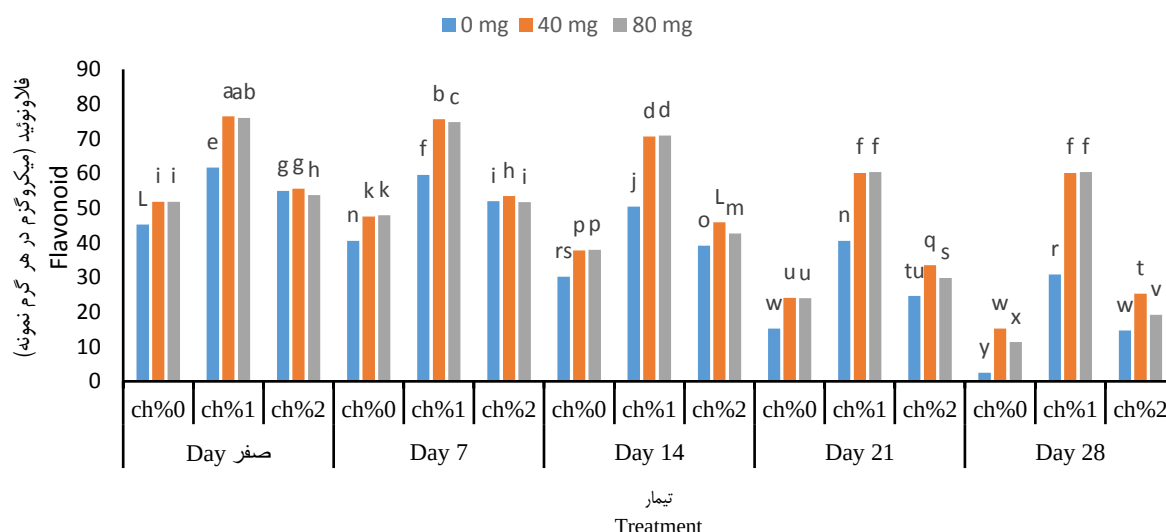
فلاونوئید

بر اساس نتایج مقایسات میانگین نمودار شکل ۳ نشان داده شده است که، کاهش تدریجی فلاونوئیدها در قارچ های بدون پوشش و پوشش داده شده در طول ذخیره سازی مشاهده شد. باین وجود، استفاده از پوشش های نانوهیدروکسی آپاتیت به تنهایی یا همراه با نانوکیتوزان منجر به افزایش سطوح فلاونوئیدها در مقایسه با گروه کنترل (بدون پوشش) شد. بیشترین میزان فلاونوئید در تیمار نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ و ۸۰ میلی گرم روز صفر نگهداری به ترتیب با میزان (۷۶/۴۰) و (۷۶/۰۰۳) بود که تفاوت معنی داری با سایر

طی مطالعه ای بر روی اثر نانوذرات کیتوزان با اسانس زیره سبز (CEO-CSNPs) بر ماندگاری قارچ دکمه ای طی ۲۰ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی گراد نشان داده شد که، تغییرات محتوای فنلی در قارچ های ذخیره شده نسبت به شاهد کمتر کاهش یافت (Karimirad et al., 2019). فتاحی فر و همکاران (Fattahifar et al., 2018) در آزمایشی اثر بازدارندگی عصاره آبی پوسته سبز پسته بر فعالیت تیروزیناز قارچ پس از برداشت را مورد بررسی قرار دادند و اندازه گیری محتوای فنلی کل قارچ ها در روزهای ۱ و ۱۰ نگهداری نشان داد که، در روز اول، محتوای فنلی کل قارچ های تیمار شده با عصاره پوست سبز پسته، اسیدهای اسکوربیک سیتریک و متابی سولفیت سدیم به ترتیب ۳۲/۳، ۲۲/۶ و ۶۴/۵ درصد بیش تر از شاهد بود. در روز دهم، تنها قارچ های تیمار شده با عصاره پوست سبز پسته دارای محتوای فنلی کل بالاتر (۱۰،۴٪) و قارچ های تیمار شده با اسیدهای اسکوربیک سیتریک و متابی سولفیت سدیم به ترتیب ۱۰،۴ و ۱۲/۵ درصد محتوای فنلی کل کمتر نسبت به شاهد داشتند. تیمارهای متابی سولفیت سدیم و اسیدهای اسکوربیک سیتریک نتوانستند پس از ۱۰ روز از اکسیداسیون ترکیبات فنولی جلوگیری کنند و محتوای فنلی کل قارچ ها کاهش یافت. در مطالعه ای اثرات کوددهی انواع مختلف NM های مبتنی بر P را که از نظر شکل، اندازه و مسیر سنتز متفاوت هستند با استفاده از OECD TG 208 بر روی *Solanum lycopersicum* (Pusa Rohini)، گوجه فرنگی هندی) بررسی شد. کاربرد خاکی nHAPs و nP به عنوان

شده با پوشش ترکیبی نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ و ۸۰ میلی گرم بیشترین فلاونوئید را نشان داد که تأثیر قابل توجهی از تیمار ترکیبی نانوکیتوزان با غلظت یک درصد و نانوهیدروکسی آپاتیت را برجسته می‌کند.

پوشش‌ها داشت. به‌طور خاص، در تمام روزهای نگهداری، گروه کنترل بدون پوشش کمترین فلاونوئید را نشان داد. و در روز ۲۸ نگهداری نسبت به سایر روزها به میزان کم‌تر ۲/۴۴ شد. که با کمترین تیمار سایر روزهای نگهداری تفاوت معنی‌داری را نشان داد. در مقابل، نمونه تیمار



شکل ۳- ارزیابی پوشش‌دهی با نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر محتوای فلاونوئید نمونه‌های قارچ دکمه‌ای

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Fig. 3. Evaluation of coating with nanochitosan and nano-hydroxyapatite on the flavonoid content of button mushroom samples

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

داشته باشند و در نتیجه کارایی کوددهی در همان دوزها در مقایسه با تیمار با منابع فسفر حجیم بهبود یافته است. این نشان می‌دهد که گیاهان در هنگام اعمال NMها تنش را تجربه نمی‌کنند (Priyam et al., 2022). برخلاف این مطالعه، قرار گرفتن ریحان در معرض روی و مس سنتز شده سبز منجر به افزایش سطح فنولیک‌ها و فلاونوئیدها شده است (Abbasifar et al., 2020). در مطالعه دیگری، قرار گرفتن در معرض نانوذرات سولفات مس باعث افزایش محتوای فنولیک و فلاونوئید در *Verbena bipinnatifida* Nutt (Genady et al., 2016) و NMهای نقره افزایش استرس اکسیداتیو و افزایش سطح فنل‌ها و فلاونوئیدها در سیب‌زمینی را نشان دادند (Homaee et al., 2016).

این گزارشات تأیید می‌کنند که NMهای مبتنی بر P بیوژن می‌توانند به‌عنوان یک جایگزین «دوستانه با محیط‌زیست» برای NMهای مبتنی بر P موجود با منشاء شیمیایی عمل کنند. بنابراین، نتایج حاصل از این مطالعه و مطالعات انجام شده دیگر، مزایای جوانه‌زنی و تقویت رشد و افزایش ماندگاری پس از برداشت، استفاده از NMهای مبتنی بر P به‌عنوان کود و تیمار پس از برداشتی در انواع خاک‌هایی که دارای

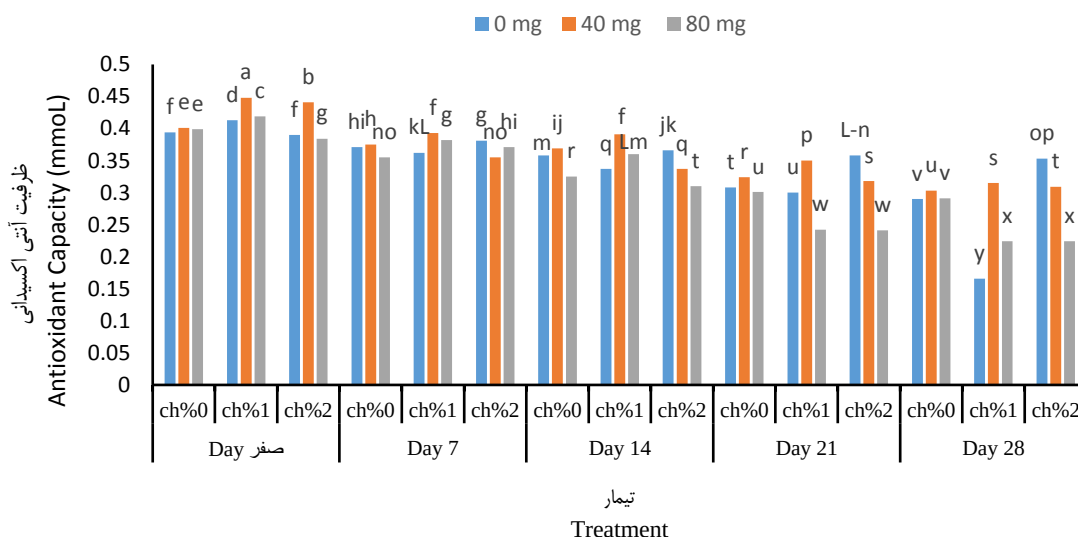
فلاونوئیدها متابولیت‌های ثانویه گیاهی هستند که فعالیت‌های مهارکنندگی رادیکالی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن دارند (Priyam et al., 2022). تجمع متابولیت‌های ثانویه مانند فلاونوئیدها و فنولیک‌ها یکی از پاسخ‌های رایج گیاهان به تنش‌های زیستی و غیر زنده است (Priyam et al., 2022). در مطالعه‌ای اثرات کوددهی انواع مختلف NMهای مبتنی بر P را که از نظر شکل، اندازه و مسیر سنتز متفاوت هستند با استفاده از OECD TG 208 بر روی *Solanum lycopersicum* بررسی شد. کاربرد خاکی nHAPs و nP به‌عنوان نانومواد مغذی فسفر استفاده شد. در این مطالعه محتوای فلاونوئیدها در عصاره گیاهان تازه پس از ۳۰ روز پس از تیمار با کمترین ($C1/4$) 12.5 میکروگرم (mL1) و بالاترین ($C3/4$) 1000 میکروگرم (mL1) دوز nHAPs و nP بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که محتوای فلاونوئیدها نیز با کنترل تیمار نشده قابل مقایسه بود. و تیمار با NM-های مبتنی بر P در شرایط خاک اسیدی و بازی به جوانه‌زنی، زیست‌توده و طول گیاه در آزمایش گلدانی اتاق رشد کمک می‌کند. این نشان می‌دهد که به‌دلیل اندازه کوچک‌تر و در نتیجه نسبت سطح به حجم بالاتر، NMهای مبتنی بر P ممکن است جذب بیشتری در گیاهان

سطوح ظرفیت آنتی اکسیدانی در مقایسه با گروه کنترل (بدون پوشش) شد. بیشترین میزان ظرفیت آنتی اکسیدانی در تیمار نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم روز صفر نگهداری با میزان (۰/۴۴۸) بود که تفاوت معنی داری با سایر پوششها در طی روزهای نگهداری داشت. به طور خاص، در روز ۲۸ نگهداری، پوشش نانوکیتوزان یک درصد کمترین ظرفیت آنتی اکسیدانی را نشان داد. که با کمترین تیمار سایر روزهای نگهداری تفاوت معنی داری را نشان داد. در مقابل، نمونه تیمار شده با پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم بیشترین ظرفیت آنتی اکسیدانی را نشان داد که تأثیر قابل توجهی از تیمار ترکیبی نانوکیتوزان با غلظت یک درصد و نانوهیدروکسی آپاتیت را برجسته می کند.

