

Journal Pre-proofs

Spray-drying microencapsulation of pomegranate seed oil with Cordia gum fruit and maltodextrin: Physicochemical and oxidative stability

Mohammad Hooshyari, Mohammad Reza Fat'hi Emadabadi, Hassan Zaki Dizaji

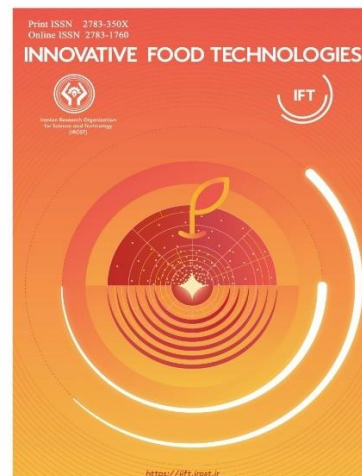
DOI: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7937.2245>

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 18 October 2025

Revised Date: 13 November 2025

Accepted Date: 16 November 2025



Please cite this article as: Mohammad Hooshyari, Mohammad Reza Fat'hi Emadabadi, Hassan Zaki Dizaji, Spray-drying microencapsulation of pomegranate seed oil with Cordia gum fruit and maltodextrin: Physicochemical and oxidative stability, *Innovative Food Technologies* (2025), doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7937.2245>

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2023 The Author(s). Published by irost.org.

مقاله پژوهشی

ریزپوشانی روغن هسته انار با استفاده از صمغ میوه سپستان و مالتودکسترین به روش خشک کردن پاششی: ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و پایداری اکسیداتیو

محمد هوشیاری^۱، محمدرضا فتاحی عمادآبادی^۲، حسن ذکی دیزجی^{۳*}^۱ دانشجوی دکتری گروه شیمی تجزیه، دانشکده علوم، دانشگاه شهیدچمران اهواز^۲ استاد، گروه شیمی تجزیه، دانشکده علوم، دانشگاه شهیدچمران اهواز^{۳*} دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهوازرایانامه نویسنده مسئول hzakid@scu.ac.ir

چکیده

با وجود فعالیت آنتی‌اکسیدانی پایین هسته‌های انار، روغن هسته انار (PSO) فعالیت آنتی‌اکسیدانی بسیار زیادی دارد اما ناپایدار است. در این مطالعه از خشک‌کن پاششی برای ریزپوشانی PSO با صمغ میوه سپستان (CFG) و مالتودکسترین استفاده شد. در پاسخ به افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات غذایی با برچسب‌های تمیز، دیواره‌های طبیعی و ایمن به کارگرفته شد. برای این منظور امولسیون‌هایی با محتوای کل جامد (TSC) ۲۰ درصد با نسبت PSO به مواد دیواره‌ای ۱:۴ تهیه شدند. محلول‌های مالتودکسترین شامل ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی صمغ میوه سپستان (CFG) بودند. امولسیون‌ها، پس از ارزیابی شاخص خامه‌ای شدن و ویسکوزیته، با استفاده از خشک‌کن پاششی به میکروکپسول تبدیل شدند. نتایج نشان داد که میکروکپسول‌های تهیه‌شده با نسبت ۶ درصد CFG بالاترین راندمان کپسوله‌سازی (۸۸/۱۱ درصد)، کوچک‌ترین اندازه ذرات (۱۲۴/۱ μm)، بیشترین چگالی توده (۰/۳۸ g/cm³)، بالاترین کروییت و بالاترین پایداری اکسیداتیو را داشتند. این مطالعه نشان داد که با استفاده از سیستم میکروکپسوله‌سازی پاک^۱ (CL) می‌توان به ضایعات فرآوری انار ارزش افزوده داد و به این طریق روش پایداری برای استفاده از مواد طبیعی و بومی مورد تأیید و ایمن^۲ (GRAS) در صنعت غذایی و راهکار مؤثری به‌منظور حل مشکل پایداری اکسیداتیو PSO ارائه داد.

واژگان کلیدی: روغن هسته انار، صمغ میوه سپستان، پاک برچسب، خشک کردن پاششی، پایداری اکسیداتیو.

۱. مقدمه

انار، با نام علمی *Punica granatum L*، در زبان انگلیسی pomegranate نامیده می‌شود که از دو واژه لاتین pomum به معنی «سیب» و granatus به معنی «دانه‌دار» گرفته شده است و به ظاهر آن اشاره دارد؛ زیرا شبیه یک سیب دانه‌دار است. این باور وجود دارد که منشأ اصلی انار آسیای مرکزی، به‌ویژه بخش‌هایی از ایران، بوده و از آنجا به سایر نقاط جهان گسترش یافته است [۱]. هند با سهم حدود ۴۰ درصدی، بزرگ‌ترین تولیدکننده جهانی انار است. ایران با سهم حدود ۱۵ درصدی، در رتبه‌سوم پس از چین قرار دارد [۲]. اگرچه هسته‌های انار فعالیت آنتی‌اکسیدانی پایینی دارند، روغن هسته انار^۳ (PSO) از فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که نتایج یک پژوهش نشان داد که فعالیت آنتی‌اکسیدانی روغن هسته انار سطحی مشابه چای سبز دارد [۳]. دانه‌های انار حاوی ۱۲ تا ۲۰ درصد روغن (بر اساس وزن خشک) و سرشار از ترکیبات زیست‌فعال، مانند اسید پونیسیک^۴،

¹ Clean label² Generally Recognized as Safe³ Pomegranate seed oil⁴ punicic acid

توکوفرولها، فنولها، استرولها و کاروتنوئیدها، هستند؛ وجود این ترکیبات باعث فعالیت آنتی اکسیدانی قابل توجهی در روغن هسته انار می شود [۴]. بنابراین، با توجه به خواص PSO و مقادیر زیاد هسته های تولید شده به عنوان محصول جانبی از تولید آب میوه و کنسانتره، می توان، به جای دفن یا استفاده به عنوان خوراک دام، کاربردهای بهتری برای آن ها پیدا کرد. استخراج روغن و استفاده از آن در صنایع غذایی و دارویی یکی از موارد استفاده از این دانه ها است. فدوی و همکاران در بررسی ۲۵ گونه انار، از دو منطقه مختلف ایران، گزارش کردند که روغن هسته انار مقادیر بالایی اسیدهای چرب غیراشباع، به ویژه اسید لینولنیک^۱ (۸۶/۶-۳۱/۸ درصد) و اسید لینولئیک^۲ (۲۴/۴-۰/۷ درصد) دارد [۵]. وجود این اسیدهای چرب با پیوندهای دوگانه، علت اصلی ناپایداری اکسیداتیو بالا و فساد روغن هسته انار محسوب می شود و در نتیجه استفاده مستقیم روغن هسته انار در محصولات غذایی را محدود می کند. یکی از بزرگترین چالش های پیش روی صنعت غذا، فساد سریع مواد غذایی به علت ناپایداری اکسیداتیو بالا است؛ بدیهی است که این مشکل منجر به اتلاف گسترده مواد غذایی و زیان مالی قابل توجهی در سراسر جهان می شود [۶]. در این راستا، ریزپوشانی به عنوان روش مؤثری برای غلبه بر این مشکل در نظر گرفته می شود [۷]. ریزپوشانی^۳ روشی برای تولید ذراتی با توزیع اندازه^۴ ۱ تا ۵۰۰۰ میکرومتر است که طی آن ماده (هسته)^۵ درون یک ماتریس پیوسته از مواد پلیمری (دیواره)^۶ به دام انداخته می شود تا در برابر شرایط نامطلوب محیطی حفاظت شود [۸]. خشک کردن پاششی^۷ یکی از روش های ریزپوشانی است که در آن محلول، امولسیون یا سوسپانسیون با پاشش در جریان گاز داغ (معمولاً هوا) به پودر تبدیل می شود [۹]. این روش برای ریزپوشانی روغن ها کارآمدتر از خشک کردن انجمادی بوده و هزینه آن ۳۰ تا ۵۰ برابر کمتر است [۱۰]. صنایع غذایی بزرگترین کاربران فناوری خشک کردن پاششی هستند [۱۱]. انتخاب دیواره مناسب در ریزپوشانی به دانش گسترده ای در زمینه علوم مواد، شیمی و زیست شناسی نیاز دارد. ترکیب دو ماده دیواره ای می تواند راندمان ریزپوشانی و پایداری را، نسبت به سیستم های تک دیواره، بهبود بخشد [۱۲]. مالتودکسترین^۸ ماده ای ارزان قیمت است که از نشاسته به دست می آید. به دلیل طعم خنثی، ظرفیت بالای محافظت در برابر اکسیداسیون، ارزانی و ویسکوزیته پایین در غلظت های بالا، کاربرد گسترده ای، به عنوان پوسته، در خشک کردن پاششی دارد [۱۳].

سپستان (*Cordia myxa* L.) گیاهی گلدار از خانواده گاوزبانیان (Boraginaceae) است که در نواحی نیمه گرمسیری و گرمسیری بخش هایی از آسیا، استرالیا و آفریقا رشد می کند [۱۴]. این گیاه در جنوب ایران، به صورت طبیعی رشد و گسترش یافته است [۱۵]. حجتی و همکاران، در مطالعه ای به بررسی پلی ساکارید محلول در آب استخراج شده از میوه سپستان^۹ پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد این پلی ساکارید با ساختار هتروپلی ساکاریدی عمدتاً شامل گلوکز، فروکتوز، ساکاروز، مالتوز و ریبوز است. وجود گروه های عامل فعال، مانند OH- و C=O، موجب بروز فعالیت آنتی اکسیدانی قوی و خاصیت آنتی باکتریایی مؤثر در این ترکیب شد. بر این اساس، پژوهشگران پیشنهاد کردند که پلی ساکارید استخراج شده از میوه سپستان می تواند به عنوان ترکیب طبیعی با خواص آنتی اکسیدانی و آنتی باکتریال در صنایع غذایی و دارویی به کار رود [۱۶]. در پژوهشی دیگر صمغ کوردیا به عنوان پوشش خوراکی برای دانه های کاج به کار گرفته شد که، ضمن افزایش ماندگاری، نقش مؤثری در محافظت در برابر اکسایش ایفا کرد [۱۷].

