

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 فتحی 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 اهواز

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵)

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 کرویت 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، خشک‌کردن پاششی، پایداری اکسیداتیو.

۱. مقدمه

مستقیم روغن هسته انار در محصولات غذایی را محدود می‌کند. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های 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 می‌شود [۶]. در این راستا، ریزپوشانی به عنوان روش مؤثری برای غلبه بر این مشکل در نظر گرفته می‌شود [۷]. ریزپوشانی^۵ روشی برای تولید ذراتی با توزیع اندازه $1 \mu\text{m}$ تا $5000 \mu\text{m}$ است که طی آن ماده (هسته)^۶ درون یک ماتریس پیوسته از مواد پلیمری (دیواره)^۷ به دام انداخته می‌شود تا در برابر شرایط نامطلوب محیطی حفاظت شود [۸]. خشک کردن پاششی^۸ یکی از روش‌های ریزپوشانی است که در آن محلول، امولسیون یا سوسپانسیون با پاشش در جریان گاز داغ (معمولاً هوا) به پودر تبدیل می‌شود [۹]. این روش برای ریزپوشانی روغن‌ها 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 گسترده‌ای در زمینه علوم مواد، شیمی و زیست‌شناسی نیاز دارد. ترکیب دو ماده دیواره‌ای می‌تواند راندمان ریزپوشانی و پایداری را، نسبت به سیستم‌های تک‌دیواره، بهبود بخشد [۱۲]. مالتودکسترین^۹ ماده‌ای ارزان قیمت است که از نشاسته به دست می‌آید. به دلیل طعم خنثی، ظرفیت بالای محافظت در برابر اکسیداسیون، ارزانی و ویسکوزیته پایین در غلظت‌های بالا، کاربرد گسترده‌ای، به عنوان پوسته، در خشک کردن پاششی دارد [۱۳].

سپستان (*Cordia myxa* L.) درختی است گلدار از خانواده گاوزبانیان (Boraginaceae) است که در نواحی نیمه‌گرمسیری و گرمسیری بخش‌هایی از آسیا، استرالیا و آفریقا رشد می‌کند [۱۴]. این درخت در جنوب ایران، به صورت طبیعی رشد و

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، به ویژه بخش‌هایی از ایران بوده و از آنجا به سایر نقاط جهان گسترش یافته است [۱]. هند با سهم حدود ۴۰٪، بزرگ‌ترین تولیدکننده جهانی انار است. ایران با سهم حدود ۱۵٪، در رتبه سوم پس از چین قرار دارد [۲]. اگرچه هسته‌های انار فعالیت آنتی‌اکسیدانی پایینی دارند، روغن هسته انار^۱ (PSO) از فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی برخوردار است؛ به گونه‌ای که نتایج یک پژوهش نشان داد که فعالیت آنتی‌اکسیدانی روغن هسته انار سطحی مشابه چای سبز دارد [۳]. دانه‌های انار حاوی ۱۲ تا ۲۰٪ روغن (بر اساس وزن خشک) و سرشار از ترکیبات زیست‌فعال، مانند اسید پونیسیک^۲، توکوفرول‌ها، فنول‌ها، استرول‌ها و کاروتنوئیدها، هستند؛ وجود این ترکیبات باعث فعالیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی در روغن هسته انار می‌شود [۴]. بنابراین، با توجه به خواص PSO و مقادیر زیاد هسته‌های تولیدشده به عنوان محصول جانبی از تولید آب میوه و کنسانتره، می‌توان، به جای دفن یا استفاده به عنوان خوراک دام، کاربردهای بهتری برای آن‌ها پیدا کرد. استخراج روغن و استفاده از آن در صنایع غذایی و دارویی یکی از موارد استفاده از این دانه‌ها 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^۳ (۳۱/۸ - ۸۶/۶٪) و اسید لینولئیک^۴ (۲۴/۴ - ۰/۷٪) دارد [۵]. وجود این اسیدهای چرب با پیوندهای دوگانه، علت اصلی ناپایداری اکسیداتیو بالا و فساد روغن هسته انار محسوب می‌شود و در نتیجه استفاده

5. Microencapsulation

6. Core

7. Wall

8. Spray-drying

9. Maltodextrin

1. Pomegranate seed oil

2. punicic acid

3. linolenic acid

4. linoleic acid

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^۴ خالص خارج شدند و گوشته به مدت ۶۰ دقیقه با آب مقطر به نسبت ۳:۱ مخلوط شد. این مخلوط با کمک پارچه موسلین^۵ فیلتر و سپس با نیروی گریز از مرکز (۱۰۰۰×g) به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. مایع لزوج 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 دمای ۴ °C یخچال نگهداری شد [۱۹].