تغییرات pH هستند و نیز به عنوان پوشش طبیعی برای افزایش ماندگاری پس از برداشت محصولات را برجسته می کند. نتایج مثبت این مطالعه همچنین بر اهمیت آزمایش این NMهای مبتنی بر P در شرایط دمایی مختلف با انواع مختلف محصولات برای تأیید بیشترین میزان عمر ماندگاری محصولات با NMها تأکید می کند.

ظرفیت آنتی اکسیدانی (FRAP)

نتایج مقایسات میانگین نمودار شکل ۴ نشان داد، کاهش تدریجی ظرفیت آنتی اکسیدانی در قارچهای بدون پوشش و پوشش داده شده در طول ذخیره سازی مشاهده شد. با این وجود، استفاده از پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت منجر به افزایش



شکل ۴- ارزیابی پوشش دهی با نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر محتوای ظرفیت آنتی اکسیدانی نمونه های قارچ دکمه ای

حروف متفاوت بالای ستون ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ($P < 0.05$)

Fig. 4. Evaluation of coating with nanochitosan and nanohydroxyapatite on the content of antioxidant capacity of button mushroom samples

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

ترکیبات فنلی نقش مهمی در فعالیت آنتی اکسیدانی قارچ دارند. علاوه بر این، وجود نانوهیدروکسی آپاتیت در این پوششها به آنها اجازه می دهد تا ظرفیت بیش تری در از بین بردن رادیکال ظرفیت آنتی اکسیدانی داشته باشند.

در آزمایشی اثر بازدارندگی عصاره آبی پوسته سبز پسته بر فعالیت تیروزیناز قارچ پس از برداشت نشان داد که فعالیت های رادیکال DPPH قارچ های تیمار شده در روزهای ۱ و ۱۰ ذخیره سازی کاهش یافت. در روز اول، فعالیت آنتی اکسیدانی قارچ تیمار شده با عصاره پوست سبز پسته، اسیدهای اسکوربیک سیتریک و متابی سولفیت سدیم به

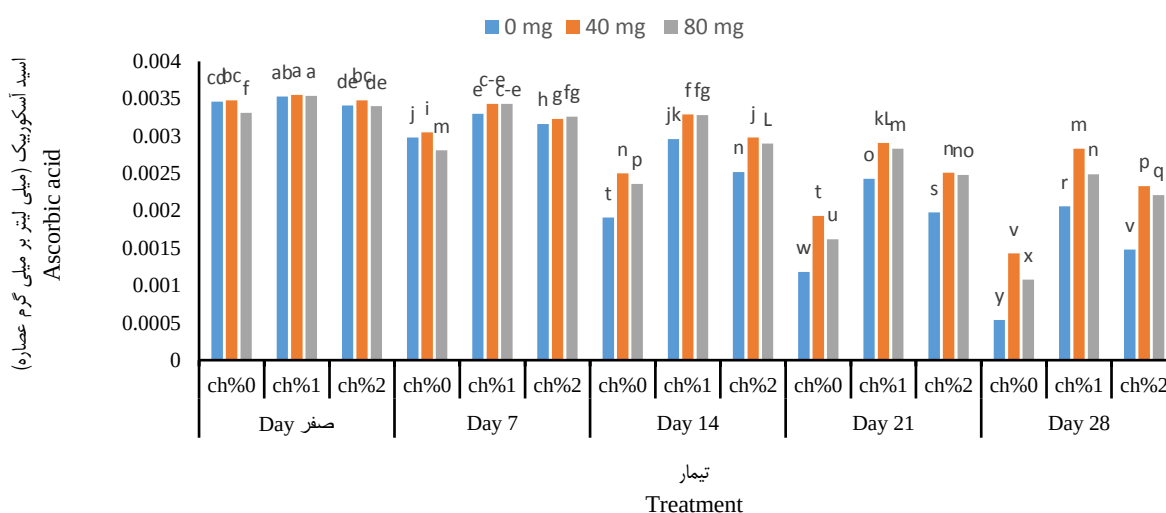
در ابتدا، در روز صفر، امکان مشاهده فعالیت آنتی اکسیدانی بالاتر در قارچ های پوشش داده شده با نانوکیتوزان حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت نسبت به قارچ های بدون پوشش وجود داشت. این فعالیت آنتی اکسیدانی بالاتر به دلیل وجود نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بود که ظرفیت آنتی اکسیدانی شناخته شده ای دارد. در طول مدت نگهداری، این دو گروه از قارچها کاهش سریعی در فعالیت آنتی اکسیدانی خود نشان دادند. این نتایج یک ارتباط مستقیم بین محتوای کل پلی فنل های توصیف شده در بالا و حضور نانوهیدروکسی آپاتیت در پوششها را نشان داد. قارچ های پوشش داده شده با نانوکیتوزان حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت محتوای پلی فنل بالاتری داشتند. بنابراین،

ترتیب ۶/۲، ۶ و ۶/۱ درصد بیش‌تر از شاهد بود. اما در پایان زمان نگه‌داری، فقط قارچ‌های تیمار شده با عصاره پوست سبز پسته دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتر (۴،۵٪) و قارچ‌های تیمار شده با اسیدهای آسکوربیک-سیتریک و متابی‌سولفیت سدیم ۱،۸ و ۱۰،۲ درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی کم‌تری نسبت به شاهد داشتند (Fattahifar et al., 2018).

این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پوشش‌های نانوکیتوزان حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت در قارچ‌ها از ترکیبات فنلی آن‌ها محافظت می‌کند و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی را حفظ می‌کند، ویژگی‌هایی که برای ارتقای سلامت مصرف‌کنندگان مرتبط است.

محتوای اسید آسکوربیک (ویتامین C)

همان‌طور که در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است، کاهش تدریجی محتوای اسید آسکوربیک در قارچ‌های بدون پوشش و پوشش داده شده در طول ذخیره‌سازی مشاهده شد. با این وجود، استفاده از



شکل ۵- ارزیابی پوشش‌دهی با نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر محتوای اسید اسکوربیک نمونه‌های قارچ دکمه‌ای

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Fig. 5. Evaluation of coating with nanochitosan and nanohydroxyapatite on ascorbic acid content of button mushroom samples

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

بهرتر حفظ کند و پیری قارچ را به تأخیر بیندازد (Khalig et al., 2015). به دلیل اثرات محافظتی فنلیک‌های آنتی‌اکسیدانی در این پوشش‌ها، افزودن نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت ممکن است فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتری این پوشش‌ها را بهبود بخشد. نتایج مطالعه‌ای بر روی افزایش ماندگاری قارچ دکمه‌ای با تیمار ارگو تیونین نشان داد که، محتوای اسید اسکوربیک در قارچ‌های شاهد در ۹ روز اولیه کاهش نشان داد و سپس در سطح پایدار نگه داشت.

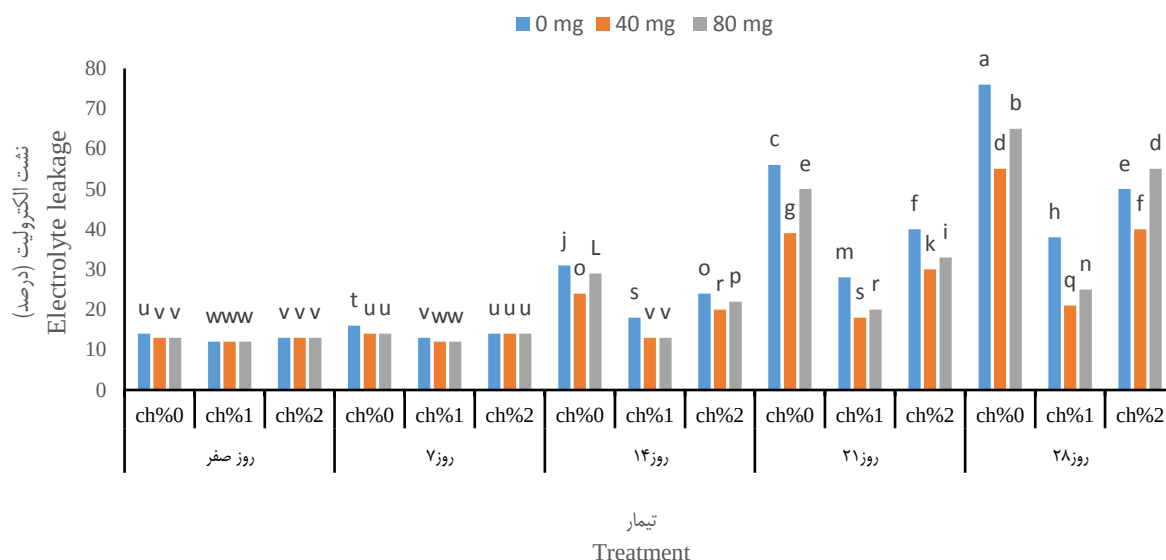
اسید اسکوربیک، محلول در آب و یک آنتی‌اکسیدان قوی است که آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن در میوه‌ها و سبزیجات را کاهش می‌دهد. میوه‌ها و سبزیجات منبع طبیعی اسید اسکوربیک هستند و در طول رسیدن از بین می‌روند (Nasiri et al., 2017). از آنجایی که از دست دادن اسید اسکوربیک می‌تواند به میزان زیادی با حضور O_2 بهبود یابد، پوشش‌دهی می‌تواند انتشار اکسیژن را کاهش داده و در نتیجه فرآیند رسیدن را کاهش دهد و در نتیجه محتوای اسید اسکوربیک را

ذخیره‌سازی مشاهده شد. با این وجود، استفاده از پوشش‌های نانوهیدروکسی آپاتیت به تنهایی یا همراه با نانوکیتوزان منجر به کاهش نشت الکترولیت در مقایسه با گروه کنترل (بدون پوشش) شد. بیش‌ترین میزان نشت الکترولیت در تیمار گروه کنترل روز ۲۸ نگهداری با میزان (۰/۷۶) بود که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها در طی روزهای نگهداری داشت. به‌طور خاص، در تمام روزهای نگهداری، پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی‌گرم کم‌ترین میزان نشت الکترولیت را نشان داد و تا روز ۷ نگهداری روند ثابت و از روز ۱۴ تا ۲۸ نگهداری روند افزایشی داشت. در مقابل، نمونه کنترل بیش‌ترین نشت الکترولیت را در طی دوره ذخیره‌سازی نشان داد که تأثیر قابل توجهی از تیمار ترکیبی نانوکیتوزان با غلظت یک درصد و نانوهیدروکسی آپاتیت را برجسته می‌کند.