مصرف کنندگان مدرن خواهان غذاهای فرآوری شده بدون افزودنی ها و نگهدارنده های مصنوعی هستند. اصطلاح (برچسب پاک)^۹ برای توصیف چنین محصولاتی به کار می رود [۱۸].

¹ linolenic acid

² linoleic acid

³ Microencapsulation

⁴ Core

⁵ Wall

⁶ Spray-drying

⁷ Maltodextrin

⁸ Cordia myxa

⁹ Clean label

شکاف تحقیقاتی قابل توجهی در استفاده از مواد طبیعی با برچسب پاک در میکروکپسوله کردن PSO در کاربردهای غذایی وجود دارد. این امر برای صنایع غذایی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا این صنایع برای تولید محصولات با برچسب‌های پاک و طبیعی تحت فشار مصرف‌کننده هستند. در این پژوهش با استفاده از صمغ سپستان، که بومی منطقه است، و مالتودکسترین، PSO، پس از بررسی خواص فیزیکی‌شیمیایی به روش خشک کن پاششی کپسوله شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. تهیه صمغ میوه سپستان^۱ (CFG)

میوه سپستان از درختان واقع در استان خوزستان، شهرستان اهواز، واقع در دانشکده کشاورزی در اواسط فصل تابستان تهیه شد. برای تهیه CFG از روش حسین و همکاران (۲۰۲۰) با اندکی تغییر استفاده شد؛ به این صورت که میوه‌های سپستان جمع‌آوری و کاملاً شسته شد، سپس به مدت ۳ دقیقه بخارپز شد تا از فعالیت آنزیمی جلوگیری شود. در مرحله بعد، دانه‌ها برای به‌دست‌آوردن گوشته^۲ خالص خارج شدند و گوشته به مدت ۶۰ دقیقه با آب مقطر به نسبت ۳:۱ مخلوط شد. این مخلوط با کمک پارچه موسلین^۳ فیلتر و سپس با نیروی گریز از مرکز ($1000 \times g$) به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. مایع لزج رویی در خشک‌کن انجمادی (درسا بهساز، DFR-02، ایران) خشک شد، به‌صورت پودر ریز (۶۰ مش) آسیاب و تا استفاده بعدی در شیشه‌های دربسته در دردمای ۴ درجه سانتیگراد یخچال نگهداری شد [۱۹].

۲.۲. آماده‌سازی امولسیون‌ها

امولسیون‌ها با محتوای کل جامد^۴ (TSC) برابر با ۲۰ درصد وزنی - حجمی تهیه شدند (جدول ۱). نسبت PSO به مواد دیواره‌ای ۱:۴ در نظر گرفته شد و از آب مقطر برای تهیه امولسیون‌های حاوی روغن هسته انار (آرکا کم^۵، ایران) و مواد دیواره‌ای استفاده شد. محلول‌های مالتودکسترین (DE= ۱۸-۲۰، گلشید، ایران) حاوی ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی از صمغ سپستان تهیه شدند. محلول‌ها به مدت یک شب در دمای محیط نگهداری شدند تا کارایی امولسیفیکاسیون در مرحله بعد افزایش یابد. روز بعد، پس از هیدراته شدن کامل مولکول‌های پلیمر، PSO به‌تدریج به مواد دیواره‌ای اضافه شد و همزمان به مدت ۶۰ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه با همزن مغناطیسی مخلوط گردید. امولسیون‌ها، برای اطمینان از هیدراته شدن کامل، یک شب دردمای ۴ درجه سانتیگراد یخچال نگهداری شدند.

جدول (۱). تیمارهای آزمایشی برای ریزپوشانی روغن هسته انار با استفاده از مالتودکسترین و صمغ میوه سپستان

Table 1. Experimental treatments to encapsulation of PSO by MD and CFG

۳.۲. نحوه تهیه میکروکپسول‌ها به روش خشک کردن پاششی

امولسیون‌ها از طریق یک نازل ۱/۴ میلی‌متری به محفظه خشک‌کن پاششی (درسا بهساز، DSD-06، ایران) با دمای هوای ورودی 5 ± 180 درجه سانتی‌گراد، که در آن نرخ تغذیه و حجم هوای ورودی کنترل می‌شد، به کمک پمپ پریستالتیک وارد شدند. میکروکپسول‌های جمع‌آوری‌شده از خشک‌کن پاششی مخلوط شدند و در کیسه‌های پلی‌اتیلن مهر و موم‌شده و در بسته قرار گرفتند. سپس این کیسه‌ها در دمای ۴ درجه سانتیگراد یخچال و در تاریکی نگهداری و برای مطالعات بعدی استفاده شدند.

۴.۲. مشخصه‌یابی امولسیون^۶

۱.۴.۲. شاخص خامه‌ای شدن^۷

¹ Cordia myxa fruit gum

² Pulp

³ muslin

⁴ Total solids content

⁵ Arka Chem

⁶ Emulsion characterization

⁷ Creaming index

بلافاصله پس از تهیه امولسیون، ۲۵ میلی‌لیتر از هر نمونه به استوانه‌های مدرجی با همین حجم منتقل شد، درب آن‌ها بسته شد و پس از ۷ روز نگهداری در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، حجم لایهٔ خامهٔ جدا شده اندازه‌گیری و درصد شاخص خامه‌ای شدن طبق معادله (۱) محاسبه شد [۲۰].

$$1) \text{ Creaming Index (\%)} = (H_c / H_i) \times 100\%$$

در این فرمول، H_c ارتفاع لایه خامه تشکیل شده و H_i ارتفاع کل امولسیون اولیه است.

۲.۴.۲. اندازه‌گیری ویسکوزیته^۱

از ویسکومتر^۲ دوران دیجیتال Brookfield DV-11+Pro برای تعیین ویسکوزیته امولسیون‌ها استفاده شد. ویسکوزیته با استفاده از اسپیندل^۳ شماره ۲۹ در سرعت‌های ۵۰ دور بر دقیقه اندازه‌گیری شد که این انتخاب، بر اساس بافت امولسیون‌های مورد مطالعه، توسط سازنده توصیه شده بود [۲۱].

۵.۲. آزمون‌های ریز کپسول

۱.۵.۲. محتوای رطوبت^۴

محتوای رطوبت پودر میکروکپسول با استفاده از روش خشک کردن در آون تعیین شد [۲۲]. برای این منظور، ۱ گرم از نمونه در یک شیشه توزین قرار داده شد و برای رسیدن به وزن ثابت، به مدت ۳ تا ۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد، سپس با ترازوی دیجیتال وزن‌کشی شد. تمامی نمونه‌ها سه بار تکرار شدند. برای محاسبه محتوای رطوبت، از فرمول زیر استفاده شد:

$$2) \text{ Moisture Content (\%)} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100\%$$

در این فرمول، W_1 = وزن پودر مرطوب (g) و W_2 = وزن پودر خشک (g) است.

۲.۵.۲. اندازهٔ ذرات^۵

توزیع اندازهٔ ذرات با استفاده از روش پراکندگی نور دینامیکی^۶ (DLS) با کمک دستگاه ZS ۵۰۱ از برند مالورن^۷ اندازه‌گیری شدند. شدند. اندازه‌گیری‌های در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در زاویهٔ پراکندگی ۹۰ درجه انجام گرفت.

۳.۵.۲. درصد بازده درون پوشانی^۸

یکی از پارامترهای مهم پودرهای کپسوله‌شدن، راندمان کپسوله‌سازی (EE) در طی فرآیند است. این پارامتر مقدار مادهٔ هستهٔ کپسوله‌شدن در داخل ذرات پودر را نشان می‌دهد و از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$3) \text{ EE (\%)} = (TO - SO) / TO \times 100\%$$

که در آن TO^۹ محتوای روغن کل و SO^{۱۰} محتوای روغن سطحی است [۲۳].

کارایی کپسوله‌سازی (EE) به روش توضیح داده‌شده را جورجیو و همکاران (۲۰۱۹) با برخی اصلاحات محاسبه کردند، ابتدا به ۱ گرم از پودر میکروکپسول‌ها، ۱۵ میلی‌لیتر هگزان اضافه شد و مخلوط به مدت ۳ دقیقه در دمای اتاق (۲۰ درجه سانتی‌گراد) در یک ظرف شیشه‌ای دردار هم زده شد. سپس مخلوط از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ عبور داده شد و پودر جمع‌آوری‌شده روی صافی، به‌منظور اطمینان از استخراج کامل روغن سطحی از پودر، دو بار با ۱۰ میلی‌لیتر هگزان تازه شستشو داده شد. پس از آن،

1 Viscosity

2 Viscometer

3 Spindle

4 Moisture content

5 Particle size

6 Dynamic light scattering

7. Malvern

8 Encapsulation efficiency percentage

9 Total oil

10 Surface oil

حلال باقی مانده در پودر در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تبخیر شد تا پودر به وزن ثابت رسید. مقدار روغن آزاد استخراج شده از طریق اختلاف وزن پودر در دو حالت محاسبه شد [۲۴]. محتوای روغن کل به طور نظری محاسبه شد [۲۵].

۴.۵.۲. چگالی توده^۱

برای تعیین چگالی توده، ۲ گرم پودر به یک استوانه مدرج ۵۰ میلی لیتری منتقل و بر اساس معادله زیر چگالی توده محاسبه شد:

4) Bulk Density (g/ml) = M / V

در این فرمول M جرم پودر (g) و V حجم اشغال شده توسط پودر (mL) است.