۲.۲. آماده‌سازی امولسیون‌ها

امولسیون‌ها با محتوای کل جامد^۶ (TSC) برابر با ۲۰٪ 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^۷، ایران) و مواد دیواره‌ای استفاده شد. محلول‌های مالتودکسترین (۲۰-DE=۱۸، گلشهد، ایران) حاوی ۰، ۳، ۶ و ۹٪ 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 به تدریج 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 در دمای ۴ °C یخچال نگهداری شدند.

گسترش یافته است [۱۵]. حجتی و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی پلی‌ساکارید محلول در آب استخراج‌شده از میوه سپستان^۱ پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد این پلی‌ساکارید با ساختار هتروپلی‌ساکاریدی عمدتاً شامل گلوکز، فروکتوز، ساکاروز، مالتوز و ریبوز است. وجود گروه‌های عاملی فعال، مانند OH- و C=O، موجب بروز فعالیت آنتی‌اکسیدانی قوی و خاصیت آنتی‌باکتریایی مؤثر در این ترکیب شد. بر این اساس، پژوهشگران پیشنهاد کردند که پلی‌ساکارید استخراج‌شده از میوه سپستان می‌تواند به‌عنوان ترکیب طبیعی با خواص آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌باکتریال در صنایع غذایی و دارویی به‌کار رود [۱۶]. در پژوهشی دیگر صمغ کوردیا به‌عنوان پوشش خوراکی برای دانه‌های کاج به‌کار گرفته شد که، ضمن افزایش ماندگاری، نقش مؤثری در محافظت در برابر اکسایش ایفا کرد [۱۷].

مصرف‌کنندگان مدرن خواهان غذاهای فرآوری‌شده بدون افزودنی‌ها و نگهدارنده‌های مصنوعی هستند. اصطلاح (برچسب پاک)^۲ برای توصیف چنین محصولاتی به کار می‌رود [۱۸].

شکاف تحقیقاتی قابل‌توجهی در استفاده از مواد طبیعی با برچسب پاک در میکروکپسوله‌کردن 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 به‌روش خشک‌کن پاششی کپسوله شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تهیه صمغ میوه سپستان^۳ (CFG)

میوه سپستان از درختان واقع در استان خوزستان، شهرستان اهواز، واقع در دانشکده کشاورزی در اواسط فصل

4. Pulp
5. muslin
6. Total solids content
7. Arka Chem

1. Cordia myxa
2. Clean label
3. Cordia myxa fruit gum

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

با استفاده از اسپیندل^۵ 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^۶

محتوای رطوبت پودر میکروکپسول با استفاده از روش خشک‌کردن در آون تعیین شد [۲۲]. برای این منظور، ۱ g از نمونه در یک شیشه توزین قرار داده شد و برای رسیدن به وزن ثابت، به مدت ۳ تا ۴ ساعت در دمای ۱۰۵ °C 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:

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

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

۲.۵.۲. اندازه ذرات^۷

توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش پراکندگی نور دینامیکی^۸ (DLS) با کمک دستگاه ZS ۵۰۱ از برند مالورن^۹ اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌های در دمای ۲۵ °C و در زاویه پراکندگی ۹۰ °C انجام گرفت.

۳.۲. نحوه تهیه میکروکپسول‌ها به روش خشک‌کردن پاششی

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

۴.۲. مشخصه‌یابی امولسیون^۱

۱.۴.۲. شاخص خامه‌ای شدن^۲

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

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

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

۲.۴.۲. اندازه‌گیری ویسکوزیته^۳

از ویسکومتر^۴ دوران دیجیتال Brookfield DV-11+Pro

برای تعیین ویسکوزیته امولسیون‌ها استفاده شد. ویسکوزیته

4. Viscometer

5. Spindle

6. Moisture content

7. Particle size

8. Dynamic light scattering

9. Malvern

1. Emulsion characterization

2. Creaming index

3. Viscosity

۳.۵.۲. درصد بازده درون پوشانی^۱

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

$$EE (\%) = (TO - SO) / TO \times 100\% \quad (3)$$

که در آن TO محتوای روغن کل و SO 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 ml Hex اضافه شد و مخلوط به مدت ۳ دقیقه در دمای اتاق (۲۰°C) 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 ml Hex تازه شستشو داده شد. پس از آن، حلال باقی‌مانده در پودر در دمای ۶۰°C تبخیر شد تا پودر به وزن ثابت رسید. مقدار روغن آزاد استخراج‌شده از طریق اختلاف وزن پودر در دو حالت محاسبه شد [۲۴]. محتوای روغن کل به‌طور نظری محاسبه شد [۲۵].