تیمار EGT به‌طور قابل توجهی محتوای اسید اسکوربیک را ارتقا داد و ۳۴/۸ درصد بیش‌تر از گروه‌های کنترل در روز ۱۷ نشان داد (Qian *et al.*, 2021). طی مطالعه‌ای بر روی ماندگاری قارچ دکمه‌ای تغییرات در محتوای اسید اسکوربیک (AA) نمونه‌ها در طول نگهداری ۱۶ روزه نشان داد که اسید اسکوربیک در قارچ‌های تیمار شده و تیمار نشده با افزایش مدت نگهداری به تدریج کاهش یافت. TGZEO10 به‌طور قابل توجهی از دست دادن اسید اسکوربیک را در مقایسه با نمونه شاهد پس از ۱۶ روز نگهداری مهار کرد. بنابراین، پوشش TGZEO می‌تواند از دست دادن ویتامین C جلوگیری کند (Nasiri *et al.*, 2017).

نشت الکترولیت

مطابق با نمودار شکل ۶ نشان داده شده است، افزایش تدریجی نشت الکترولیت در قارچ‌های بدون پوشش و پوشش داده شده در طول



شکل ۶- ارزیابی پوشش‌دهی با نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر محتوای نشت الکترولیت نمونه‌های قارچ دکمه‌ای

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Fig. 6. Evaluation of coating with nanochitosan and nanohydroxyapatite on the electrolyte leakage content of button mushroom samples

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

دیگر نشان دادند، که می‌تواند به فعالیت آنتی‌اکسیدانی نانوکیتوزان و فعالیت ضدباکتری نانوهیدروکسی آپاتیت نسبت داده شود.

نتایج آزمایش حاضر با نتایج لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2019) که نرخ نشت الکترولیت قارچ‌ها در تمام گروه‌ها در آن با مدت زمان نگهداری افزایش یافت، مطابقت داشت. در مطالعه‌ای که بر روی تأثیر فیلم‌های نانو بر ماندگاری قارچ‌های دکمه‌ای سفید انجام شد نشان داده شد که، پایداری نفوذپذیری غشای سلولی با استفاده از درصد نشت نسبی الکترولیت با مدت زمان نگهداری افزایش می‌یابد و بین نمونه

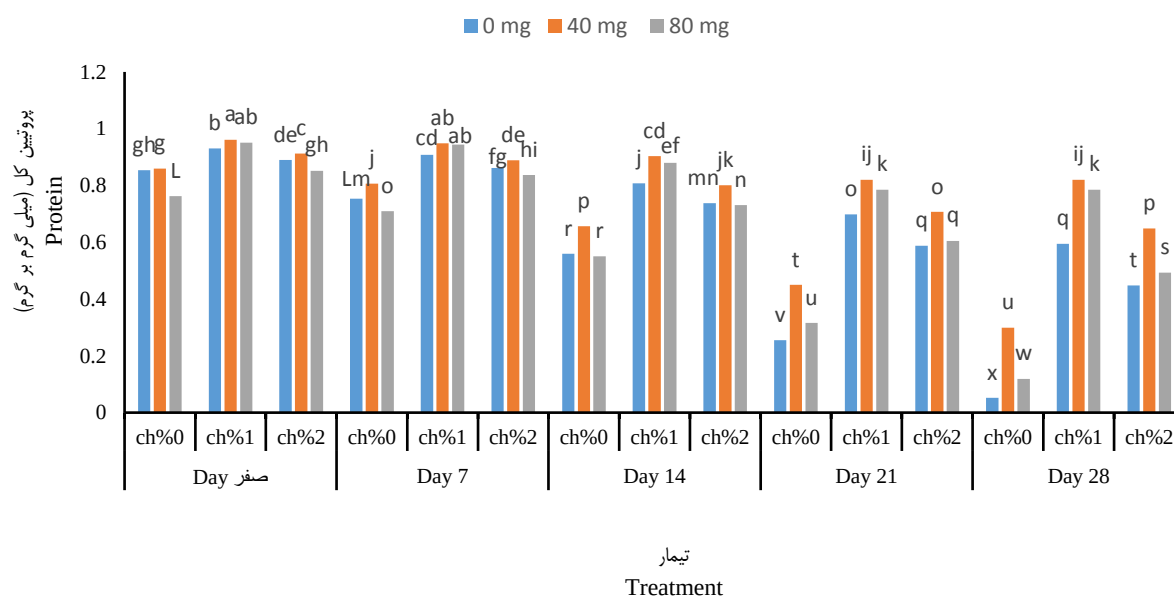
نفوذپذیری غشای قارچ اغلب با نرخ نشت الکترولیت قارچ منعکس می‌شود (Rokayya *et al.*, 2021). نرخ نشت الکترولیت قارچ‌ها در تیمارهای بدون پوشش و پوشش‌دهی شده با مدت زمان نگهداری افزایش یافت که نشان‌دهنده کاهش یکپارچگی غشاء است. علاوه بر این، قارچ‌های دارای پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی‌گرم، نرخ نشت الکترولیت به‌طور قابل توجهی کم‌تری نسبت به قارچ‌های پوشش‌دهی شده با تیمارهای

های نانوهیدروکسی آپاتیت به تنهایی یا همراه با نانوکیتوزان در روز ۲۱ و ۲۸ نگهداری منجر به افزایش پروتئین کل در مقایسه با گروه کنترل (بدون پوشش) شد. بیشترین میزان پروتئین کل در تیمار نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم روز صفر نگهداری با میزان (۰/۹۶۱) بود که تفاوت معنی داری با سایر تیمارها بجز پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۸۰ میلی گرم در روز صفر و ۷ نگهداری و پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم روز ۷ نگهداری داشت. به طور خاص، در روزهای نگهداری صفر، ۷ و ۱۴، پوشش نانوهیدروکسی آپاتیت ۸۰ میلی گرم و در روز ۲۱ و ۲۸ نگهداری گروه کنترل بدون پوشش کمترین پروتئین کل را نشان داد. که کمترین تیمار روزهای نگهداری تفاوت معنی داری را با هم نشان دادند. در مقابل، نمونه تیمار شده با پوشش نانوکیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی گرم بیشترین پروتئین کل را نشان داد که تأثیر قابل توجهی از تیمار ترکیبی نانوکیتوزان با غلظت یک درصد و نانوهیدروکسی آپاتیت را برجسته می کند.

های قارچ تیمار شده و تیمار نشده تفاوت معنی داری وجود داشت. نمونه های کیتوزان/نانو سیلیس (۲۴/۴۴٪) کمترین مقدار نشت الکترولیت را ثبت کردند زیرا غلظت گاز اکسیژن کم می تواند سرعت تنفس، کاهش وزن و باز شدن درپوش را کاهش دهد. قارچ های تیمار نشده بالاترین میزان نشت الکترولیت (۳۴/۰۱ درصد) را نشان دادند (Rokayya et al., 2021). در مطالعه ای بر روی افزایش ماندگاری قارچ دکمه ای با تیمار ارگوتیونین نشان داده شد که، نرخ نشت الکترولیت با افزایش زمان نگهداری در هر دو گروه افزایش یافت و نرخ نشت الکترولیت کمتر در قارچ های تیمار شده با EGT مشاهده شد. نرخ نشت الکترولیت قارچ های تیمار شده با EGT 10.93 درصد کمتر از شاهد در روز ۱۷ بود (Qian et al., 2021).

پروتئین کل

همان طور که در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش تدریجی محتوای پروتئین کل در قارچ های بدون پوشش و پوشش داده شده در طول ذخیره سازی مشاهده شد. باین وجود، استفاده از پوشش



شکل ۷- ارزیابی پوشش دهی با نانوکیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر محتوای پروتئین کل نمونه های قارچ دکمه ای

حروف متفاوت بالای ستون ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Fig. 7. Evaluation of coating with nanochitosan and nanohydroxyapatite on the total protein content of button mushroom samples

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$)

بتواند سبب کاهش این روند شود پیری را به تأخیر می اندازد. (Hamzeh-kalkenari et al., 2015).

مقایسه نتایج نشان می دهد که با گذشت زمان در مقایسه با نمونه کنترل، پوشش ها تأثیر معناداری روی افزایش میزان پروتئین داشته اند. پروتئولیز و تخریب پروتئین سبب پیری بافت می شوند. هر عاملی که

محتوای اسید آسکوربیک، نشت الکترولیت و پروتئین کل قارچ‌ها در روزهای صفر، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ نگهداری و افزایش زمان ماندگاری قارچ دکمه‌ای در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان بود. به این منظور از پوشش نانوذرات کیتوزان (صفر، ۱ درصد، ۲ درصد)، نانوهیدروکسی آپاتیت (صفر، ۴۰، ۸۰ میلی‌گرم)، ترکیب نانوذرات کیتوزان با نانوهیدروکسی آپاتیت در غلظت‌های ذکر شده استفاده گردید. به‌طور کلی نتایج نشان داد که پوشش نانوذرات کیتوزان یک درصد حاوی نانوهیدروکسی آپاتیت ۴۰ میلی‌گرم بیش‌ترین تأثیر را بر فنل کل، فلاونوئید، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، محتوای اسید آسکوربیک و پروتئین کل نسبت به نمونه کنترل داشت و باعث کاهش، نشت الکترولیت نسبت به نمونه کنترل بدون پوشش در طی روزهای نگهداری شده است و می‌تواند ماندگاری و بازارپسندی پس از برداشت قارچ دکمه‌ای را تا روز ۱۴ افزایش دهد. بنابر این استفاده از این پوشش برای افزایش عمر انبارمانی قارچ دکمه‌ای توصیه می‌شود.