۵.۵.۲. شاخص پراکسید^۲

شش میلی لیتر محلول اسید استیک: کلروفرم (۳:۲، حجمی/حجمی) به ۱ گرم میکروکپسول حاوی PSO اضافه شد. سپس ۰/۱ میلی لیتر محلول KI اشباع به آن افزوده و مخلوط به مدت ۱ دقیقه در ورتکس تکان داده شد. در مرحله بعد، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در تاریکی نگهداری شد. پس از این زمان، ۶ میلی لیتر آب مقطر افزوده شد و محلول حاصل با محلول ۰/۰۰۲ نرمال تیوسولفات سدیم (Na₂S₂O₃) تیتیر شد. از محلول ناشاسته ۱ درصد وزنی - حجمی به عنوان شناساگر استفاده شد. همین روش برای ۰/۰۲ گرم PSO آزاد برای مقایسه به کار رفت [۲۶].

$$5) \quad P.I. (m eq O_2 / kg oil) = \frac{V \times N \times 1000}{W}$$

در این

فرمول، P.I. شاخص پراکسید؛ V حجم محلول Na₂S₂O₃ مصرف شده (mL)؛ N نرمالیت محلول Na₂S₂O₃ و W وزن کل روغن موجود در نمونه (g) است.

۶.۲. تحلیل آماری^۳

تمام اندازه گیری ها سه بار تکرار شدند. تمامی مقادیر به صورت انحراف معیار (SD) $\pm$ میانگین تفاوت های معنادار بین تیمارها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) شناسایی شد. در صورت وجود تفاوت، مقایسه پس از آزمون میانگین ها با استفاده از آزمون دامنه ای چندگانه دانکن^۴ انجام شد. تمام تحلیل های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۷.۰ (IBM Corp., Armonk, NY, USA) انجام و سطح معناداری $p < 0.05$ در نظر گرفته شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ویژگی های امولسیون

۱.۱.۳. شاخص خامه ای

شاخص خامه ای، به صورت غیرمستقیم، اطلاعات مهمی در مورد میزان تجمع قطرات و ویسکوزیته امولسیون نشان می دهد [۲۷]. ویژگی های رئولوژیکی امولسیون ها تا حد زیادی تحت تأثیر ماهیت و خصوصیات فاز پیوسته از جمله ترکیب شیمیایی و ویسکوزیته آن قرار دارند. ویسکوزیته فاز پیوسته نقش مهمی در کنترل جدایش امولسیون ایفا می کند؛ برای مثال، افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته موجب کاهش حرکت قطرات می شود و بدین ترتیب از بروز پدیده هایی مانند خامه ای شدن یا ته نشینی جلوگیری می کند [۲۸].

پایداری بیشتر با شاخص خامه ای شدن (CI) پایین تر نشان داده می شود که معیاری از میزان جداسازی فاز در امولسیون ها است [۲۹]. درصد شاخص خامه ای شدن امولسیون ها بر حسب غلظت CFG در شکل (۱) ترسیم شده است که معنادار بودن این شاخص

1 Bulk density

2 Peroxide index

3 Statistical analysis

4. Duncan's Multiple Range Test

را در درصدهای متفاوت از صمغ سپستان نشان می‌دهد ($P < 0.05$). با افزایش درصد صمغ سپستان میزان پایداری امولسیون افزایش معناداری یافته است. به عبارت دیگر، کمترین شاخص خامه‌ای شدن و بالاترین پایداری مربوط به امولسیون حاوی ۹ درصد صمغ سپستان بود، که در واقع همان امولسیونی است که بالاترین ویسکوزیته ظاهری را دارد. در نتیجه، ما معتقدیم که افزایش ویسکوزیته با کند کردن حرکت قطرات در افزایش پایداری امولسیون نقش دارد [۳۰]. در نتیجه‌گیری مشابه در پژوهش چانگ و همکاران، که به بررسی پایداری امولسیون‌های روغن ماهی در آب با یک ترکیب زیست‌پلیمری پرداختند، بهبود پایداری و کاهش خامه‌ای شدن در اثر افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته را به کاهش تحرک قطرات و ایجاد مقاومت بیشتر در برابر اثر نیروی گرانش نسبت دادند [۳۱].

شکل (۱) اثر غلظت CFG بر شاخص خامه‌ای شدن امولسیون‌های حاوی PSO
Figure 1. Effect of CFG concentration on the creaming index (CI) of PSO emulsions

۲.۱.۳. ویسکوزیته

افزایش ویسکوزیته امولسیون، تا یک نقطه بهینه، به نگهداشت ترکیبات فرار کمک می‌کند؛ این امر با کاهش چرخش‌های داخلی درون قطرات و تشکیل سریع یک غشای نیمه‌تراوا محقق می‌شود [۳۲]. ویسکوزیته امولسیون مستقیماً با غلظت کل مواد جامد و اندازه قطرات امولسیون مرتبط است و با افزایش این پارامترها افزایش می‌یابد [۳۳]. مطابق شکل (۲) افزایش ویسکوزیته در نتیجه نسبت‌های بالاتر صمغ سپستان در امولسیون‌ها مشاهده شد. ویسکوزیته امولسیون تأثیر قابل توجهی بر بازده ریزپوشانی دارد؛ زیرا با کاهش نوسان و حرکت قطرات روغن در حین خشک کردن پاششی، میزان حفظ روغن افزایش و از دست رفتن ترکیبات فرار کاهش می‌یابد. با این حال، ویسکوزیته بیش از حد می‌تواند بازده حفظ روغن را کاهش دهد؛ زیرا تشکیل قطرات کندتر و زمان تماس آن‌ها در طول اتمیزاسیون طولانی‌تر می‌شود [۳۴؛ ۳۵]. افزایش ویسکوزیته امولسیون اولیه تأثیرات مثبتی بر EE دارد. این افزایش باید به گونه‌ای باشد که حرکت داخلی درون قطرات امولسیون را کاهش دهد.

شکل (۲) اثر غلظت CFG بر ویسکوزیته امولسیون‌های حاوی PSO
Figure 2. Effect of CFG concentration on the viscosity of PSO emulsions

۲.۳. آزمون‌های ریز کپسول

۱.۲.۳. محتوای رطوبت

میزان رطوبت برای پودرها بسیار مهم است؛ زیرا بر جنبه‌های مختلفی مانند پایداری، جریان‌پذیری، راندمان خشک شدن، چسبندگی، اکسیداسیون عامل زیست‌فعال و رشد میکروبی تأثیر می‌گذارد [۳۶]. میزان مجاز رطوبت برای اغلب پودرهای خشک در صنعت غذا کمتر از ۴ درصد است [۳۷]. تمامی امولسیون‌های خشک‌شده به روش اسپری در این پژوهش، مقادیر قابل‌قبولی برای این معیار کیفی داشتند (۳/۱۳-۲/۷۱ درصد). در این مطالعه، با اعمال شرایط خشک کردن پاششی یکسان برای تمامی گروه‌ها هیچ تفاوت معنادار آماری در محتوای رطوبت مشاهده نشد (شکل ۳). بنابراین روش خشک کردن به‌طور مؤثر رطوبت را از طریق تبخیر آب کاهش داد و در نتیجه پودرهای ریز و خشکی حاصل شد که برای نگهداری مناسب بودند. کارنیرو و همکارانش (۲۰۱۳) نیز گزارش کردند که میزان رطوبت در میکروکپسول‌های روغن بذر کتان تهیه‌شده با روش خشک کردن پاششی در محدوده ۱ تا ۲ درصد قرار دارد و این مقدار تحت تأثیر نوع ماده دیواره‌ای قرار نمی‌گیرد [۳۸].

شکل (۳) اثر غلظت CFG بر محتوای رطوبت ریز کپسول‌های PSO
Figure 3. Effect of CFG concentration on the moisture content of PSO microcapsules

۲.۲.۳. اندازه ذرات

ترکیب شیمیایی، فرآیند امولسیون سازی و شرایط خشک کردن تأثیر زیادی بر اندازه ذرات دارند. بر اساس شکل ۴، بیشترین اندازه ذرات مربوط به امولسیون های صفر درصد با کمترین ویسکوزیته و ۹ درصد با بیشترین ویسکوزیته بود. گرچه فرآیند اتمیزاسیون انرژی لازم برای شکست قطرات به ذرات کوچک تر را تأمین می کند، اما امولسیون های ویسکوز معمولاً در برابر این انرژی مقاومت می کنند و مانع تشکیل ذرات کوچک می شوند [۳۹]. همچنین به نظر می رسد امولسیون صفر درصد به علت ویسکوزیته پایین از انسجام کافی به منظور پاشش مناسب در فرآیند خشک کردن پاششی برخوردار نیست.

شکل (۴) اثر غلظت CFG بر اندازه ذرات ریزکپسول های PSO
Figure 4. Effect of CFG concentration on the particle size of PSO microcapsules

۳.۲.۳. چگالی توده

چگالی توده، به عنوان یک پارامتر اقتصادی و کاربردی، نقش مهمی در ارزیابی کیفیت ذرات پودر دارد و به عنوان شاخصی کلیدی برای سنجش سهولت در فرآیندهای فرآوری، بسته بندی، حمل و نقل و ذخیره سازی پودرها شناخته می شود [۴۰]. در فرآیند خشک کردن پاششی، اتمیزه سازی محلول ورودی موجب بهبود فرآیند انتقال حرارت و جداسازی سریع رطوبت در اثر دمای بالا می شود. سطح بالای انتقال حرارت و نرخ زیاد تبخیر به تولید پودرهایی با چگالی بسیار پایین تر می انجامد. میکروکپسول های ریزتر منجر به افزایش چگالی توده ای می شوند؛ زیرا فضاهای خالی بین ذرات در ذرات ریز کاهش می یابد. شارما و همکاران (۲۰۲۱)، که اثر حامل ها را در خشک کردن پاششی آب کدو سبز بررسی کردند، کاهش چگالی توده ای در حضور ترکیب حامل ها را به تشکیل ذرات بزرگ تر و افزایش تعداد فضاهای خالی بین ذره ای نسبت دادند [۴۱].