۴.۵.۲. چگالی توده^۴

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

$$\text{Bulk Density (g/ml)} = M / V \quad (4)$$

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

۵.۵.۲. شاخص پراکسید^۵

شش میلی‌لیتر محلول اسید استیک: کلروفرم (۳:۲، حجمی/حجمی) به ۱ gμC حاوی PSO اضافه شد. سپس ۱ ml 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 ml آب مقطر افزوده شد و محلول حاصل با محلول ۰/۰۰۲ نرمال تیوسولفات سدیم (Na₂S₂O₃) تیترا شد. از محلول نشاسته ۱٪ وزنی-حجمی به‌عنوان شناساگر استفاده شد. همین روش برای ۰/۰۲ g PSO آزاد برای مقایسه به‌کار رفت [۲۶].

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

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^۶

تمام اندازه‌گیری‌ها سه بار تکرار شدند. تمامی مقادیر به‌صورت انحراف معیار (SD) ± میانگین تفاوت‌های معنادار بین تیمارها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) شناسایی شد. در صورت وجود تفاوت، مقایسه پس از آزمون میانگین‌ها با استفاده از آزمون دامنه‌ای چندگانه دانکن^۷ انجام شد. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار 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. ویژگی‌های امولسیون

۱.۱.۳. شاخص خامه‌ای

شاخص خامه‌ای، به‌صورت غیرمستقیم، اطلاعات مهمی در مورد میزان تجمع قطرات و ویسکوزیته امولسیون نشان

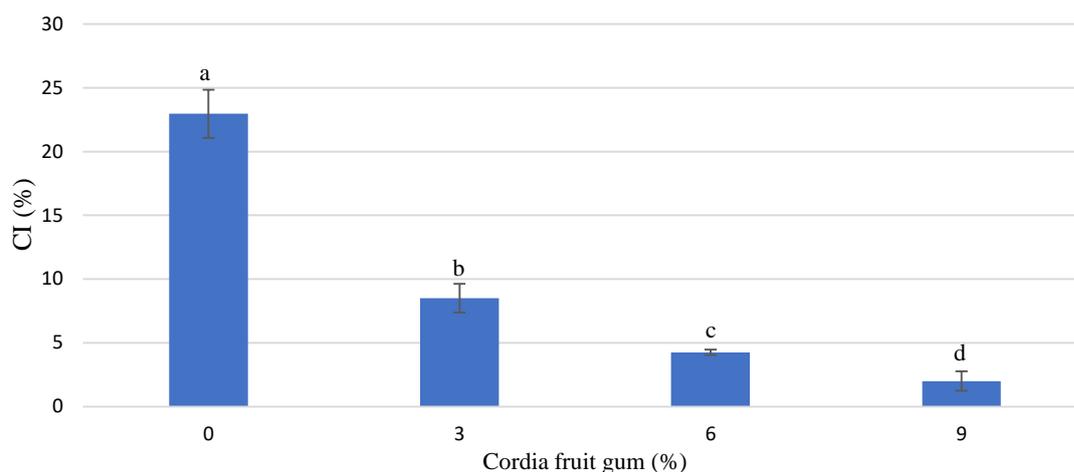
5. Peroxide index
6. Statistical analysis
7. Duncan's Multiple Range Test

1. Encapsulation efficiency percentage
2. Total oil
3. Surface oil
4. Bulk density

صمغ سپستان میزان پایداری امولسیون افزایش معناداری یافته است. به عبارت دیگر، کمترین شاخص خامه‌ای شدن و بالاترین پایداری مربوط به امولسیون حاوی ۹٪ 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].

می‌دهد [۲۷]. ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون‌ها 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 گرانشی امولسیون ایفا می‌کند؛ برای مثال، افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته موجب کاهش حرکت قطرات می‌شود و بدین ترتیب از بروز پدیده‌هایی مانند خامه‌ای شدن یا ته‌نشینی جلوگیری می‌کند [۲۸].