میزان مشارکت نویسندگان

ضیائی: تحقیق و بررسی، جمع‌آوری داده‌ها، نوشتن پیش‌نویس اصلی، تأمین مالی، **راجی:** مدیریت پروژه، نظارت، بررسی و ویرایش، تأمین مالی، **احتشام‌نیا:** مدیریت پروژه، نظارت، بررسی و ویرایش، **سهرابی:** نظارت، بررسی و ویرایش، مدیریت داده‌ها.

منابع تأمین مالی

این کار به شماره: ۳۷۱۸۲۳۴۹، تاریخ: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵، در سامانه گلستان سایت دانشگاه لرستان ثبت شد و با کمک مالی از طرف دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران انجام شد.

در پژوهشی تحت عنوان بررسی اثر بازدارندگی عصاره آبی پوسته سبز پسته بر فعالیت تیروزیناز قارچ و کاربرد آن به‌عنوان یک عامل ضدقهنبه ای شدن پس از برداشت قارچ دکمه‌ای نشان داده شده است که، محتوای پروتئین قارچ تیمار شده با عصاره پوست سبز پسته و متابی سولفیت سدیم به‌طور قابل توجهی با قارچ‌های شاهد متفاوت است، اما هیچ تفاوت معنی‌داری بین قارچ تیمار شده با اسید اسکورتیک و کنترل در روز ۱ و ۱۰ ذخیره‌سازی وجود ندارد. تفاوت قابل توجهی بین نمونه‌های تیمار شده و شاهد یافت نشد و از طرف دیگر، این تیمارها تأثیر منفی بر محتوای پروتئین قارچ نداشتند (Fattahifar et al., 2018).

در پژوهشی که بر روی اثر پوشش اسانس خوش‌رایزه و فیلم‌های بسته‌بندی بر ویژگی‌های کمی و کیفی پس از برداشت قارچ دکمه‌ای صورت گرفت مشاهده شد که بالاترین میزان پروتئین را ترکیب تیماری کاربرد فیلم پلی‌اتیلن ۴۰ میکرومتر و عدم کاربرد اسانس نشان داد که معادل ۱/۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه بود. استفاده از اسانس خوش‌رایزه و کاربرد فیلم‌های بسته‌بندی توانست میزان پروتئین را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری حفظ کند. اسانس در طی مراحل نمونه‌برداری سبب افزایش میزان پروتئین کل گردید. در طی زمان، کاربرد پلی‌اتیلن ۴۰ و نانو کامپوزیت رس به همراه کاربرد اسانس توانست میزان پروتئین را در سطح بالا نگه دارد (Hamzeh-kalkenari et al., 2015).

نتیجه‌گیری

به‌دلیل فسادپذیری بالای قارچ دکمه‌ای، نگهداری از آن اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از روش‌های نگهداری قارچ دکمه‌ای پوشش‌دهی به وسیله پوشش‌های طبیعی می‌باشد. هدف از این مطالعه ارزیابی اثر پوشش طبیعی مبتنی بر نانوذرات کیتوزان و نانوهیدروکسی آپاتیت بر میزان اندازه‌گیری صفات فنل کل، فلاونوئید، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی،

References

1. Abbasifar, A., Shahrabadi, F., & ValizadehKaji, B. (2020). Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. *Journal Plant Nutrient*, 43(8), 1104–1118. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1724305>
2. Bakhshi, D., & Arakawa, O. (2006). Effect of UV-B irradiation on phenolic compounds accumulation and their antioxidant activity in 'Jonathan' apple. *Food, Agriculture and Environment*, 4(1), 75-79. <https://www.researchgate.net/publication/289689317>
3. Benzie, IF., & Strain, J.J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. *Anal Biochemistry*, 239(1), 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
4. Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. <https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999>
5. Camargo, J., & Dunoyer, A. (2016). The effect of storage temperature and time on total phenolics and enzymatic activity of sapodilla (*Achras sapota* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7955–7963. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59140>

6. Chang, H.L., Chen, Y.C., & Tan, F.J. (2011). Antioxidative properties of a chitosan–glucose maillard reaction product and its effect on pork qualities during refrigerated storage. *Food Chemistry*, 124(2), 589–595. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.080>
7. Dokhanieh, A.Y., & Aghdam, M.S. (2016). Postharvest browning alleviation of *Agaricus bisporus* using salicylic acid treatment. *Science Horticulture*, 207(2), 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.05.025>
8. Eswaran, M., Swamiappan, S., Chokkiah, B., Dhanusuraman, R., Bharathkumar, S., & Ponnusamy, V.K. (2021). A green and economical approach to derive nanostructured hydroxyapatite from Garra mullya fish scale waste for biocompatible energy storage applications. *Materials Letters*, 302(20), 1.130341. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130341>
9. Fattahifar, E., Barzegar, M., Ahmadi Gavlighi, H., & Sahari, M.A. (2018). Evaluation of the inhibitory effect of pistachio (*Pistacia vera* L.) green hull aqueous extract on mushroom tyrosinase activity and its application as a button mushroom postharvest anti-browning agent. *Postharvest Biology and Technology*, 145(1), 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.07.005>
10. Genady, E.A., Qaid, E.A., & Fahmy, A.H. (2016). Copper sulfate nanoparticules in vitro applications on *Verbena bipinnatifida* Nutt. stimulating growth and total phenolic content increasments. *International Journal Pharmaceutically Research Allied Science*, 5(1), 196–202.
11. Gharejelo, A., Ganjeh, M., & Ghaderi, S. (2020). Evaluation of extending the shelf life of button mushroom (*Agaricus Bisporous*) using chitosan and Ferulago angulate essential oil. *Food Science*, 21(154), 1-88. <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-73195-en.html>
12. Hamzeh-kalkenari, S., Bodaghi, H., & Ghasimi Hagh, Z. (2020). Improving postharvest quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*) using polyethylene-clay nanocomposite packing and *Echinophora cinerea* essential oil coating. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 17(2), 315-328.
13. Homaei, M.B., & Ehsanpour, A.A. (2016). Silver nanoparticles and silver ions: oxidative stress responses and toxicity in potato (*Solanum tuberosum* L.) grown in vitro, Horticult. *Environment Biotechnology*, 57(6), 544–553. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0083-z>
14. Huang, R., Mao, P., Xiong, L., Qin, G., Zhou, J., Zhang, J., Li, Z., & Wu, J. (2023). Negatively charged nano-hydroxyapatite can be used as a phosphorus fertilizer to increase the efficacy of wollastonite for soil cadmium immobilization. *Journal of Hazardous Materials*, 5(443), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130291>
15. Hu Hu, Y., Zhou, Y., Liu, J.A., Wang, Q., Cheng Lin, J., & Shi, Y. (2020). Effect of 4-methoxycinnamic acid on the postharvest browning of mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Journal Food Process Preservation*, 44(1), 1-10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14735>
16. Khaliq, G.H., Mohamed, M.T.M., Ali, A., Ding, P., & Ghazalic, H.M. (2015). Effect of gum Arabic coating combined with calcium chloride on physicochemical and qualitative properties of mango (*Mangifera indica* L.) fruit during low temperature storage. *Scientia Horticulturae*, 190(6), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.020>
17. Khosravi, S., Haghighi, M., & Mehnatkesh, M. (2022). The effect of vitamin C and B treatments on button mushroom yield and postharvest life. *Journal of Horticultural Science, Research Article*, 36(1), 43-56.
18. Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2019). Application of chitosan nanoparticle scontaining *Cuminum cyminum* oil asa deli very system for shelfl ifeextension of *Agaricus bisporus*. *LWT-Food Science and Technology*, 106(4), 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.062>
19. Karimirad, R., Behnamian, M., & Dezhsetan, S. (2020). Bitter orange oil incorporated into chitosan nanoparticles: Preparation, characterization and their potential application on antioxidant and antimicrobial characteristics of white button mushroom. *Food Hydrocolloids*, 100(1), 105387. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105387>
20. Landa, P., Müller, K., Přerostová, S., Petrová, S., Motřková, K., Vaněk, T., & Soudek, P. (2024). Effect of nano-hydroxyapatite and phosphate on thorium toxicity – *Arabidopsis transcriptomic* study. *Environmental and Experimental Botany*, 217(1), 105573. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105573>
21. Liu, J., Liu, S., Zhang, X., Kan, J., & Jin., C. (2019). Effect of gallic acid grafted chitosan film packaging on the postharvest quality of white button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Postharvest Biology and Technology*, 147(1), 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.004>
22. Louis, E., Villalobos-Carvajal, R., Reyes-Parra, J., Jara-Quijada, E., Ruiz, C., Andrades, P., Gacitúa, J., & Beldarraín-Iznaga, T. (2021). Preservation of mushrooms (*Agaricus bisporus*) by an alginate-based-coating containing a cinnamaldehyde essential oil nanoemulsion. *Food Packaging and Shelf Life*, 28(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100662>
23. Nasiri, M., Barzegar, M., Sahari, M.A., & Niakousari, M. (2017). Tragacanth gum containing *Zataria multiflora* Boiss essential oil as a natural preservative for storage of button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Food Hydrocolloids*, 72(3), 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.045>

24. Paula, C., Carole, F., Shiv, S., Stephane, S., & Monique, L. (2021). Influence of cellulose nanocrystals gellan gum-based coating on color and respiration rate of *Agaricus bisporus* mushrooms. *Journal of Food Science*, 86(2), 420-425. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15580>
25. Pabast, M., Shariatifar, N., Beikzadeh, S., & Jahed, G. (2018). Effects of chitosan coatings incorporating with free or nanoencapsulated *Satureja* plant essential oil on quality characteristics of lamb meat. *Food Control*, 91(2), 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.03.047>
26. Priyam, A., Yadav, N., Reddy, P.M., Afonso, L.O.B., Schultz, A.G., & Singh, P.P. (2022). Fertilizing benefits of biogenic phosphorous nanonutrients on *Solanum lycopersicum* in soils with variable pH. *Heliyon*, 8(1), e09144. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09144>
27. Qian, X., Hou, Q., Liu, J., Huang, Q., Jin, Z., Zhou, Q., Jiang, T., & Zheng, X. (2021). Inhibition of browning and shelf life extension of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by ergothioneine treatment. *Scientia Horticulturae*, 288(2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110385>
28. Rokayya, S., Ebtihal, K., Abeer, E., Nada, B., Murthy, C., Kambhampati, V., Abdullah, I., & Mahmoud, H. (2021). Investigating the nano-films effect on physical, mechanical properties, chemical changes, and microbial load contamination of white button mushrooms during storage. *Coatings*, 11(1), 2-12. <https://doi.org/10.3390/coatings11010044>
29. Shao, P., Yu, J., Chen, H., & Gao, H. (2021). Development of microcapsule bioactive paper loaded with cinnamon essential oil to improve the quality of edible fungi. *Food Packaging and Shelf Life*, 27(2), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100617>
30. Sharifianjazi, F., Esmailkhanian, A., Moradi, M., Pakseresht, A., Shahedi Asl, M., Won Jang, H., & Varma, R.S. (2021). Biocompatibility and mechanical properties of pigeon bone waste extracted natural nano-hydroxyapatite for bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering: B*, 264(1), 114950. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114950>
31. Sairam, R.K., Dharmar, K., Chinnusamy, V., & Meena, R. (2002). Waterlogging induced increase in sugar mobilization, fermentation, and related gene expression in the roots of mungbean (*Vigna radiata*). *Journal Plant Physiology*, 166(1), 602-616. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.09.005>
32. Victor Aberea, D., Sammy A. Ojob, Oyatogunc, G.M., Belen Paredes-Epinosaa, M., Carmalita Dharsika Niluxsshuna, M., & Hakamid, A. (2022). Mechanical and morphological characterization of nano-hydroxyapatite (nHA) for bone regeneration: A mini review. *Biomedical Engineering Advances*, 4(1), 100056. <https://doi.org/10.1016/j.bea.2022.100056>
33. Zhang, L., Liu, Z., Wang, X., Dong, S., Sun, Y., & Zhao, Z. (2019). The properties of chitosan/zein blend film and effect of film on quality of mushroom (*Agaricus bisporus*). *Journal Postharvest Biology and Technology*, 155(1), 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.05.013>