بر اساس شکل (۵) با توجه به این که اندازه ذرات پودر حاوی ۶ درصد کوچک تر از سایر نمونه ها بود و اختلاف معناداری در میزان رطوبت مشاهده نشد، چگالی توده ای بالاتر این پودر را می توان عمده تاً به اندازه ذرات کوچک تر آن نسبت داد. معمولاً پودرهایی با چگالی حجمی بالاتر برای ذخیره سازی انتخاب می شوند؛ زیرا فضای هوایی کمتری بین ذرات وجود خواهد داشت که در نهایت به کاهش اکسیداسیون ماده اصلی و در نتیجه بهبود پایداری ذخیره سازی کپسوله های پودری کمک می کند [۴۲].

شکل (۵) اثر غلظت CFG بر چگالی توده ریزکپسول های PSO
Figure 5. Effect of CFG concentration on the bulk density of PSO microcapsules

۴.۲.۳. ریخت شناسی^۱

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) از میکروکپسول های خشک شده، نمای دقیقی از مورفولوژی سطح و ویژگی های ساختاری روغن هسته انار ریزپوشانی شده نشان می دهند. این تصاویر برای بررسی ویژگی های فیزیکی، میزان ریزپوشانی و پایداری احتمالی پودرها اهمیت دارند. میکروکپسول های حاوی ۶ درصد صمغ سپستان، تقریباً در تمامی ویژگی ها، فرمولاسیون بهینه ای برای ریزپوشانی نشان دادند؛ بنابراین تصاویر آن ها با میکروسکوپ الکترونی بررسی و تحلیل شد. این میکروکپسول های دارای شکل کروی، سطحی صاف و بدون فرورفتگی قابل توجه بودند (شکل ۶)، که این ویژگی به بهبود درصد EE از طریق نگهداری بهتر PSO و افزایش چگالی توده پودر منجر شد. شکل کروی میکروکپسول ها به فرآیند اتمیزاسیون و گشتش سطحی قطرات و سرعت تبخیر بالای آن ها نسبت داده می شود [۳۹]. سطوح صاف بیانگر کارایی بالای ریزپوشانی و شرایط مناسب خشک کردن پاششی است که از فروپاشی سطحی در حین تبخیر حلال جلوگیری می کند [۹]. حجتی و همکاران (۲۰۱۳)، اثر دیواره های متفاوت را بر ویژگی های میکروکپسول های حاوی کانتاگزانتین^۳ مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که حضور مالتودکسترین در ترکیب

¹ Morphology

² Scanning electron microscope images

³ Canthaxanthin

دیواره به تشکیل سطوح صافتر و یکنواختتر در ریزکپسول‌ها می‌انجامد. این پدیده به انعطاف‌پذیری بالای مالتودکسترین با معادل دکستروز بالا (DE) نسبت داده شد که بهبود قابلیت شکل‌پذیری طی فرآیند ریزپوشانی را در پی داشت [۴۳].

شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ریزکپسول‌های حاوی PSO با مواد دیواره‌ای شامل ۶٪ CFG و MD در بزرگنمایی ۱۵K
Figure 6. SEM image of PSO microcapsules with wall materials of 6% CFG and MD at 15 K magnification

۵.۲.۳. بازده ریزپوشانی

تمرکز اصلی در ریزپوشانی روغن، بهبود کارایی ریزپوشانی در فرآیند خشک‌کردن پاششی از طریق به‌ حداقل رساندن میزان روغن سطحی و افزایش طول عمر نگهداری محصول است؛ زیرا حتی مقدار اندک ترکیبات روغن سطحی می‌تواند به‌ سرعت کیفیت محصول را کاهش دهد. برای دستیابی به پودرهای ریزپوشانی‌شده باکیفیت و کارایی بالا باید عوامل کلیدی، از جمله نوع مواد دیواره و هسته، ویژگی‌های امولسیون، و شرایط فرآیند خشک‌کردن در نظر گرفته شوند [۳۲]. شکل (۷) EE میکروکپسول‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بازده ریزپوشانی ذرات در محدوده ۴۹/۶۶ تا ۸۸/۱ درصد قرار گرفت. در صورت افزایش بیش از حد ویسکوزیته امولسیون، فرآیند خشک‌کردن پاششی به دلیل تشکیل ذرات بزرگتر، نرخ خشک‌شدن کارایی نخواهد داشت [۳۹]. بر اساس گزارش باربوسا و همکاران [۴۴]، راندمان ریزپوشانی ارتباط مستقیمی با پایداری امولسیون دارد؛ به‌گونه‌ای که هر چه امولسیون پایدارتر باشد، مقدار کمتری از ترکیبات هسته‌ای روی سطح ذرات باقی می‌ماند و در نتیجه راندمان میکروپوشانی افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر نیز، مطابق شکل، این روند مشاهده شد؛ به‌طوری که امولسیون‌هایی با شاخص خامه‌ای شدن پایین‌تر و پایداری بالاتر، درصد ریزپوشانی بیشتری را نشان دادند. با این حال، امولسیون ۹ درصد از این قاعده مستثنی بود؛ زیرا، علی‌رغم داشتن کمترین شاخص خامه‌ای شدن، بازده ریزپوشانی آن کمتر گزارش شد. این پدیده احتمالاً ناشی از ویسکوزیته بالای امولسیون بوده که موجب اختلال در فرآیند اتمیزاسیون و خشک‌کردن پاششی شده است. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد، به این معنی که ویسکوزیته زیاد باعث تشکیل قطرات درشت‌تر، خشک شدن ناکامل و افزایش روغن سطحی در پودرهای خشک‌شده می‌شود [۴۵]. ویسکوزیته بیش‌ازحد کم یا زیاد در محلول پوشاننده می‌تواند به ایجاد ریزساختارهای ناقص، مانند تخلخل‌ها، ترک‌ها یا ضخامت‌های غیریکنواخت بیانجامد که در نتیجه، بازده ریزپوشانی را کاهش می‌دهد [۴۶]. محلولی که ویسکوزیته بسیار بالایی دارد، برای پاشش یا پوشش‌دهی مناسب نیست؛ در حالی که محلولی با ویسکوزیته بسیار پایین نیز به تشکیل لایه‌های دیواره‌ای نازک‌تر منجر می‌شود [۴۷]. تأثیر اندازه ذرات پودر بر بازده ریزپوشانی روغن‌ها و ترکیبات طعم‌دهنده غذایی هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است. برخی پژوهشگران گزارش کرده‌اند که ذرات بزرگ‌تر موجب بهبود نگهداشت طعم و کاهش میزان روغن سطحی در طول خشک‌کردن پاششی می‌شوند [۴۸]؛ اما در مطالعه انجام‌شده ذرات کوچک‌تر بازده بالاتری داشتند. اگرچه ذرات بزرگ‌تر نسبت سطح به حجم پایین‌تری دارند و بنابراین باید هسته روغنی را بهتر حفظ کنند، اما تشکیل لایه فیلم اطراف قطرات بزرگ‌تر به زمان بیشتری نیاز دارد؛ در نتیجه، هر چه فرآیند تشکیل فیلم طولانی‌تر شود، احتمال از دست‌رفتن ترکیبات فرار افزایش می‌یابد [۳۲].

شکل (۷) اثر غلظت CFG بر بازده ریزپوشانی ریزکپسول‌های PSO
Figure 7. Effect of CFG concentration on the encapsulation efficiency of PSO microcapsules

۶.۲.۳. شاخص پراکسید

شاخص پراکسید (PI) یک روغن نشان‌دهنده سطح اکسیداسیون آن است [۴۹]. پایداری اکسیداتیو روغن هسته انار در شکل آزاد و ریزپوشانی‌شده در سه حالت ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی از CFG در شکل (۸) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، تشکیل پراکسید در روغن آزاد و ریزپوشانی‌شده تأیید شد. از آنجا که مقادیر اولیه به‌دست‌آمده برای روغن آزاد و ریزپوشانی‌شده به یکدیگر بسیار نزدیک بودند و تفاوت معناداری ($P \leq 0.05$) مشاهده نشد، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیندهای امولسیون‌سازی و ریزپوشانی تأثیر منفی بر پایداری اکسیداتیو PSO نداشته‌اند. با توجه به این‌که در تمامی زمان‌ها، شاخص پراکسید روغن آزاد از میکروکپسول‌ها

بیشتر بود و این اختلاف با گذر زمان قابل توجه‌تر شد، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند اکسیداسیون PSO توسط ریزپوشانی به تأخیر می‌افتد. میکروکپسول حاوی ۶ درصد صمغ سپستان، که بیشترین بازده ریزپوشانی را داشت، کمترین PI را نشان داد. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ نشان داد که افزایش EE در میکروکپسول‌های روغن شاهدانه با پکتین قهوه و مالتودکسترین، منجر به کاهش PI و بهبود پایداری اکسیداتیو روغن می‌شود [۵۰]. این موضوع به میزان روغن موجود روی سطح میکروکپسول‌ها مرتبط است؛ هر چه روغن سطحی بیشتر باشد، تشکیل پراکسید نیز افزایش می‌یابد.