پایداری بیشتر با شاخص خامه‌ای شدن (CI) پایین‌تر نشان داده می‌شود که معیاری از میزان جداسازی فاز در امولسیون‌ها است [۲۹]. درصد شاخص خامه‌ای شدن امولسیون‌ها بر حسب غلظت CFG در شکل (۱) ترسیم شده است که معنادار بودن این شاخص را در درصد‌های متفاوت از صمغ سپستان نشان می‌دهد ($P < 0.05$). با افزایش درصد



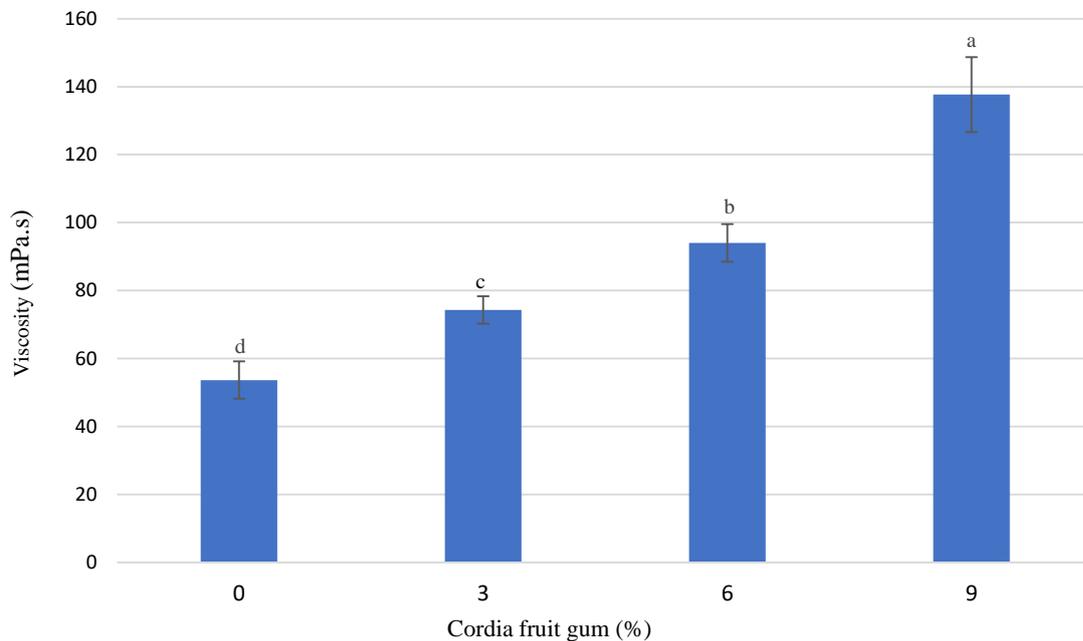
شکل (۱). اثر غلظت CFG بر شاخص خامه‌ای شدن امولسیون‌های حاوی PSO
Fig. 1. Effect of CFG concentration on the creaming index (CI) of PSO emulsions

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 ازدست رفتن ترکیبات فرار کاهش می‌یابد. با این حال، ویسکوزیته بیش از حد می‌تواند بازده حفظ روغن را کاهش دهد؛ زیرا تشکیل قطرات

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].

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.



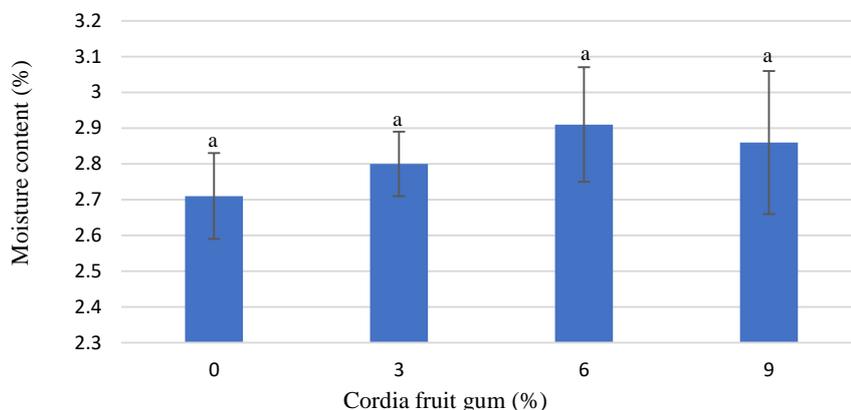
شکل (۲). اثر غلظت CFG بر ویسکوزیته امولسیون‌های حاوی PSO
Fig. 2. Effect of CFG concentration on the viscosity of PSO emulsions