Evaluation of Cold Plasma on Physicochemical Properties of Rose Water

Z. Rahmani¹, P. Ahmadi¹, R. Sharafati Chaleshtori^{2*}

1- Department of Laser and Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Research Center for Biochemistry and Nutrition in Metabolic Diseases, Institute for Basic Sciences, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, Iran

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

Received: 29.10.2024

Revised: 25.12.2024

Accepted: 29.12.2024

Available Online: 23.04.2025

How to cite this article:

Rahmani, Z., Ahmadi, P., & Sharafati Chaleshtori, R. (2025). Evaluation of cold plasma on physicochemical properties of rose water. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 21(2), 253-260. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.90520.1381>

Introduction

Rose water, as one of the distillation products prepared from the rose, is widely used in the food industry and traditional medicine in Iran. Therefore, maintaining the microbial and chemical quality of this product is important. Non-thermal processing technologies have attracted wide attention from the food industry. These alternative technologies can increase shelf life and reduce the negative impact on nutrients and natural flavor of foods. Cold plasma technology has been used as a replacement for new generation methods and as a non-thermal technology in the food processing. This research was designed to investigate the effect of atmospheric pressure cold plasma on the physicochemical properties and microbial load of rose water.

Materials and Methods

In this experimental research, a dielectric barrier discharge system was designed. This system was used by producing plasma microbubbles to have an effect on rose water samples with an essential oil content of 28 mg/100 ml. Rose water samples were plasma-treated at 12 and 15 kV for 4, 6 and 8 minutes. The essential oil amount, acid value, iodine number, pH, density, oxidation number, ester number and the total bacterial count were then performed on the samples.

Results and Discussion

Plasma showed no significant change in the density of rose water in all treatments. Changes in acidity, pH, ester number and iodide number were observed with increasing time and plasma voltage. These changes were significant between the treatment groups and the control group ($P < 0.05$), but not significant within the treatment groups ($P > 0.05$). The greatest decrease in the amount of essential oil was 10.81 and 8.49 mg per 100 ml of rose water, respectively, related to the treatment with voltage of 15 kV at 6 and 8 minutes. Generation/destruction paths of the radicals and their reactions demonstrate the complicated interplay between the plasma induced species (electrons, photons, radicals, etc.) and the dissolved compounds in the liquid species, which ultimately affect the ion concentration (pH and σ) and the oxidizer concentration (redox) in the liquid. However, a decrease in pH is accompanied by an increase in Eh and σ , with a parallel increase in ROS. In addition, plasma in 8 minutes at voltages of 12 and 15 kV caused a decrease of about 3 log in the total number of mesophilic bacteria compared to the control group. Plasma significantly reduced the total number of mesophilic bacteria in rose water. The bactericidal activity of plasma might occur through several mechanisms. Impact on permeabilisation of the cell membrane or wall, leading to leakage of cellular components, containing potassium, nucleic acid, and proteins. In addition, it causes critical damage of intracellular proteins from oxidative or nitrosative species and direct chemical DNA damage. Plasma-generated reactive species and specially H₂O₂ were found to be the causative agent of cell death. H₂O₂ is a well-known antibacterial agent that damages iron-sulphur and mononuclear iron enzymes in bacterial cells.



©2025 The author(s). 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.2024.90520.1381>

Conclusion

The application of plasma at high voltage and longtime caused a sharp decrease in the amount of essential oil, increased acidity and decreased pH of rose water. It is suggested that future studies be conducted on the type of gas used to produce plasma, the size of the reactor used, and the identification of changes in essential oil compounds using gas chromatography with mass spectrometry.

Funding Sources

This research did not receive any specific funding from funding organizations in the public, commercial or non-profit sectors.

Acknowledgement

The present research is derived from the master's thesis in physics, and therefore the support of the research deputy of Kashan University and Kashan University of Medical Sciences is acknowledged and thanked.

Keywords: Cold plasma, Essential oil, Rose water, Total count bacteria

مقاله کوتاه

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۲۶۰-۲۵۳

بررسی اثر پلاسمای سرد بر روی خواص فیزیکی شیمیایی و میکروبی گلاب

زینب رحمانی^۱ - پاشا احمدی^۱ - رضا شرافتی چالشتی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

چکیده

گلاب به عنوان یکی از فرآورده تقطیری تهیه شده از گل محمدی، در صنعت غذا و طب سنتی مصرف زیادی در ایران دارد. بنابراین حفظ کیفیت میکروبی و شیمیایی این فرآورده مهم می باشد. این پژوهش به جهت بررسی اثر پلاسمای سرد فشار اتمسفری بر خواص فیزیکی شیمیایی و بار میکروبی گلاب طراحی گردید. در این پژوهش تجربی، ابتدا یک سامانه تخلیه سد دی الکتریک طراحی گردید. این سامانه با تولید میکرو حباب های پلاسمایی برای اثردهی بر روی نمونه های گلاب با میزان اسانس ۲۸ میلی گرم بر ۱۰۰ میلی لیتر، به کار گرفته شد. نمونه های گلاب در ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت به مدت زمان های ۴، ۶ و ۸ دقیقه پلاسمادهی شدند. سپس آزمون های میزان اسانس، عدد اسیدی، عدد یدی، pH، چگالی، عدد اکسیداسیون، عدد استری و شمارش کلی میکروارگانیسم ها برای نمونه ها انجام گرفت. پلاسما در تمام تیمارها تغییر معناداری بر روی چگالی گلاب نشان نداد. با افزایش زمان و ولتاژ پلاسمادهی تغییرات در میزان اسیدیته، pH، عدد استری و یدی مشاهده شد. این تغییرات با گروه کنترل معنادار بودند ولی بین تیمارها معنی دار نمی باشند ($P > 0.05$). بیشترین کاهش در میزان اسانس به ترتیب ۱۰/۸۱ و ۸/۴۹ میلی گرم در ۱۰۰ میلی لیتر گلاب مربوط به تیمارهای با ولتاژ ۱۵ کیلوولت و زمان های ۶ و ۸ دقیقه بودند. همچنین پلاسما در ۸ دقیقه در ولتاژهای ۱۲ و ۱۵ کیلوولت سبب کاهش حدود ۳ لگاریتمی تعداد کلی باکتری های مزوفیل نسبت به گروه کنترل شد. پلاسما به طور معناداری سبب کاهش تعداد کلی باکتری های مزوفیل در گلاب شد. با این وجود استفاده از پلاسما در ولتاژ بالا و زمان زیاد سبب کاهش شدید در میزان اسانس، افزایش اسیدیته و کاهش pH گلاب شد.

واژه های کلیدی: اسانس، پلاسمای سرد، شمارش کلی میکروبی، گلاب

مقدمه

گلاب فرآورده ای است که از تقطیر آب با گلبرگ های تازه گل محمدی به دست می آید. گلاب و اسانس آن از جمله ارزشمندترین مواد اولیه صنایع غذایی، عطر، آرایشی و دارویی هستند. گلاب در مراسم های مذهبی در ایران استفاده می شود. در صنعت غذا، گلاب و اسانس آن به دلیل خواص معطر و فرار خود در تولید چای، مربا، بیسکویت، کیک، شیرینی و نوشیدنی استفاده می شوند (Koksall et al., 2015).

کیفیت شیمیایی و میکروبی ماده غذایی خام یا فرآوری نشده، شرایط بهداشتی حمل و نقل مواد خام و در حال فرآوری مانند گلاب پاستوریزه

نشده، کفایت بسته بندی، نحوه جابجایی و شرایط نگهداری محصول نهایی، همگی در ایجاد تغییرات شیمیایی و میکروبی محصول نهایی تأثیر می گذارند. وجود میکروارگانیسم های مختلف در گلاب و عرقیات گیاهی، ارزیابی وضعیت بهداشتی این محصولات را مهم می کند. عوامل مختلفی می توانند بر تعداد و نوع میکروارگانیسم های موجود در گلاب تأثیر بگذارند. رشد میکروبی و تغییرات نامطلوب شیمیایی به ویژه ترشیدگی و کاهش میزان اسانس گلاب به عنوان عوامل شایع در کاهش کیفیت و نهایتاً عدم انطباق با استانداردهای مربوطه می شود (Rahmani, 2023).

در دو دهه گذشته، فناوری های فرآوری غیرحرارتی توجه گسترده ای از سوی صنعت غذا که به دنبال فرایندهای ملایم و مؤثر

۱- گروه لیزر و فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- مرکز تحقیقات بیوشیمی و تغذیه در بیماری های متابولیک، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، کاشان، ایران

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

دی الکتریک‌ها را برعهده دارد استفاده شد. همچنین در قسمت پایینی آن از یک تفلون دارای راهی برای خروج گاز یونیزه شده و اثردهی مستقیم بر نمونه مورد نظر است استفاده شد. در این مجموعه الکتروود زمین همان نمونه تحت تیمار و هوا گاز مورد استفاده بود.