شکل (۸) تغییرات شاخص پراکسید به عنوان نشانگری از پایداری اکسیداتیو PSO در حالت آزاد و ریزپوشانی شده طی ۳۰ روز نگهداری (۲۵°C)
Figure 8. Changes in peroxide value as an indicator of oxidative stability of PSO in free and encapsulated forms during 30 days of storage (25°C)

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم «کپسوله‌سازی پاک» با استفاده از CFG بومی و MD از طریق روش خشک‌کن پاششی برای PSO طراحی شد. فرمولاسیون حاوی ۶ درصد CFG به ایجاد میکروکپسول‌هایی با شکل کروی و کمترین میزان روغن سطحی انجامید که به‌طور مؤثر راندمان ریزپوشانی (EE) و بهبود پایداری اکسیداتیو PSO را افزایش داد. این فرمولاسیون توانست بخشی از شکاف‌های پژوهشی موجود در بهره‌برداری از ضایعات صنایع میوه و محدودیت‌های پایداری PSO را برطرف سازد و همسو با تقاضای روزافزون مصرف‌کنندگان برای محصولات طبیعی و بومی (GRAS) باشد. یافته‌ها نشان می‌دهند که فرمولاسیون بهینه نه تنها روشی پایدار و مؤثر برای بهره‌برداری از ضایعات کشاورزی است، بلکه این روش می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدار برای بهبود پایداری روغن هسته‌انار در صنایع غذایی مطرح شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب اعتبار ویژه پژوهشی به شماره پیگیری SCU.AA1403.585 قدردانی می‌نمایند. همچنین از آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل در اختیار قراردادن امکانات لازم جهت انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [1] da Silva, J. A. T., Rana, T. S., Narzary, D., Verma, N., Meshram, D. T., & Ranade, S. A. (2013). Pomegranate biology and biotechnology: A review. *Sci. Hortic.*, 160, 85-107.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.017>
- [2] Sarkhosh, A., Yavari, A. M., & Zamani, Z. (2020). *The pomegranate: botany, production and uses (1st ed.)*. Boston: CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789240764.0000>
- [3] Schubert, S. Y., Lansky, E. P., & Neeman, I. (1999). Antioxidant and eicosanoid enzyme inhibition properties of pomegranate seed oil and fermented juice flavonoids. *J. Ethnopharmacol.*, 66, 11-17.
[https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(98\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(98)00222-0)
- [4] Kaseke, T., Opara, U. L., & Fawole, O. A. (2020). Effect of microwave pretreatment of seeds on the quality and antioxidant capacity of pomegranate seed oil. *Foods*, 9, 1287. <https://doi.org/10.3390/foods9091287>
- [5] Fadavi, A., Barzegar, M., & Azizi, M. H. (2006). Determination of fatty acids and total lipid content in oilseed of 25 pomegranates varieties grown in Iran. *J. Food Compos. Anal.*, 19, 676-680.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.09.002>
- [6] Leyva-Porras, C., Román-Aguirre, M., Cruz-Alcantar, P., Pérez-Urizar, J. T., & Saavedra-Leos, M. Z. (2021). Application of antioxidants as an alternative improving of shelf life in foods. *Polysaccharides*, 2, 594-607.
<https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030036>

- [7] Cortez-Trejo, M., Wall-Medrano, A., Gaytán-Martínez, M., & Mendoza, S. (2021). Microencapsulation of pomegranate seed oil using a succinylated taro starch: Characterization and bioaccessibility study. *Food Biosci.*, 41, 100929. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100929>
- [8] Sharif, N., Khoshnoudi-Nia, S., & Jafari, S. M. (2020). Nano/microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis. *Food Res. Int.*, 132, 109077. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109077>
- [9] Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Res. Int.*, 40, 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- [10] Ng, S.-K., Jessie, L.-Y. L., Tan, C.-P., Long, K., & Nyam, K.-L. (2013). Effect of accelerated storage on microencapsulated kenaf seed oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 90, 1023-1029. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2249-5>
- [11] Roriz, C., Carochio, M., Heleno, S. A., Ferreira, I. C., & Barros, L. (2021). Stabilization of Bioactive Molecules Through the Spray-Drying Technique: Current Applications and Challenges. *Basic Protoc. Encapsul. Food Ingrid.*, 11-32. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1649-9_2
- [12] Tupuna, D. S., Paese, K., Guterres, S. S., Jablonski, A., Flôres, S. H., & de Oliveira Rios, A. (2018). Encapsulation efficiency and thermal stability of norbixin microencapsulated by spray-drying using different combinations of wall materials. *Ind. Crops Prod.*, 111, 846-855. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.001>
- [13] Otálora, M. C., Carriazo, J. G., Iturriaga, L., Nazareno, M. A., & Osorio, C. (2015). Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (*Opuntia ficus-indica*) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents. *Food Chem.*, 187, 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.090>
- [14] Sivalingam, P., Singh, D., & Chauhan, S. (2012). Morphological and molecular diversity of an underutilized fruit crop-*Cordia myxa* L. germplasm from the arid region of Rajasthan, India. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 59, 305-316. <https://doi.org/10.1007/s10722-011-9781-7>
- [15] Ghaba, Z. S., Ebeid, A. F., Soliman, W. S., & Gahory, A.-A. (2024). Enhancing *Cordia myxa* germination and seedling growth through breaking seeds dormancy techniques. *Aswan Univ. J. Sci. Technol.*, 4, 111-119. <https://doi.org/10.21608/aujst.2024.301084.1108>
- [16] Hojjati, M., & Beirami-Serizkani, F. (2020). Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of a novel water soluble polysaccharide from *Cordia myxa* fruits. *J. Food Meas. Charact.*, 14, 3417-3425. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00586-y>
- [17] Haq, M. A., Alam, M. J., & Hasnain, A. (2013). Gum *Cordia*: A novel edible coating to increase the shelf life of Chilgoza (*Pinus gerardiana*). *LWT – Food Sci. Technol.*, 50, 306-311. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.05.008>
- [18] Balasubramaniam, V., Lee, J., & Serventi, L. (2023). Understanding new foods: Development of next generation of food processing, packaging, and ingredients technologies for clean label foods. In: L. Serventi (Eds.). *Sustainable Food Innovation* (1st ed., pp. 157-167). Cham: Springer https://doi.org/10.1007/978-3-031-12358-0_12
- [19] Hussain, S., Mohamed, A. A., Alamri, M. S., Ibraheem, M. A., Qasem, A. A. A., Shahzad, S. A. (2020). Use of gum cordia (*Cordia myxa*) as a natural starch modifier; effect on pasting, thermal, textural, and rheological properties of corn starch. *Foods*, 9, 909. <https://doi.org/10.3390/foods9070909>
- [20] Macedo, J. P., Fernandes, L. L., Formiga, F. R., Reis, M. F., Nagashima Júnior, T., Soares, L. A. (2006). Micro-emultocrit technique: a valuable tool for determination of critical HLB value of emulsions. *AAPS PharmSciTech*, 7, 21. <https://doi.org/10.1208/pt070121>
- [21] Kamaruzaman, N., & Yusop, S. M. (2021). Determination of stability of cosmetic formulations incorporated with water-soluble elastin isolated from poultry. *J. King Saud Univ. Sci.*, 33, 101519. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101519>
- [22] Lee, Y.-K., Ganesan, P., Baharin, B. S., & Kwak, H.-S. (2015). Characteristics, stability, and release of peanut sprout extracts in powdered microcapsules by spray drying. *Dry. Technol.*, 33, 1991-2001. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.951123>
- [23] Jafari, S. M., He, Y., & Bhandari, B. (2007). Encapsulation of nanoparticles of d-limonene by spray drying: role of emulsifiers and emulsifying techniques. *Dry. Technol.*, 25, 1069-1079. <https://doi.org/10.1080/07373930701396758>
- [24] Di Giorgio, L., Salgado, P. R., & Mauri, A. N. (2019). Encapsulation of fish oil in soybean protein particles by emulsification and spray drying. *Food Hydrocoll.*, 87, 891-901. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.024>
- [25] Yekdane, N., & Goli, S. A. H. (2019). Effect of pomegranate juice on characteristics and oxidative stability of microencapsulated pomegranate seed oil using spray drying. *Food Bioproc. Technol.*, 12, 1614-1625. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02325-8>