پاششی یکسان برای تمامی گروه‌ها هیچ تفاوت معنادار آماری در محتوای رطوبت مشاهده نشد (شکل ۳). بنابراین روش خشک کردن به طور 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 تهیه شده با روش خشک کردن پاششی در محدوده ۱ تا ۲٪ قرار دارد و این مقدار تحت تأثیر نوع ماده دیواره‌ای قرار نمی‌گیرد [۳۸].

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٪ است [۳۷]. تمامی امولسیون‌های خشک شده به روش اسپری در این پژوهش، مقادیر قابل‌قبولی برای این معیار کیفی داشتند (۳/۱۳-۲/۷۱٪). در این مطالعه، با اعمال شرایط خشک کردن

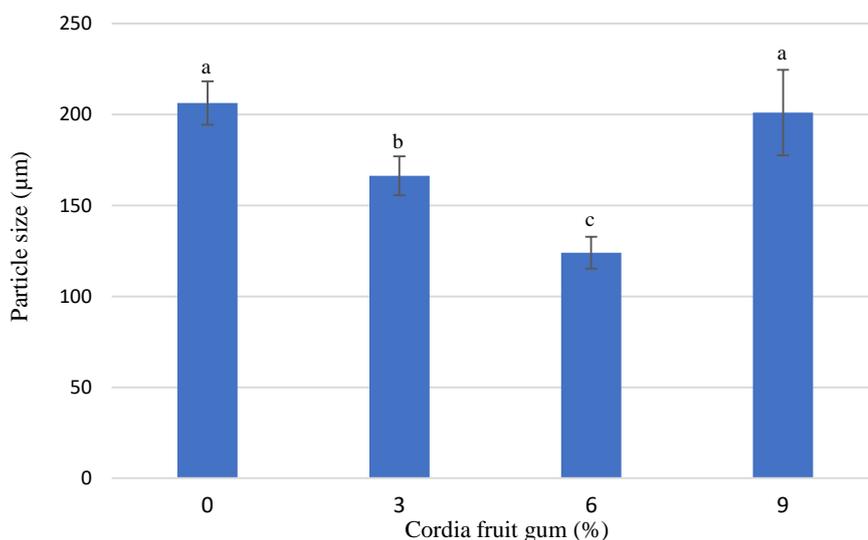


شکل (۳). اثر غلظت CFG بر محتوای رطوبت ریزکپسول‌های PSO
Fig. 3. Effect of CFG concentration on the moisture content of PSO microcapsules

کوچک‌تر را تأمین می‌کند، اما امولسیون‌های ویسکوز معمولاً در برابر این انرژی مقاومت می‌کنند و مانع تشکیل ذرات کوچک می‌شوند [۳۹]. همچنین به نظر می‌رسد امولسیون ۰٪ به علت ویسکوزیته پایین از انسجام کافی به‌منظور پاشش مناسب در فرآیند خشک‌کردن پاششی برخوردار نیست.

۲.۲.۳. اندازه ذرات

ترکیب شیمیایی، فرآیند امولسیون‌سازی و شرایط خشک‌کردن تأثیر زیادی بر اندازه ذرات دارند. بر اساس شکل ۴، بیشترین اندازه ذرات مربوط به امولسیون‌های ۰٪ با کمترین ویسکوزیته و ۹٪ با بیشترین ویسکوزیته بود. گرچه فرآیند اتمیزاسیون انرژی لازم برای شکست قطرات به ذرات