آماده‌سازی تیمارهای گلاب

جهت بررسی اثر پلاسما بر گلاب، ابتدا گلاب غیر پاستوریزه از یک واحد کارگاهی در کاشان در خرداد ماه ۱۴۰۳ با حداقل اسانس ۲۶ میلی گرم در ۱۰۰ میلی لیتر تهیه شد. گلاب تهیه شده از لحاظ پارامترهای شیمیایی با استاندارد ملی گلاب ۵۷۵۹ مطابقت داشت. قبل از تهیه تیمارها تمام تجهیزات مورد استفاده با استفاده از اتانول ۷۰٪ ضدعفونی شدند. همچنین هوای محیط آزمایش نیز با دستگاه تصفیه هوای ساخت شرکت پلاسما فناوران کویر تصفیه شد. جهت اثر پلاسما در گلاب یک لیتر از گلاب تهیه شده درون بشر دو لیتری استریل شده ریخته شد و راکتور ضدعفونی شده داخل گلاب قرار گرفت. گلاب‌ها تحت تأثیر پلاسما با دو ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در شیشه‌های درپوش‌دار استریل جهت انجام آزمون شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها و فیزیکوشیمیایی در دمای یخچالی نگهداری شدند.

آزمون‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی گلاب

آزمون‌های اسانس، عدد اسیدی، عدد یدی، pH، چگالی، عدد اکسیداسیون، عدد استری و شمارش کلی میکروارگانیسم‌های نمونه‌های گلاب طبق استاندارد ملی گلاب شماره ۵۷۵۹ تجدید نظر سوم انجام گرفت (ISIRI, 2022).

تحلیل آماری

تمام آزمون‌های شیمیایی و میکروبی در این مطالعه با سه بار تکرار انجام گرفت. نتایج بدست آمده به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند. آنالیز آماری جهت مقایسه میانگین داده‌های بین تیمارها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ و با آزمون ANOVA در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تأثیر پلاسما با ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه بر فاکتورهای فیزیکوشیمیایی گلاب غلیظ در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

است، جلب کرده است. این فناوری‌های جایگزین می‌توانند عملکرد و ماندگاری را افزایش داده و تأثیر منفی بر مواد مغذی و طعم طبیعی غذا را کاهش دهند (Huang et al., 2017; Sharafati Chaleshtori, 2015).

میدان پالس الکتریکی یک روش غیر حرارتی است که می‌تواند برای مواد غذایی مایع مانند آب میوه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. فراصوت یک روش غیر حرارتی دیگر است که به‌ویژه برای استخراج مواد فعال زیستی، امولسیون‌سازی، پختن و تلخی‌زدایی استفاده می‌شود. فناوری فوق بحرانی از سیالات فوق بحرانی استفاده می‌کند و برای استخراج مواد فعال زیستی از گیاهان کاربرد دارد. پرتودهی با اشعه گاما و ماورابنفش که برای نگهداری مواد غذایی به واسطه خاصیت از بین بردن میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شود ولی کاربرد کمتری در مواد غذایی مایع دارد (Jadhav et al., 2021).

فناوری پلاسمای سرد به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های نسل جدید و به‌عنوان یک فناوری غیرحرارتی در فرآیند فرآوری مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته است (Mir et al., 2020). در یک مطالعه مروری نشان دادند که پلاسمای سرد در صنعت نوشیدنی‌ها سبب غیر فعال شدن آنزیم‌ها می‌شود. بعلاوه تغییرات شدیدی در ویژگی‌های کیفی و تغذیه‌ای نوشیدنی‌ها در مواجهه با زمان‌های کم با پلاسمای سرد ایجاد نشده است (Waghmare, 2021). از سوی دیگر، اثرات پلاسمای سرد بر باکتری‌های گرم مثبت عمدتاً آسیب شدید داخل سلولی بدون نشت سلولی است (Eazhumalai et al., 2022). علی‌رغم مزیت‌های روش‌های غیر حرارتی، هنوز استفاده آنها در سطح آزمایشگاهی باقی مانده است (Jadhav et al., 2021).

بنابراین با توجه به اینکه یکی از ویژگی‌های کیفی گلاب میزان اسانس آن است و استفاده از روش‌هایی مانند پاستوریزاسیون جهت جلوگیری از رشد میکروب‌ها می‌تواند سبب کاهش درصد اسانس محصول نهایی شود (Baydar et al., 2013)، استفاده از روش‌های پاستوریزاسیون و یا استریلیزاسیون غیرحرارتی با کمترین اثر بر روی غلظت اسانس این نوع محصولات ضروری به نظر می‌رسد. لذا هدف از انجام این مطالعه بررسی اثر پلاسمای سرد فشار اتمسفری بر خواص فیزیکوشیمیایی و بار میکروبی گلاب بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات دستگاه پلاسمای سرد اتمسفری

به‌منظور ایجاد پلاسمای سرد یک راکتور تخلیه الکتریکی سد دی الکتریک طراحی گردید که از یک الکتروود میله‌ای از جنس فولاد که اطراف آن را یک دی الکتریک پوشش داده است. در قسمت بالای الکتروود، از تفلونی که دارای ورودی گاز است و عایق و آب‌بندی بالای

جدول ۱- تأثیر پلاسما با ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه بر فاکتورهای شیمیایی گلاب

Table 1- The effect of plasma at voltages of 12 and 15 kV for durations of 4, 6, and 8 minutes on the chemical factors of rose water

	رنج استاندارد	کنترل	تیمار ۱	تیمار ۲	تیمار ۳	تیمار ۴	تیمار ۵	تیمار ۶
	Standard range	Control	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3	Treatment 4	Treatment 5	Treatment 6
pH	3.6-8	4.27±0.03 ^a	4.15±0.04 ^b	4.26±0.04 ^a	4.19±0.06 ^b	4.19±0.04 ^b	3.96±0.02 ^c	4.14±0.03 ^b
عدد اسیدی	0.6-8	5.04±0.26 ^a	5.4±0.2 ^b	5.2±0.36 ^b	5.64±0.34 ^b	5.44±0.28 ^b	6±0.2 ^b	5.56±0.3 ^b
Acid number								
عدد استری	Min 0.8	2±0.1 ^a	1.6±0.08 ^b	1±0.06 ^c	1.2±0.09 ^c	1±0.1 ^c	1.2±0.1 ^c	0.8±0.1 ^c
Ester number								
عدد یدی	12-57	54.8±1.2 ^a	56±4 ^a	36±5 ^b	52±6 ^a	43.2±4 ^b	54±3 ^b	51.6±3 ^b
Iodine value								
عدد اکسیداسیون	120-230	154±5 ^a	156±6 ^a	158±4 ^a	154±4 ^a	153±6 ^a	154±4 ^a	158±4 ^a
Oxidation number								
میزان اسانس	12-32	28.35±0.5 ^a	22.16±0.6 ^b	19.89±0.25 ^c	21.09±0.4 ^b	17.54±0.5 ^d	20.01±0.6 ^e	19.86±0.4 ^e
Essential oil content								
چگالی در ۲۰°C	Max 1.005	1.0±0.0 ^a	1.0±0.0 ^a	1.0±0.0 ^a	1.0±0.0 ^a	0.999±0.0 ^a	0.999±0.0 ^a	0.999±0.0 ^a
Density at 20 °C								

تیمار ۱ (ولتاژ ۱۲ کیلوولت در زمان ۴ دقیقه)، تیمار ۲ (ولتاژ ۱۵ کیلوولت در زمان ۴ دقیقه)، تیمار ۳ (ولتاژ ۱۲ کیلوولت در زمان ۶ دقیقه)، تیمار ۴ (ولتاژ ۱۵ کیلوولت در زمان ۶ دقیقه)، تیمار ۵ (ولتاژ ۱۲ کیلوولت در زمان ۸ دقیقه)، تیمار ۶ (ولتاژ ۱۵ کیلوولت در زمان ۸ دقیقه). حروف کوچک انگلیسی در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنادار در سطح (p < 0.05) بین تیمارها می‌باشند.

Treatment 1 (Voltage 12 kV for 4 minutes), Treatment 2 (Voltage 15 kV for 4 minutes), Treatment 3 (Voltage 12 kV for 6 minutes), Treatment 4 (Voltage 15 kV for 6 minutes), Treatment 5 (Voltage 12 kV for 8 minutes), Treatment 6 (Voltage 15 kV for 8 minutes). The lowercase letters in each row indicate significant differences at the level of (p < 0.05) between the treatments.

پلاسمای سرد می‌تواند سبب کاهش ۰/۹ تا ۱/۲ درصد اسانس شود. که این نتایج همسو با مطالعه حاضر بود. علاوه بر این تغییرات ایجاد شده در ترکیبات اسانس نمونه‌های تیمار شده با پلاسما حاکی از مقدار بیشتر لیمونن، spathulenol، globulol و مقادیر کمتر سیترال نسبت به گروه کنترل بود (Ebadi et al., 2019).

در بررسی دیگری اثر پلاسمای سرد بر کیفیت گیاه زوفا در زمان نگهداری ۶ ماهه انجام شد. محققان نشان دادند پلاسما سبب کاهش معنادار محتوی اسانس و همچنین ترکیبات *cis*- β -pinene، *trans*-pinocamphone و *pinocamphone* نسبت به گروه کنترل شده بود. با این وجود پلاسما تغییری در رنگ محصول نهایی ایجاد نکرده بود (Jangi et al., 2021).

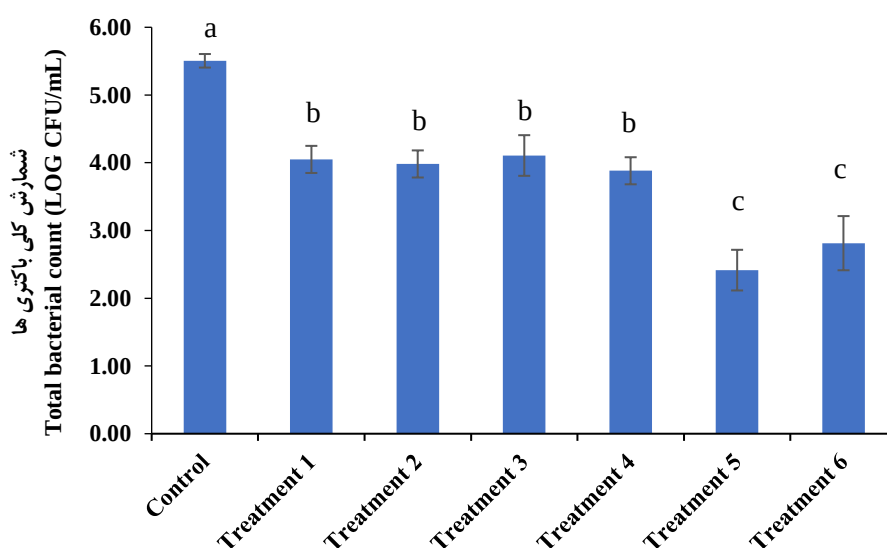
چن و همکاران (Chen et al., 2024) در مطالعه‌ای نشان دادند که در شرایط بهینه (۶۰ کیلوولت ۶۰ ثانیه)، تیمار با پلاسمای سرد اتمسفری تأثیر کمی بر مشخصات فیزیکی و شیمیایی، ترکیب تغذیه‌ای و حسی شیر نارگیل داشت. تیمار با پلاسمای سرد اتمسفری به‌طور واضح هیدرولیز اسیدهای هیدروکسیل از تری‌گلیسیریدها را برای تشکیل لاکتون‌ها ترویج کرد، که نقش مهمی در تشکیل طعم کلی شیر نارگیل ایفا می‌کرد (Chen et al., 2024).