- [26] Cihat Icyer, N., Toker, O. S., Karasu, S., Tornuk, F., Kahyaoglu, T., & Arici, M. (2017). Microencapsulation of fig seed oil rich in polyunsaturated fatty acids by spray drying. *J. Food Meas. Charact.*, 11, 50-57. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9370-8>
- [27] Mirhosseini, H., Tan, C. P., Hamid, N. S., & Yusof, S. (2008). Optimization of the contents of Arabic gum, xanthan gum and orange oil affecting turbidity, average particle size, polydispersity index and density in orange beverage emulsion. *Food Hydrocoll.*, 22, 1212-1223. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.06.011>
- [28] Kupikowska-Stobba, B., Domagała, J., & Kasprzak, M. M. (2024). Critical review of techniques for food emulsion characterization. *Appl. Sci.*, 14, 1069. <https://doi.org/10.3390/app14031069>
- [29] Som, A. M., Balang, E. M., & Hamid, H. A. A. (2023). Comparative study and performance evaluation of chemical and biosurfactants in water-in-oil emulsification process. *Key Eng. Mater.*, 939, 93-102. <https://doi.org/10.4028/p-y8fry2>
- [30] Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocoll.*, 17, 25-39. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00120-5)
- [31] Chang, H. W., Tan, T. B., Tan, P. Y., Abas, F., Lai, O. M., Wang, Y. (2018). Physical properties and stability evaluation of fish oil-in-water emulsions stabilized using thiol-modified β -lactoglobulin fibrils-chitosan complex. *Food Res. Int.*, 105, 482-491. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.034>
- [32] Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y., & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Dry. Technol.*, 26, 816-835. <https://doi.org/10.1080/07373930802135972>
- [33] Drusch, S. (2007). Sugar beet pectin: A novel emulsifying wall component for microencapsulation of lipophilic food ingredients by spray-drying. *Food Hydrocoll.*, 21, 1223-1228. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.08.007>
- [34] Saifullah, M., Yusof, Y., Chin, N., & Aziz, M. (2016). Physicochemical and flow properties of fruit powder and their effect on the dissolution of fast dissolving fruit powder tablets. *Powder Technol.*, 301, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.035>
- [35] de Barros Fernandes, R. V., Borges, S. V., Silva, E. K., da Silva, Y. F., de Souza, H. J. B., do Carmo, E. L. (2016). Study of ultrasound-assisted emulsions on microencapsulation of ginger essential oil by spray drying. *Ind. Crops Prod.*, 94, 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.010>
- [36] Šavikin, K., Nastić, N., Janković, T., Bigović, D., Miličević, B., Vidović, S. (2021). Effect of type and concentration of carrier material on the encapsulation of pomegranate peel using spray drying method. *Foods*. 10, 1968. <https://doi.org/10.3390/foods10091968>
- [37] Sekhavatizadeh, S. S., Ganje, M., Hashemi, S. S., & Mozafarian, M. R. (2025). Encapsulation of bioactive compounds from *Sargassum ilicifolium*: Influence of wall material type and loading content on the physicochemical and structural properties of microparticles. *Heliyon*. 11, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41652>
- [38] Carneiro, H. C., Tonon, R. V., Grosso, C. R., & Hubinger, M. D. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *J. Food Eng.*, 115, 443-451. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.033>
- [39] Anandharamakrishnan, C. (2015). *Spray drying techniques for food ingredient encapsulation ed.*). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118863985>
- [40] Rashid, R., Wani, S. M., Manzoor, S., Masoodi, F., & Altaf, A. (2022). Nanoencapsulation of pomegranate peel extract using maltodextrin and whey protein isolate. Characterisation, release behaviour and antioxidant potential during simulated invitro digestion. *Food Biosci.*, 50, 102135. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102135>
- [41] Bhat, S., Saini, C., Kumar, V., & Sharma, H. (2021). Spray drying of bottle gourd juice: effect of different carrier agents on physical, antioxidant capacity, reconstitution, and morphological properties. *ACS Food Sci. Technol.*, 1, 282-291. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.0c00041>
- [42] Parvez, S., Wani, I. A., & Masoodi, F. (2022). Nanoencapsulation of green tea extract using maltodextrin and its characterisation. *Food Chem.*, 384, 132579. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132579>
- [43] Hojjati, M., Razavi, H., Rezaei, K., & Gilani, K. (2013). Effect of wall components on characteristics of natural canthaxanthin microencapsulated using spray-drying. *Iran. J. Nutr. Sci. Food Technol.*, 8, 45-54. [In Persian].
- [44] Barbosa, M., Borsarelli, C., & Mercadante, A. (2005). Light stability of spray-dried bixin encapsulated with different edible polysaccharide preparations. *Food Res. Int.*, 38, 989-994. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.018>
- [45] McClements, D. J. (2007). Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. *Critical reviews in food science and nutrition*. 47, 611-649. <https://doi.org/10.1080/10408390701289292>
- [46] Benelli, L., & Oliveira, W. P. (2019). Fluidized bed coating of inert cores with a lipid-based system loaded with a polyphenol-rich *Rosmarinus officinalis* extract. *Food Bioprod. Process.*, 114, 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.01.004>

- [47] Yun, P., Devahastin, S., & Chiewchan, N. (2021). Microstructures of encapsulates and their relations with encapsulation efficiency and controlled release of bioactive constituents: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 20, 1768-1799. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12701>
- [48] Fang, X., Shima, M., & Adachi, S. (2005). Effects of drying conditions on the oxidation of linoleic acid encapsulated with gum arabic by spray-drying. *Food Sci. Technol. Res.*, 11, 380-384. <https://doi.org/10.3136/fstr.11.380>
- [49] Nayak, P. K., Dash, U., Rayaguru, K., & Krishnan, K. R. (2016). Physio-chemical changes during repeated frying of cooked oil: A Review. *J. Food Biochem.* 40, 371-390. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12215>
- [50] Kahraman, O., Petersen, G. E., & Fields, C. (2025). Valorization of Coffee Pulp: Spray-Dried Hemp Oil Microcapsules Stabilized with Coffee Pectin and Maltodextrin. *Sustainability.* 17, 8152. <https://doi.org/10.3390/su17188152>

Research Article

Spray-drying microencapsulation of pomegranate seed oil with Cordia gum fruit and maltodextrin: Physicochemical and oxidative stability

Mohammad Hooshyari¹, Mohammad Reza Fat'hi Emadabadi², Hassan Zaki Dizaji^{3*}

¹PhD candidate, Chemistry Dept., Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

²Professor, Chemistry Dept., Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

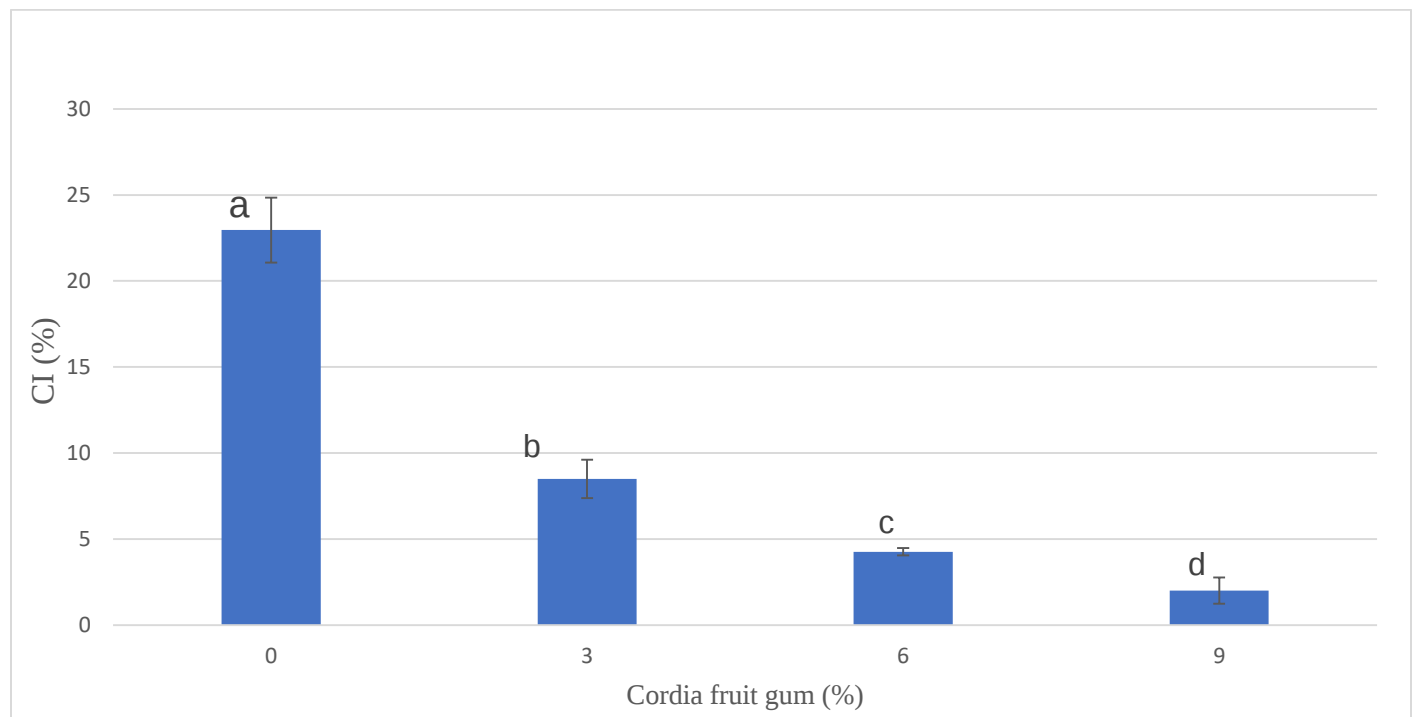
^{3*}Associate Professor, Biosystems Engineering Dept., Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Corresponding author' email: hzakid@scu.ac.ir

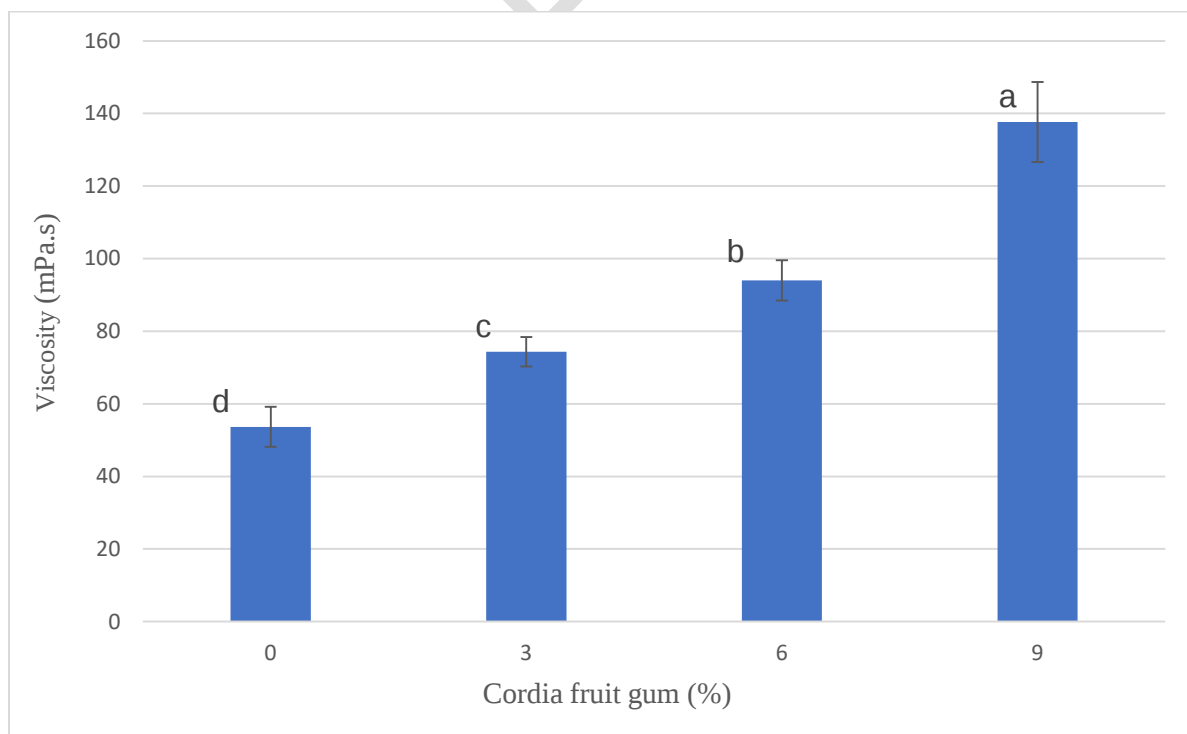
Abstract

Despite the low antioxidant activity of pomegranate seeds, pomegranate seed oil (PSO) has very high antioxidant activity but is unstable. In this study, PSO was microencapsulated with natural materials and a clean label by spray drying. For this purpose, walls with different concentrations of cordia fruit gum (CFG) and maltodextrin were used. The creaming index of the emulsions was measured and, their physicochemical and oxidative stability properties were investigated. The results showed that microcapsules prepared by spray drying with a 6% CFG ratio had the highest encapsulation efficiency (88.11%), the smallest particle size (124.1 μm), the highest bulk density (0.38 g/cm^3), the highest sphericity, and the highest oxidative stability. All the microcapsules' moisture contents fell below the 4% threshold that is considered acceptable for dry powders in the food sector. This study showed that using the microencapsulation as a clean-label technology (CL) system, it is possible to add value to pomegranate processing waste, thereby providing a sustainable method for using natural and indigenous ingredients that are generally recognized as safe (GRAS) in the food industry and an effective solution to solve the problem of oxidative stability of PSO.

