



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

استخراج و نانوریزپوشانی عصاره برگ گیاه مورینگا اولیفرا (*Moringa oleifera*) و بررسی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آن

زهرا حیدری، مژگان شاه‌امیریان^{*}، صدیقه یزدان‌پناه

۱- کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، گرایش فناوری مواد غذایی، واحد سروستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سروستان، ایران.

۲- گروه شیمی، واحد سروستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سروستان، ایران.

۳- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

گیاه مورینگا اولیفرا (*Moringa oleifera* Lam.) منبعی غنی از ترکیبات زیست‌فعال با خواص آنتی‌اکسیدانی برجسته است، اما کاربرد آن در صنایع غذایی و دارویی به دلیل ناپایداری و رهایش نامناسب با محدودیت‌هایی مواجه می‌باشد. هدف از این پژوهش، استخراج عصاره برگ مورینگا با استفاده از حلال یوتکتیک عمیق (Deep Eutectic Solvent, DES) به کمک امواج فراصوت (Ultrasound-Assisted Extraction, UAE)، سپس تهیه نانوامولسیون با روغن کانولا و در نهایت نانوریزپوشانی آن با ماتریکس ترکیبی پروتئین-پلی‌ساکارید به روش خشک‌کن انجمادی به منظور بهبود پایداری و عملکرد آنتی‌اکسیدانی بود. استخراج با حلال DES (کولین کلراید-اسید سیتریک با نسبت مولی ۱:۱) و امواج فراصوت (W 40-20) در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد (بر اساس پیش‌آزمایش‌های اولیه) به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. نانوامولسیون روغن در آب با نسبت روغن به آب ۵:۹۵ (حجمی/حجمی) با استفاده از روغن کانولا و سورفکتانت Tween 80 و هموژنایزر پرفشار (150 MPa، ۵ سیکل) تهیه و سپس با دیواره ترکیبی کنسانتره پروتئین سویا-اینولین-صمغ عربی (نسبت ۱:۱:۱) به روش خشک‌کن انجمادی ریزپوشانی گردید. عصاره و پودر نهایی از نظر محتوای فنولی کل (Total Phenolic Content, TPC)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)، طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوریه (FTIR)، راندمان ریزپوشانی (Encapsulation Efficiency, EE%)، رهایش، پتانسیل زتا، اندازه ذرات (Dynamic Light Scattering, DLS) و مورفولوژی سطحی (Scanning Electron Microscopy, SEM) ارزیابی شدند. عصاره استخراجی در غلظت 200 ppm دارای TPC معادل 87.5 mg GAE/g و مهار رادیکال DPPH به میزان ۶۸.۰۱٪ بود. طیف FTIR حضور موفق گروه‌های عاملی فنولی، فلاونوئیدی و کربوهیدراتی را تأیید کرد. فرآیند نانوریزپوشانی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی را بهبود بخشید: راندمان ریزپوشانی به ۷۰٪ رسید، اندازه ذرات از ۱۸۰ به ۹۸ نانومتر کاهش، پتانسیل زتا از -25.3 به -35.2 mV افزایش و رهایش ترکیبات فنولی از ۴۵٪ به ۲۰٪ کاهش یافت. تصاویر SEM، ذراتی کروی، یکنواخت و بدون ترک‌خوردگی را در نمونه ریزپوشانی‌شده نشان داد. تلفیق استخراج سبز با نانوامولسیون‌سازی و ریزپوشانی انجمادی، سامانه‌ای کارآمد با پایداری فیزیکوشیمیایی بالا و رهایش کنترل‌شده ارائه می‌دهد که پتانسیل بالایی برای کاربرد در فرمولاسیون‌های غذایی فراسودمند و دارویی دارد.

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۵

کلمات کلیدی:

مورینگا اولیفرا،

حلال یوتکتیک عمیق،

نانوامولسیون،

نانوریزپوشانی،

خشک‌کن انجمادی،

فعالیت آنتی‌اکسیدانی.

DOI:10.48311/fsct.2026.120524.83145

* مسئول مکاتبات:

mozhganshamirian@gmail.com

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، تمایل مصرف‌کنندگان به استفاده از مواد غذایی عملکردی^۱ که علاوه بر ارزش تغذیه‌ای، دارای مزایای سلامت‌بخش نیز هستند، به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. در این میان، استفاده از ترکیبات طبیعی با خاصیت آنتی‌اکسیدانی، مانند عصاره‌های گیاهی، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آنتی‌اکسیدان‌های مصنوعی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گیاه مورینگا اولیفر (Moringa oleifera)، به واسطه دارا بودن مجموعه‌ای منحصر به فرد از ترکیبات فیتوشیمیایی نظیر اسیدهای فنولیک، فلاونوئیدها (از جمله مشتقات کوئرستین و کامفرول) و ویتامین‌ها، همواره به عنوان یکی از ارزشمندترین منابع طبیعی در صنایع غذایی فراسودمند و داروسازی مورد توجه بوده است. مطالعات اخیر با استفاده از آنالیزهای پیشرفته متابولومیکس، حضور ترکیبات کلیدی مانند کوئرستین-۳-گلوکوزید و اسید کلروژنیک را در عصاره برگ این گیاه تأیید کرده‌اند که ارتباط مستقیمی با فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی برجسته آن دارد [۱]. با این وجود، چالش اساسی در مسیر تجاری‌سازی این ترکیبات، حساسیت بالای آن‌ها به عوامل محیطی نظیر اکسیداسیون، تخریب در pH‌های فیزیولوژیک دستگاه گوارش و در نهایت، پایداری بهبودیافته و رهایش کنترل‌شده خوراکی پایین است که اثربخشی بالینی و تغذیه‌ای آن‌ها را به شدت محدود می‌کند [۲].