بر اساس نتایج، میزان pH نمونه‌های گلاب تیمار شده با پلاسمای ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در همه زمان‌ها به‌طور معناداری کاهش نشان دادند. با این وجود تمامی تیمارها در محدوده استاندارد قرار داشته‌اند. نتایج آزمون اسیدیته نیز حاکی از افزایش اسیدیته گلاب به واسطه اثر پلاسما در تمامی زمان‌ها و ولتاژها نسبت به گروه کنترل می‌باشد ولی این تفاوت‌های بین تیمارها معنی‌دار نمی‌باشد (P > 0.05). نتایج آزمون‌های استری و یدی نیز نشان داد که پلاسما با ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در همه زمان‌ها سبب کاهش معنادار آنها نسبت به گروه کنترل شده است. با افزایش ولتاژ زمان اثر کاهش عدد استری و یدی مشهود است ولی این تفاوت‌های بین تیمارها معنی‌دار نمی‌باشد (P > 0.05). مهم‌ترین شاخصی که تغییر اساسی در آن اتفاق افتاده است میزان محتوی اسانس است که با افزایش ولتاژ و همچنین زمان، کاهش چشم‌گیری را نشان داده است (P < 0.05). با این وجود تمامی نمونه‌ها از نظر مقدار اسانس با استاندارد ملی ایران (۱۲-۳۲ میلی گرم در ۱۰۰ میلی لیتر) مطابقت دارد. همچنین نتایج تغییرات چگالی گلاب به واسطه اثر پلاسما، هیچگونه تغییر محسوسی نشان نداد.

در مطالعه تقی عبادی و همکاران (Ebadi et al., 2019)، اثر پلاسمای سرد با فشار پایین بر محتوای اسانس برگ به لیمو و ترکیبات آن بررسی شد. نتایج آنها نشان داد استفاده از زمان‌های طولانی

نتایج شمارش کلی باکتری‌ها برای نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده با پلاسما در زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه و با ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت، در شکل ۱ قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که پلاسما با ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه به‌طور معناداری سبب کاهش تعداد کلی باکتری‌های مزوفیل در گلاب شدند. همچنین بیشترین اثر کاهش باکتری‌ها در گلاب مربوط به تیمارهای ۵ و ۶ بود ($P < 0.05$).

پورتو و همکاران (Porto et al., 2023)، آب آناناس را جهت کاهش ترکیبات سولفور و بهبود کیفیت تازگی آن با استفاده از پلاسما تحت تیمار قرار دادند. پلاسما سبب القاء دمتیلاسیون استرهای آب آناناس و تبدیل متیل استرها به اتیل استرها شدند. با این حال تیواسترها نسبت به پلاسما مقاوم بودند. کاهش متیل هگزانات در نمونه‌های تیمار سبب کاهش طعم تند آب میوه شد. نتایج آنها نشان داد افزایش زمان پلاسمادهی می‌تواند سبب کاهش کیفیت و تازگی آب آناناس شود (Porto et al., 2023).



شکل ۱- تأثیر پلاسما با ولتاژ ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه بر شمارش کلی باکتری‌های (LOG CFU/mL) گلاب

تیمار ۱ (ولتاژ ۱۲ کیلوولت در زمان ۴ دقیقه)، تیمار ۲ (ولتاژ ۱۵ کیلوولت در زمان ۴ دقیقه)، تیمار ۳ (ولتاژ ۱۲ کیلوولت در زمان ۶ دقیقه)، تیمار ۴ (ولتاژ ۱۵ کیلوولت در زمان ۶ دقیقه)، تیمار ۵ (ولتاژ ۱۲ کیلوولت در زمان ۸ دقیقه)، تیمار ۶ (ولتاژ ۱۵ کیلوولت در زمان ۸ دقیقه). حروف کوچک انگلیسی نشان‌دهنده تفاوت معنادار در سطح ($P < 0.05$) بین تیمارها می‌باشند.

Fig. 1. The effect of plasma with voltages of 12 kV and 15 kV for durations of 4, 6, and 8 minutes on the total bacterial count (LOG CFU/mL) in rose water

Treatment 1 (Voltage 12 kV for 4 minutes), Treatment 2 (Voltage 15 kV for 4 minutes), Treatment 3 (Voltage 12 kV for 6 minutes), Treatment 4 (Voltage 15 kV for 6 minutes), Treatment 5 (Voltage 12 kV for 8 minutes), Treatment 6 (Voltage 15 kV for 8 minutes). The lowercase letters indicate significant differences at the level of ($p > 0.05$) between the treatments.

ولی محتوای آب فعال نمونه‌ها پس از تیمار با پلاسما کاهش داشت که می‌تواند یکی از دلایل اثرات ضد میکروبی پلاسما در این نمونه‌ها باشد (Kahar et al., 2024).

در مطالعه‌ای توسط داش و همکاران (Dash & Jaganmohan, 2022) کیفیت شیر تیمار شده با تکنولوژی پلاسمای سرد را بررسی کردند. پلاسما به‌طور کارآمد تعداد کلنی‌ها را در شیر با یک ماه ماندگاری با ولتاژ اثردهی ۲۰۰ ولت، نرخ جریان ۱۰ لیتر در ساعت، مدت زمان اثردهی ۱۵ دقیقه و ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه، بدون هیچ اثر منفی کاهش داد (Dash & Jaganmohan, 2022).

در مطالعه کاها و همکاران (Kahar et al., 2024)، اثر پلاسمای اتمسفری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی رازیانه، دارچین و فلفل سیاه را بررسی کردند. تیمارهای پلاسمادهی بر اساس متغیرهای ولتاژ (۱۷۰، ۲۰۰ و ۲۳۰ ولت) و مدت زمان (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) بود. نتایج نشان داد که در حداقل ولتاژ و کمترین زمان (۱۷۰ ولت و ۵ دقیقه)، شمارش کلی کپک و مخمر به میزان ۱/۳، ۱/۱ و ۱ لگاریتم CFU/g، به‌ترتیب در دارچین، فلفل سیاه و رازیانه کاهش یافت. همچنین در ولتاژ ۲۳۰ ولت و ۱۵ دقیقه به‌طور کامل آلودگی میکروبی از بین رفت. رنگ و بافت نمونه‌ها در هیچ‌کدام از تیمارها تغییر نکرد.

بودند. همچنین به عنوان یک اثر غیرمطلوب پلاسما، بیشترین کاهش در میزان اسانس به ترتیب ۱۰/۸۱ و ۸/۴۹ میلی گرم در ۱۰۰ میلی لیتر گلاب مربوط به تیمارهای با ولتاژ ۱۵ کیلوولت و زمان های ۶ و ۸ دقیقه بودند. پیشنهاد می گردد مطالعات آینده بر روی نوع گاز مورد استفاده جهت تولید پلاسما، اندازه راکتور مورد استفاده و شناسایی تغییرات ترکیبات اسانس با استفاده از گاز کروماتوگرافی طیف سنج جرمی انجام گیرد.

میزان مشارکت نویسندگان

زینب رحمانی: مدیریت پروژه، نظارت، نوشتن - بررسی و ویرایش،
پاشا احمدی: تحقیق و بررسی، روش شناسی، نوشتن - پیش نویس اصلی،
رضا شرافتی چالشتی: مفهوم سازی، مدیریت داده ها، تحلیل رسمی، نظارت، روش شناسی، نوشتن - بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان های تأمین مالی در بخش های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ تعارض منافی ندارند.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک بوده و لذا از حمایت های حوزه پژوهشی دانشگاه های کاشان و علوم پزشکی کاشان تقدیر و تشکر به عمل می آید.

در مطالعه حاضر همسو با مطالعات ذکر شده، اثر ضد میکروبی پلاسمای سرد در کاهش لگاریتمی شمارش کلی باکتری های گلاب مشاهده شد. با این وجود تغییرات شیمیایی به وجود آمده به ویژه در اسیدیته و pH و میزان اسانس می تواند ناشی از آزاد شدن رادیکال های آزاد OH باشد که رابطه مستقیم خطی با افزایش زمان پلاسمادهی در نمونه های مایع می باشد (Rathore & Nema, 2021). در اثر القاء پلاسما و برهمکنش فوتون ها، رادیکال ها و الکترون های تولید شده با ترکیبات محلول در نمونه های مایع سبب تغییر در غلظت یون ها شده که موجب کاهش pH، افزایش σ و افزایش غلظت اکسید کننده ها می شوند (Svarnas et al., 2022). مکانیسم های ضد باکتریایی فناوری های غیرحرارتی مانند پرتودهی اشعه گاما، میدان پالس الکتریکی، افزودنی های شیمیایی و طبیعی، فراصوت و غیره در مطالعات گذشته گزارش شده اند (Porto et al., 2023; Sharafati, 2012). مکانیسم اثر ضد میکروبی پلاسما می تواند ناشی از آسیب مستقیم به نفوذپذیری غشا سول ها و در نتیجه خارج شدن محتوای سلولی مانند اسید نوکلئیک ها، پروتئین ها و پتاسیم، تخریب DNA و آنزیم های پروتئینی باشد. علاوه تولید آب اکسیژنه در هنگام پلاسمادهی با اثر بر روی آنزیم های مونونوکلئاز - آهن و آهن - گوگرد در باکتری ها سبب مرگ آنها می شوند (Shabani et al., 2023).