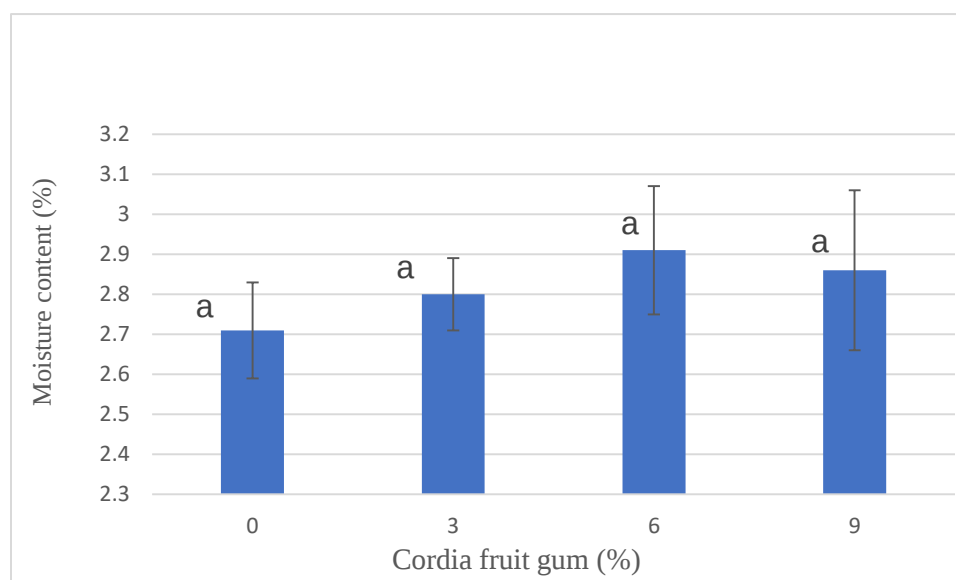
Keywords: Pomegranate seed oil, Cordia fruit gum, clean label, spray drying, oxidative stability



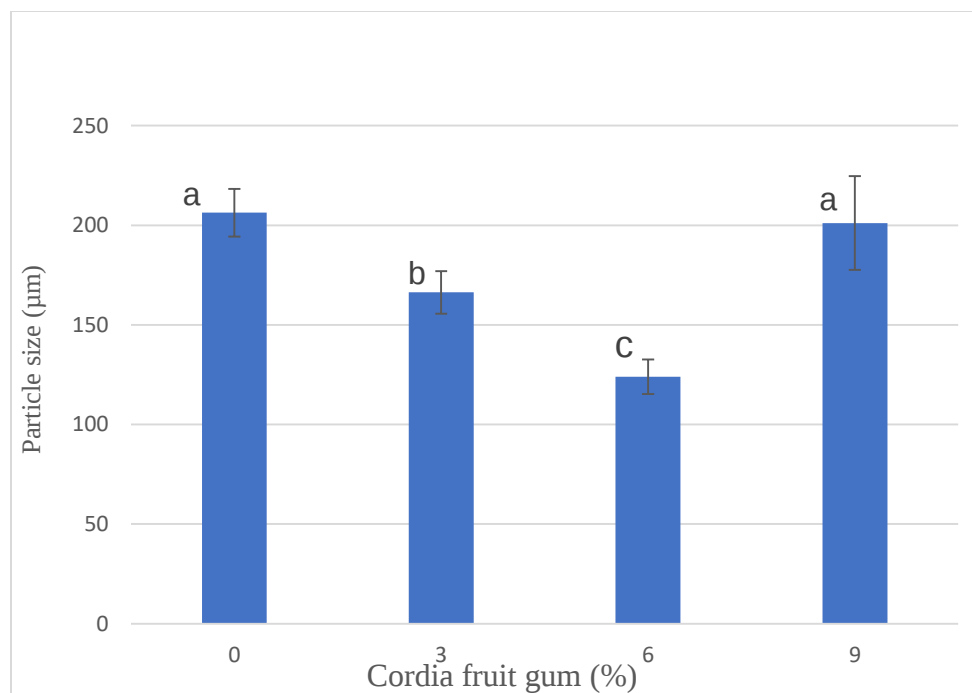
شکل (۱) اثر غلظت CFG بر شاخص خامه‌ای شدن امولسیون‌های حاوی PSO
Figure 1. Effect of CFG concentration on the creaming index (CI) of PSO emulsions



شکل (۲) اثر غلظت CFG بر ویسکوزیته امولسیون‌های حاوی PSO
Figure 2. Effect of CFG concentration on the viscosity of PSO emulsions

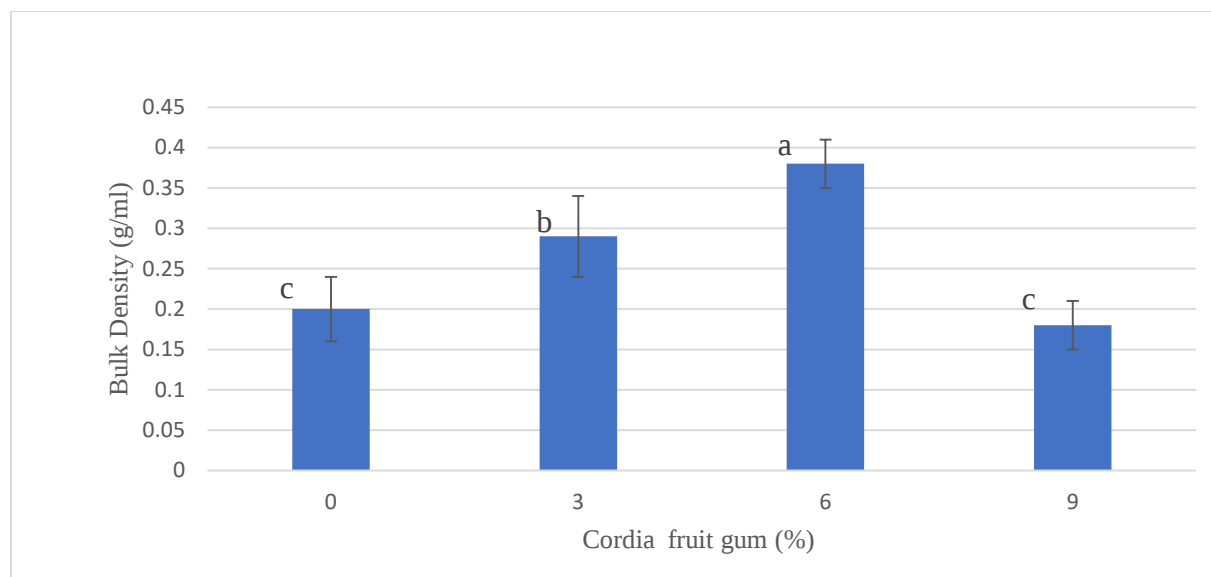


شکل (۳) اثر غلظت CFG بر محتوای رطوبت ریزکپسول های PSO
Figure 3. Effect of CFG concentration on the moisture content of PSO microcapsules