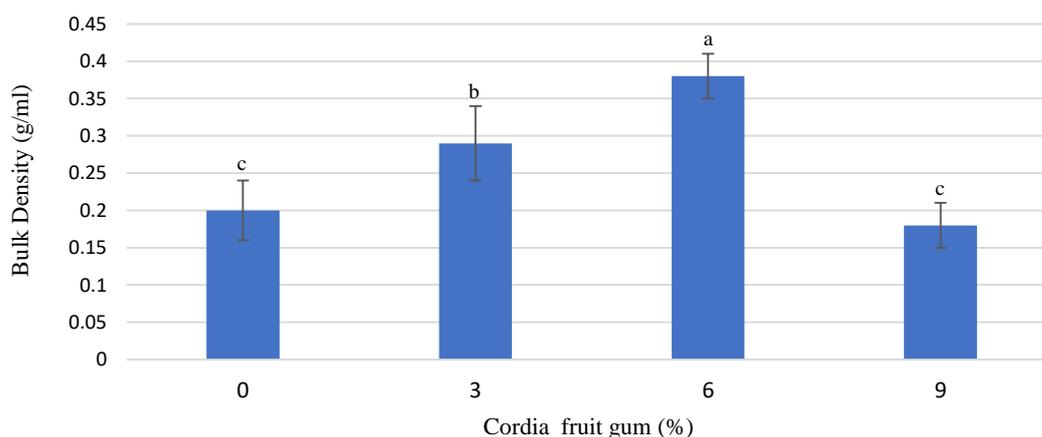
شکل (۴). اثر غلظت CFG بر اندازه ذرات ریزکپسول‌های PSO
Fig. 4. Effect of CFG concentration on the particle size of PSO microcapsules

۳.۲.۳. چگالی توده

بررسی کردند، کاهش چگالی توده‌ای در حضور ترکیب حامل‌ها را به تشکیل ذرات بزرگ‌تر و افزایش تعداد فضاهای خالی بین‌ذره‌ای نسبت دادند [۴۱].

براساس شکل (۵) با توجه به این‌که اندازه ذرات پودر حاوی ۶٪ کوچک‌تر از سایر نمونه‌ها بود و اختلاف معناداری در میزان رطوبت مشاهده نشد، چگالی توده‌ای بالاتر این پودر را می‌توان عمدتاً به اندازه ذرات کوچک‌تر آن نسبت داد. معمولاً پودرهایی با چگالی حجمی بالاتر برای ذخیره‌سازی انتخاب می‌شوند؛ زیرا فضای هوایی کمتری بین ذرات وجود خواهد داشت که در نهایت به کاهش اکسیداسیون ماده اصلی و در نتیجه بهبود پایداری ذخیره‌سازی کپسوله‌های پودری کمک می‌کند [۴۲].

چگالی توده، به‌عنوان یک پارامتر اقتصادی و کاربردی، نقش مهمی در ارزیابی کیفیت ذرات پودر دارد و به‌عنوان شاخصی کلیدی برای سنجش سهولت در فرآیندهای فرآوری، بسته‌بندی، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی پودرها شناخته می‌شود [۴۰]. در فرآیند خشک‌کردن پاششی، تمیزه‌سازی محلول ورودی موجب بهبود فرآیند انتقال حرارت و جداسازی سریع رطوبت در اثر دمای بالا می‌شود. سطح بالای انتقال حرارت و نرخ زیاد تبخیر به تولید پودرهایی با چگالی بسیار پایین‌تر می‌انجامد. میکروکپسول‌های ریزتر منجر به افزایش چگالی توده‌ای می‌شوند؛ زیرا فضاهای خالی بین ذرات در ذرات ریز کاهش می‌یابد. شارما و همکاران (۲۰۲۱)، که اثر حامل‌ها را در خشک‌کردن پاششی آب کدو سبز



شکل (۵) اثر غلظت CFG بر چگالی توده ریزکپسول‌های PSO

Fig. 5. Effect of CFG concentration on the bulk density of PSO microcapsules

میکروکپسول‌های حاوی ۶٪ صمغ سپستان، تقریباً در تمامی ویژگی‌ها، فرمولاسیون بهینه‌ای برای ریزپوشانی نشان دادند؛ بنابراین تصاویر آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی بررسی و تحلیل شد. این میکروکپسول‌های 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 میکروکپسول‌ها به فرآیند اتمیزاسیون و کشش سطحی قطرات