نتیجه گیری

نتایج مطالعه نشان داد که بیشترین میزان کاهش لگاریتمی را در شمارش کلی باکتری ها در اثر تیمار پلاسما در ولتاژهای ۱۲ و ۱۵ کیلوولت در زمان ۸ دقیقه به ترتیب، برابر ۳/۱۱ و ۲/۷ CFU/mL

References

1. Baydar, H., Kuleasan, H., Kara, N., Secilmis-Canbay, H., & Kineci, S. (2013). The effects of pasteurization, ultraviolet radiation and chemical preservatives on microbial spoilage and scent composition of rose water. *Journal of Essential oil bearing plants*, 16, 151-160. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.794043>
2. Chen, Y., Chen, Y., Fang, Y., Pei, Z., & Zhang, W. (2024). Coconut milk treated by atmospheric cold plasma: Effect on quality and stability. *Food Chemistry*, 430, 137045. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137045>
3. Dash, S., & Jaganmohan, R. (2022). Stability and shelf-life of plasma bubbling treated cow milk. *BioRxiv*, 2022-02. <https://doi.org/10.1101/2022.02.18.480824>
4. Eazhumalai, G., Ranjitha Gracy, T., Mishra, A., & Annapure, U.S. (2022). Atmospheric pressure nonthermal pin to plate plasma system for the microbial decontamination of oat milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e16181. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16181>
5. Ebadi, M.T., Abbasi, S., Harouni, A., & Sefidkon, F. (2019). Effect of cold plasma on essential oil content and composition of lemon verbena. *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1166-1171. <https://doi.org/10.1002/fsn.3876>
6. Huang, H.-W., Wu, S.-J., Lu, J.-K., Shyu, Y.-T., & Wang, C.-Y. (2017). Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food Control*, 72, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.019>
7. ISIRI (Iranian Institute of Standards and Industrial Research). (2022). Rose water-Specifications and test methods, INSO 5759, 3rd Revision 2022.

8. Jadhav, H.B., Annapure, U.S., & Deshmukh, R.R. (2021). Non-thermal technologies for food processing. *Frontiers in Nutrition*, 8, 657090. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.657090>
9. Jangi, F., Ebadi, M.T., & Ayyari, M. (2021). Qualitative changes in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) as affected by cold plasma, packaging method and storage duration. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 22, 100289. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100289>
10. Kahar, S.P., Shelar, A., & Annapure, U.S. (2024). Effect of pin-to-plate atmospheric cold plasma (ACP) on microbial load and physicochemical properties in cinnamon, black pepper, and fennel. *Food Research International*, 177, 113920. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113920>
11. Koksai, N., Saribas, R., Kafkas, E., Aslançan, H., & Sadighazadi, S. (2015). Determination of volatile compounds of the first rose oil and the first rose water by HS-SPME/GC/MS techniques. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 12, 145-150. <https://doi.org/10.4314/ajtcam.v12i4.21>
12. Mir, S., Siddiqui, M., Dar, B., Shah, M., Wani, M., Roohinejad, S., Annor, G., Mallikarjunan, K., Chin, C., & Ali, A. (2020). Promising applications of cold plasma for microbial safety, chemical decontamination and quality enhancement in fruits. *Journal of Applied Microbiology*, 129, 474-485. <https://doi.org/10.1111/jam.14541>
13. Porto, E.C., de Brito, E.S., Rodrigues, S., & Fernandes, F.A. (2023). Effect of atmospheric cold plasma on the aroma of pineapple juice: improving fresh and fruity notes and reducing undesired pungent and sulfurous aromas. *Processes*, 11(8), 2303. <https://doi.org/10.3390/pr11082303>
14. Rahmani, Z., Mohamadi, F., & Sharafati Chaleshtori, R. (2023). Evaluation of the effect of cold plasma against *Pseudomonas aeruginosa* inoculated in rose water. *Journal of Food Microbiology*, 10, 80-87.
15. Rathore, V., & Nema, S.K. (2021). Optimization of process parameters to generate plasma activated water and study of physicochemical properties of plasma activated solutions at optimum condition. *Journal of Applied Physics*, 129, 084901. <https://doi.org/10.1063/5.0033848>
16. Shabani, H., Dezhpour, A., Jafari, S., Moghaddam, M.J.M., & Nilkar, M. (2023). Antimicrobial activity of cold atmospheric-pressure argon plasma combined with chicory (*Cichorium intybus* L.) extract against *P. aeruginosa* and *E. coli* biofilms. *Scientific Reports*, 13, 9441. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35906-x>
17. Sharafati Chaleshtori, R., Rafieian Kopaei, M., & Salehi, E. (2015). Bioactivity of *Apium petroselinum* and *Portulaca oleracea* essential oils as natural preservatives. *Jundishapur Journal of Microbiology*, 8, e20128. <https://doi.org/10.5812/jjm.20128>
18. Sharafati Chaleshtori, R., Rafieian Kopaei, M., Rokni, N., Mortezaei, S., & Sharafati Chaleshtori, A. (2012). Antioxidant activity of *Zataria multiflora* hydroalcoholic extract and its antibacterial effect on *Staphylococcus aureus*. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 21, 88-94. <https://doi.org/10.5812/jjm.7877>
19. Svarnas, P., Poupouzas, M., Papalexopoulou, K., Kalaitzopoulou, E., Skipitari, M., Papadea, P., Varemменou, A., Giannakopoulos, E., Georgiou, C.D., Georga, S., & Krontiras, C. (2022). Water modification by cold plasma jet with respect to physical and chemical properties. *Applied Sciences*, 12(23), 11950. <https://doi.org/10.3390/app122311950>
20. Waghmare, R. (2021). Cold plasma technology for fruit based beverages: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.018>

Contents

Research Articles

- The Effect of Wet and Dry Heating Process and Wheat Flour Particle Sizes on Dough Rheology and Staling of Bread** 133
M. Fazli Rad, J. Mohammadzadeh Milani, S. Haghighat-Kharazi
- Nano-encapsulation of Red Beetroot Extract Based on Betalain Using of Complex Coacervation in Gummy Candies** 147
A. Ghorchi, A. Arianfar, V. Hakimzadeh, S. Naji-Tabasi
- Investigating the Effect of Different Concentrations of Organic Acids (Ascorbic, Citric, Malic, and Tartaric) on the Viscosity and Rheological Properties of Balangu Seed Gum** 165
F. Salehi, M. Tashakori, K. Samary
- Improving the Physico-mechanical Properties of Extruded Rice Based on Mixed Rice-quinoa Flours Using Pickering Emulsion-filled Gel Containing Beta-carotene** 179
M. Davtalab, S. Naji-Tabasi, M. Shahidi-Noghabi
- The Effect of Serish Root Gum (*Eremurus luteus*) as Fat Replacer on Rheological, Physical and Sensory Properties of Low Fat Ice Cream** 199
F. Sabzemeidani, M. Taghizadeh, M.S. Hemmati Hasanpoor
- Investigation and Evaluation of Dually Loaded Niosomes Containing Crocin and Omega-3 by Heating & Bubble Method** 217
P. Mardani, Gh. Rajabzadeh, B. Malaekheh-Nikouei, A. Bostan
- Investigating the Effect of Natural Coating of Chitosan Nanoparticles and Nanohydroxyapatite on the Physiological Characteristics and Shelf Life of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*)** 235
Z. Ziaei Ghahnavieh, M. Raji, A. Ehteshamnia, S.S. Sohrabi
- Short Article**
- Evaluation of Cold Plasma on Physicochemical Properties of Rose Water** 253
Z. Rahmani, P. Ahmadi, R. Sharafati Chaleshtori

Iranian Food Science and Technology Research Journal

Vol. 21

No. 2

2025

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.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Shahidi, F.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Habibi najafi, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Razavi, Seyed M. A.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Kashaninejad, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran
Khomeiri, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran
Farhoosh, R.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Fazli Bazzaz, S.	Professor, Department of Pharmaceutical Chemistry, School of Pharmacy, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
Koocheki, A.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Mohebbi, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Ghanbarzadeh, B.	Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
Alemzadeh, I.	Professor, Department of Food Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Rajabzadeh, GH.	Associate Professor, Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
Heydarpour, M.	Associate Professor, Brigham and Women's Hospital, Boston, Massachusetts. United States America
Ghoddusi, H. B.	Associate Professor, School of Human Sciences, London Metropolitan University, England
Khosravidarani, K.	Professor, Department of Food Industry, School of Nutrition Sciences & Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
Abbaszadegan, M.	Professor, Director Water & Environmental Technology Center, Arizona State University, United States of America
Mohammadifar, M. A.	Associate Professor, Research Group for Food Production Engineering, Technical University of Denmark, Denmark
Vosoughi, M.	Professor, Department of Food Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Almasi, H.	Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia , Iran
Fathi, M.	Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Isfahan University of Technology Isfahan, Iran
Abbasi, S.	Professor, Department of Food Science and Technology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Borges, N.	Professor, Faculty of Nutrition and Food Sciences, University of Porto; Portugal
Moazzami, Ali A.	Doctor of Philosophy, Department of Molecular Sciences, Swedish University, Sweden
Dr. Nkemnaso Obi C.	Department of Microbiology, Michael Okpara University of Agriculture, Umudike, Abia State, Nigeria
Dr, Olalekan Adeyeye S.A.	Department of Food Technology, Hindustan Institute of Technology and Science, Chennai, Tamil Nadu, India
Publisher	Ferdowsi University of Mashhad
Address:	College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
P.O.BOX:	91775- 1163
Fax:	(98)051-38787430
E-Mail:	ifstrj@um.ac.ir
Web Site:	https://ifstrj.um.ac.ir

Contents

Research Articles

- The Effect of Wet and Dry Heating Process and Wheat Flour Particle Sizes on Dough Rheology and Staling of Bread 133**

M. Fazli Rad, J. Mohammadzadeh Milani, S. Haghighat-Kharazi

- Nano-encapsulation of Red Beetroot Extract Based on Betalain Using of Complex Coacervation in Gummy Candies 147**

A. Ghorchi, A. Arianfar, V. Hakimzadeh, S. Naji-Tabasi

- Investigating the Effect of Different Concentrations of Organic Acids (Ascorbic, Citric, Malic, and Tartaric) on the Viscosity and Rheological Properties of Balangu Seed Gum 165**

F. Salehi, M. Tashakori, K. Samary

- Improving the Physico-mechanical Properties of Extruded Rice Based on Mixed Rice-quinoa Flours Using Pickering Emulsion-filled Gel Containing Beta-carotene 179**

M. Davtalab, S. Naji-Tabasi, M. Shahidi-Noghabi

- The Effect of Serish Root Gum (*Eremurus luteus*) as Fat Replacer on Rheological, Physical and Sensory Properties of Low Fat Ice Cream 199**

F. Sabzemeidani, M. Taghizadeh, M.S. Hemmati Hasanpoor

- Investigation and Evaluation of Dually Loaded Niosomes Containing Crocin and Omega-3 by Heating & Bubble Method 217**

P. Mardani, Gh. Rajabzadeh, B. Malaekheh-Nikouei, A. Bostan

- Investigating the Effect of Natural Coating of Chitosan Nanoparticles and Nanohydroxyapatite on the Physiological Characteristics and Shelf Life of Button Mushroom (*Agaricus bisporus*) 235**

Z. Ziaei Ghahnavieh, M. Raji, A. Ehteshamnia, S.S. Sohrabi

Short Article

- Evaluation of Cold Plasma on Physicochemical Properties of Rose Water 253**

Z. Rahmani, P. Ahmadi, R. Sharafati Chaleshtori