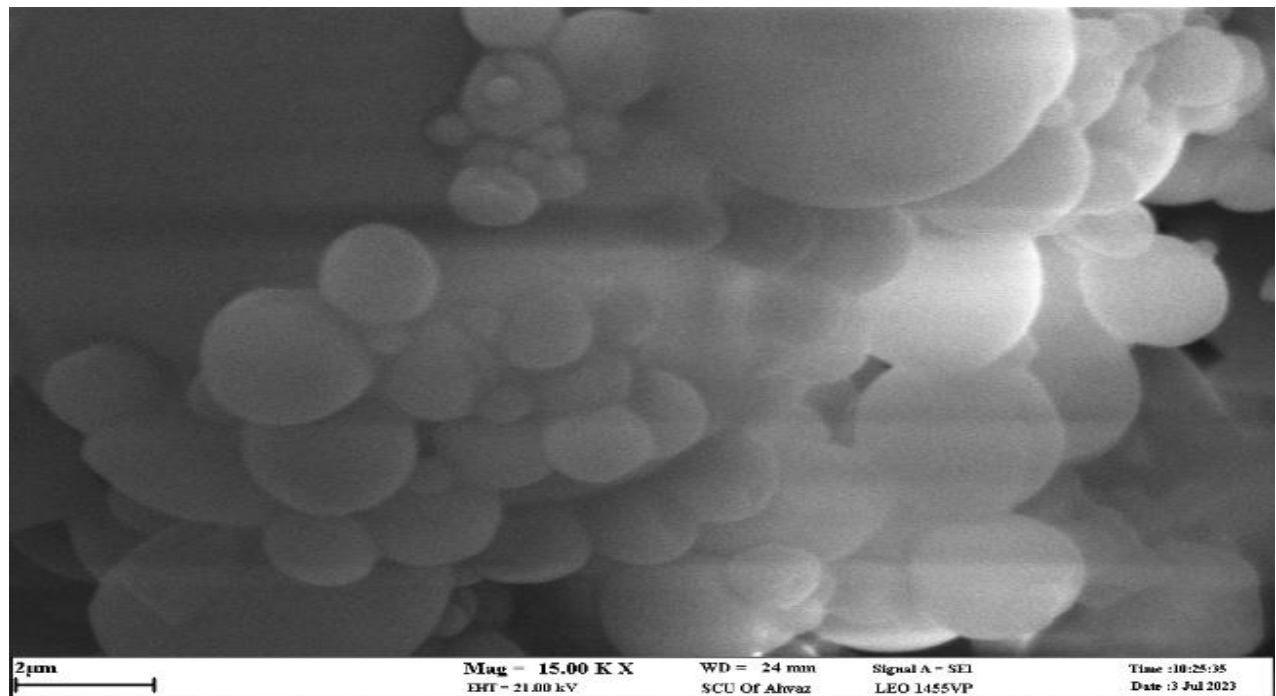


شکل (۴) اثر غلظت CFG بر اندازه ذرات ریزکپسول های PSO

Figure 4. Effect of CFG concentration on the particle size of PSO microcapsules

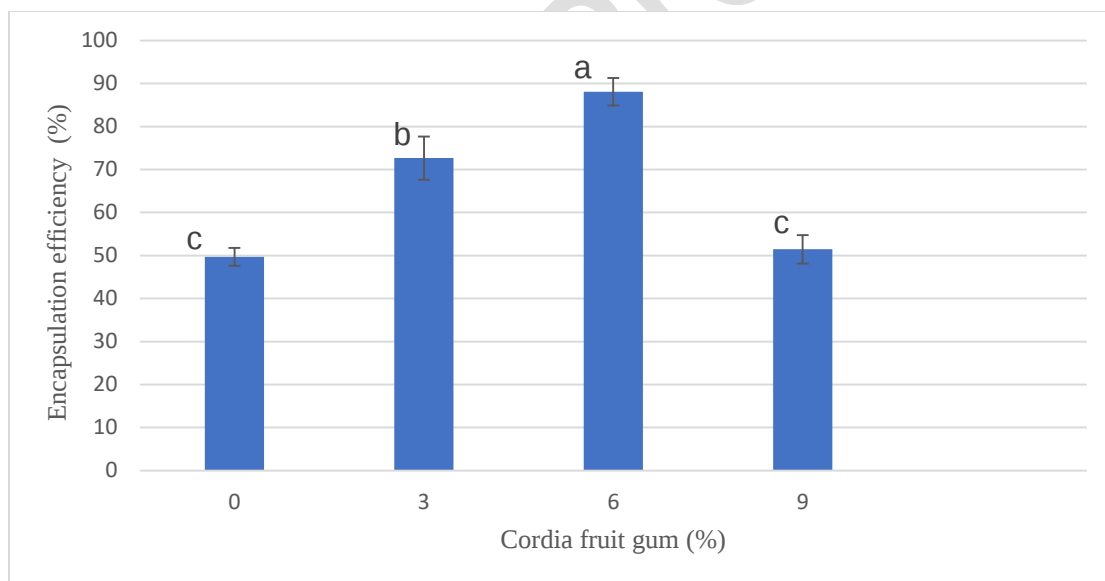


شکل (۵) اثر غلظت CFG بر چگالی توده ریزکپسول های PSO
Figure 5. Effect of CFG concentration on the bulk density of PSO microcapsules



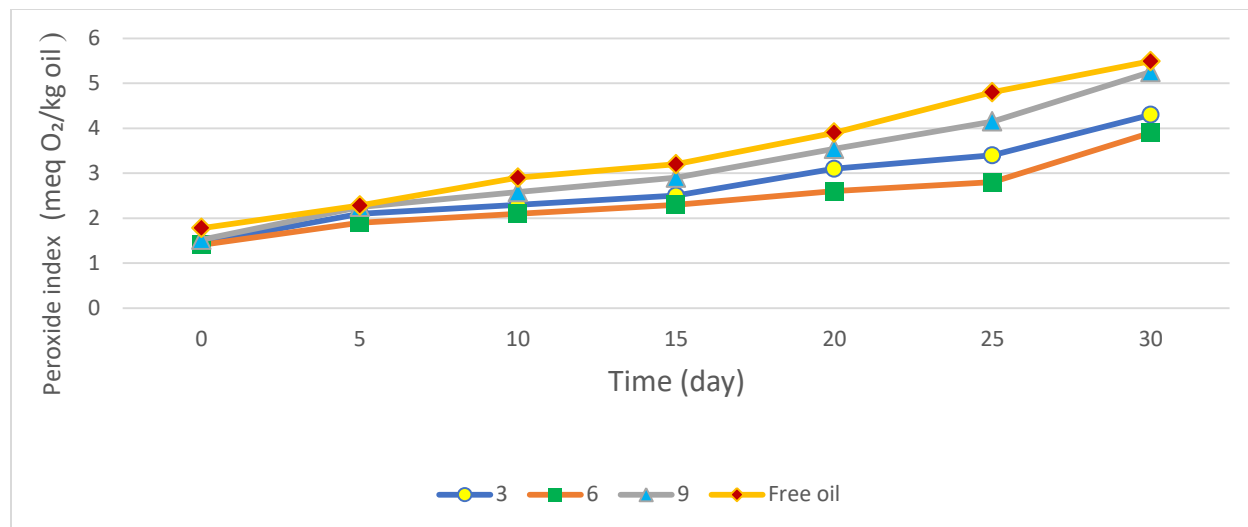
شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ریزکپسول‌های حاوی PSO با مواد دیواره‌ای شامل ۶٪ CFG و MD در بزرگنمایی ۱۵K

Figure (6) SEM image of PSO microcapsules with wall materials of 6% CFG and MD at 15 K magnification



شکل (۷) اثر غلظت CFG بر بازده ریزپوشانی ریزکپسول‌های PSO

Figure 7. Effect of CFG concentration on the encapsulation efficiency of PSO microcapsules



شکل (۸) تغییرات شاخص پراکسید به عنوان نشانگری از پایداری اکسیداتیو PSO در حالت آزاد و ریزپوشانی شده طی ۳۰ روز نگهداری
Figure 8. Changes in peroxide value as an indicator of oxidative stability of PSO in free and encapsulated forms during 30 days of storage

جدول (۱). تیمارهای آزمایشی برای ریزپوشانی روغن هسته انار با استفاده از مالتودکسترین و صمغ میوه سپستان

Table 1. Experimental treatments to encapsulation of PSO by MD and CFG

Treatments	Wall materials (g)		Core materials (g)
	CFG	Maltodextrin	PSO
1	0	20	5
2	3	17	5
3	6	14	5
4	9	11	5

Extended Abstract**Spray-drying microencapsulation of pomegranate seed oil with Cordia gum fruit and maltodextrin: Physicochemical and oxidative stability**

Introduction: Pomegranate (*Punica granatum* L.) is the oldest sacred fruit, known as the "jewel of winter," and originated in India and Iran. It belongs to the Punicaceae family and is known locally as Anar. Pomegranate seeds are discarded in vast quantities by the fruit processing industry, polluting the environment. Given the valuable characteristics of pomegranate seed oil (PSO) and the enormous number of seeds produced as byproducts during juice and concentrate preparation, better uses for these seeds can be identified rather than disposal. One such use is the extraction of oil from seeds for use in the food industry. However, PSO's limited oxidative stability precludes its direct application in food products. In this regard, encapsulation can be considered an alternative approach to overcome this limitation. Spray drying is a cheap, adaptable, flexible, reproducible, rapid encapsulation method with readily available equipment. Additionally, its short contact time (5–30 seconds) at high temperatures makes it helpful in encapsulating heat-sensitive materials like oils. There is a significant research gap in the use of natural and clean-label materials for the microencapsulation of PSO in food applications. This subject is of great importance to the food industries, as they face increasing consumer pressure to produce products with natural and clean labels. In this study, PSO was encapsulated using cordia fruit gum (CFG), a natural and indigenous material, and maltodextrin via spray drying; their physicochemical and oxidative stability properties were investigated.

Materials and methods: After extracting CFG from fresh fruits, emulsions with a total solids content (TSC) of 20% (w/v) were prepared. The ratio of PSO to wall materials was considered 1:4. Maltodextrin (MD) solutions containing different amounts of CFG were prepared at concentrations of 0, 3, 6, and 9% by weight. The creaming index of the emulsions was measured. Then, microcapsules were produced by spray drying. To achieve the best formulation, various properties of the microcapsules, including moisture content, particle size, encapsulation efficiency, bulk density, peroxide value, and surface morphology, were evaluated using scanning electron microscopy (SEM). The mean differences among treatments were analyzed using one-way ANOVA, and significant differences were further evaluated by Duncan's multiple range test. Statistical analyses were performed using SPSS software (version 27.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA), with a significance level set at $p < 0.05$.

Results and discussion: With the highest encapsulation efficiency (88.11%), smallest particle size (124.1 μm), highest bulk density (0.38 g/cm^3), greatest sphericity, and highest oxidative stability, the microcapsules made with 6% CFG were found to be the best in terms of quality. All of the microcapsules' moisture contents fell below the 4% threshold that is considered acceptable for dry powders in the food sector.

Conclusion: In this study, spray drying was used to microencapsulate PSO using native CFG and MD. The formulation containing 6% CFG demonstrated the best performance in terms of microencapsulation efficiency, decrease of surface oil, and improvement of oxidative stability. It was developed as a clean-label technology based on native materials to boost the stability of PSO in the food business.