۴.۲.۳. ریخت‌شناسی^۱

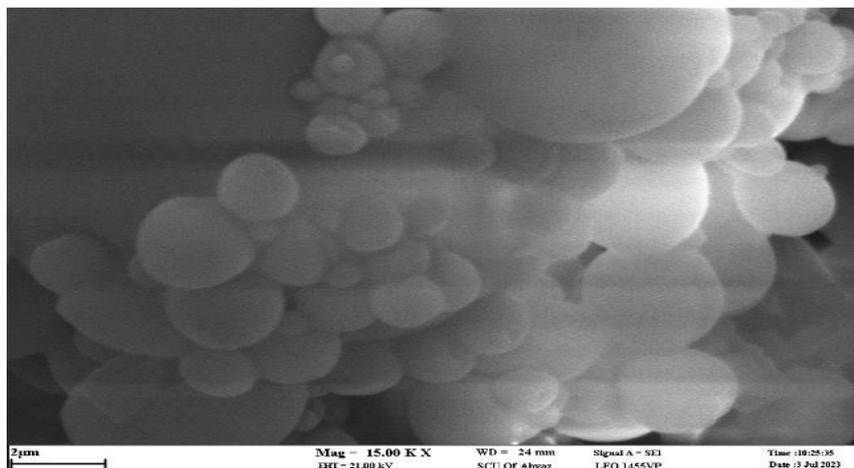
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) از میکروکپسول‌های خشک‌شده، نمای دقیقی از مورفولوژی سطح و ویژگی‌های ساختاری روغن هسته انار ریزپوشانی شده نشان می‌دهند. این تصاویر برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی، میزان ریزپوشانی و پایداری احتمالی پودرها اهمیت دارند.

1. Morphology

2. Scanning electron microscope images

دادند. ایشان دریافتند که حضور مالتودکسترین در ترکیب 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].

و سرعت تبخیر بالای آن‌ها نسبت داده می‌شود [۳۹]. سطوح صاف بیانگر کارایی بالای ریزپوشانی و شرایط مناسب خشک‌کردن پاششی است که از فروپاشی سطحی در حین تبخیر حلال جلوگیری می‌کند [۹]. حجتی و همکاران (۲۰۱۳)، اثر دیواره‌های متفاوت را بر ویژگی‌های میکروکپسول‌های حاوی کانتاکزانتین^۱ مورد بررسی قرار



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

پایداری امولسیون دارد؛ به‌گونه‌ای که هرچه 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؛ به‌طوری‌که امولسیون‌هایی با شاخص خامه‌ای شدن پایین‌تر و پایداری بالاتر، درصد ریزپوشانی بیشتری را نشان دادند. با این حال، امولسیون ۹٪ 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، خشک‌شدن 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

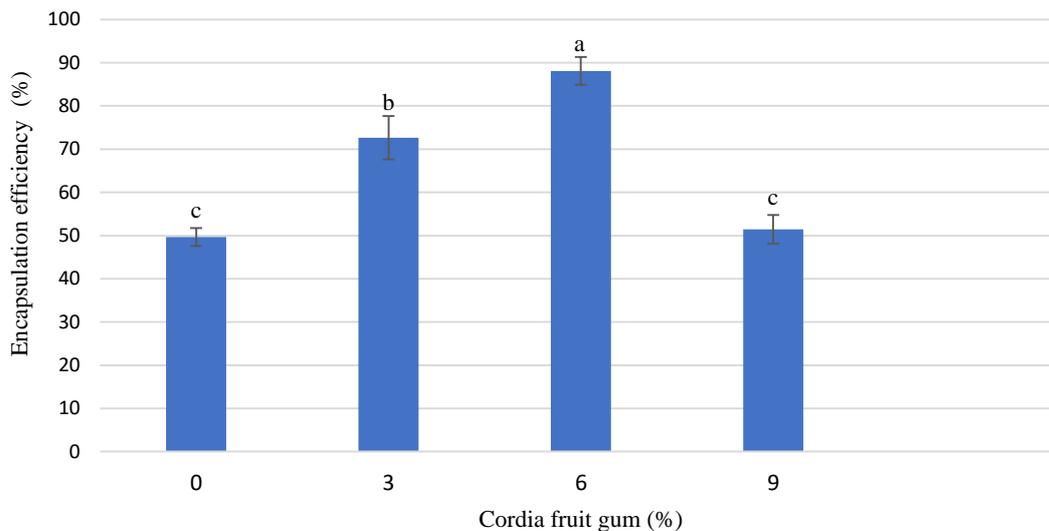
۵.۲.۳. بازده ریزپوشانی

تمرکز اصلی در ریزپوشانی روغن، بهبود کارایی ریزپوشانی در فرآیند خشک‌کردن پاششی از طریق به‌حداقل رساندن میزان روغن سطحی و افزایش طول عمر نگهداری محصول است؛ زیرا حتی مقدار اندک ترکیبات روغن سطحی می‌تواند به‌سرعت 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٪ قرار گرفت. در صورت افزایش بیش از حد ویسکوزیته امولسیون، فرآیند خشک‌کردن پاششی به‌دلیل تشکیل ذرات بزرگ‌تر، نرخ خشک‌شدن کارایی نخواهد داشت [۳۹]. براساس گزارش باربوسا و همکاران [۴۴]، راندمان ریزپوشانی ارتباط مستقیمی با

1. Canthaxanthin

طعم و کاهش میزان روغن سطحی در طول خشک کردن پاششی می‌شوند [۴۸]؛ اما در مطالعه انجام شده 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 ازدست‌رفتن ترکیبات فرار افزایش می‌یابد [۳۲].

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

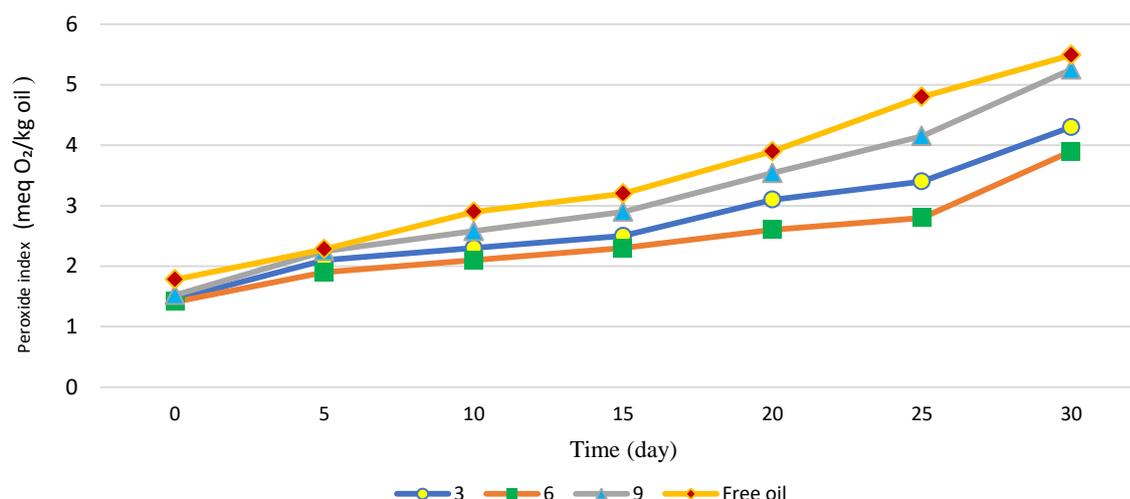


شکل (۷) اثر غلظت CFG بر بازده ریزپوشانی ریزکپسول‌های PSO
 Fig. 7. Effect of CFG concentration on the encapsulation efficiency of PSO microcapsules

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٪ صمغ سیستان، 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.

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٪ 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. باتوجه به این‌که در تمامی زمان‌ها،



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

بهبود پایداری روغن هستهٔ انار در صنایع غذایی مطرح شود.

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٪ 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

تعارض منافع

هیچ‌گونه 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 به‌شماره پیگیری SCU.AA1403.585 قدردانی می‌نمایند. همچنین از آزمایشگاه 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., Carocho, 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*. 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*}**

1. PhD candidate, Chemistry Department, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Professor, Chemistry Department, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
- 3*. Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(Received 18 October 2025, Received in revised form 13 November 2025, Accepted 16 November 2025)

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, identifying more beneficial uses for these seeds is preferable to their disposal. Such application involves extracting oil from these seeds for use in the food industry. However, PSO's limited oxidative stability restricts its direct application in food products; therefore, encapsulation can be considered an effective strategy to overcome this limitation. Spray drying is a cheap, adaptable, flexible, reproducible, rapid encapsulation method that utilizes 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, and its 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.

Conclusions: In this study, spray drying was used to microencapsulate PSO using native CFG and MD. The formulation containing 6% CFG demonstrated the highest microencapsulation efficiency, the lowest surface oil

* Corresponding author E-mail: hzakid@scu.ac.ir



content, and the greatest improvement in oxidative stability. This approach represents a clean-label technology based on native materials for enhancing the stability of PSO in food applications.

Keywords: *Pomegranate seed oil, Cordia fruit gum, Clean label, Spray drying, Oxidative stability*