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، رویکردهای نوین مهندسی فرمولاسیون، نظیر نانوامولسیون‌سازی و به دنبال آن ریزپوشانی خشک، به عنوان استراتژی‌هایی کارآمد برای تثبیت، محافظت و تحویل هدفمند عصاره‌های گیاهی مطرح شده‌اند. در این میان، نانوامولسیون‌های روغن در آب (O/W) به دلیل سادگی نسبی تولید در مقیاس صنعتی، شفافیت نوری بالا و توانایی فوق‌العاده در افزایش حلالیت ظاهری ترکیبات چربی‌دوست، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۳]. در این پژوهش، روغن کانولا به دلیل پروفایل

اسید چرب متعادل (چربی اشباع پایین، اسید اولئیک بالا)، پایداری اکسیداتیو مناسب، ویسکوزیته پایین (که تشکیل نانوامولسیون را تسهیل می‌کند) و طعم خنثی انتخاب شد [۴]. فرآیند تولید این نانوحامل‌ها معمولاً شامل آماده‌سازی یک پیش‌امولسیون خام و سپس کاهش اندازه قطرات روغن به زیر ۱۰۰ نانومتر با اعمال نیروهای برشی شدید توسط هم‌ژنایزر پرفشار است. این روش با جلوگیری از جدایی فازها و رسوب، پایداری فیزیکی طولانی‌مدت امولسیون را فراهم می‌کند [۵]. با این حال، نانوامولسیون‌های مایع به دلیل ماهیت ترمودینامیکی خود، در برابر تنش‌های محیطی نظیر نوسانات دما، نور و حضور اکسیژن ناپایدار بوده و مستعد تخریب هستند. از این رو، تبدیل نانوامولسیون به پودر خشک از طریق فناوری ریزپوشانی با خشک‌کن انجمادی، راهکاری ایده‌آل برای افزایش چشمگیر عمر نگهداری، تسهیل حمل و نقل و حفاظت حداکثری از ترکیبات فعال در طول دوره انبارمانی محسوب می‌شود [۶]. موفقیت این فرآیند به شدت به انتخاب مواد دیواره بستگی دارد. در پژوهش‌های پیشرفته، تلفیق پروتئین‌ها با پلی‌ساکاریدهای پری‌بیوتیکی نتایج بسیار مطلوبی را نشان داده است. کنسانتره پروتئین سویا به عنوان یک ماده دیواره‌ای با خاصیت امولسیفایری و فیلم‌سازی قوی، قادر است ساختار ماتریکسی مقاومی را تشکیل دهد. از سوی دیگر، اینولین با ایجاد ماتریکس شیشه‌ای با دمای انتقال شیشه‌ای بالا از فروپاشی ساختار متخلخل در طی خشک کردن جلوگیری کرده و صمغ عربی نیز با خواص امولسیفایری عالی و حلالیت بالا در آب سرد، پایداری بازسازی پودر و محافظت از هسته را به طور هم‌افزایی بهبود می‌بخشد [۷، ۸]. در تحقیق حاضر، یک سیستم ترکیبی دو مرحله‌ای با هدف بهبود پایداری و رهایش کنترل‌شده عصاره برگ مورینگا اولیفر طراحی شده است. در مرحله نخست، عصاره استخراجی (ترکیبات لیپوفیل در فاز روغنی و ترکیبات آب‌دوست در فاز آبی و سطح مشترک) در فاز روغنی روغن کانولا بارگذاری و تحت

دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه تهیه شد [۹]. استخراج به کمک امواج فراصوت با توان ۲۰ تا ۴۰ وات در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد [۱۰]. این شرایط بر اساس پیش‌آزمایش‌های اولیه که محتوای فنولی کل را بیشینه می‌کرد، انتخاب شد. پس از سانتریفیوژ (rpm ۱۰۰۰، ۱۰ دقیقه)، فاز مایع شفاف جدا شد.

۲-۳-۲ آزمایش‌های ارزیابی عصاره استخراجی

۲-۳-۲-۱ سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)

میزان مهار رادیکال آزاد DPPH با اختلاط ۱ میلی‌لیتر عصاره، ۱ میلی‌لیتر (0.1 mM) DPPH و ۱ میلی‌لیتر متانول و نگهداری در تاریکی (۳۰ دقیقه) سنجیده شد [۱۱]. جذب در ۵۱۷ نانومتر خوانده شد. درصد مهار (% Inhibition) از رابطه (۱) محاسبه و با BHT مقایسه گردید:

$$\%Inhibition = (A_0 - A/A_0) \times 100$$

- **Inhibition %**: درصد مهار رادیکال آزاد
 - **A₀**: جذب نمونه شاهد (حاوی ۱ میلی‌لیتر DPPH و ۱ میلی‌لیتر متانول)
 - **A**: جذب نمونه حاوی عصاره *Moringa oleifera* یا آنتی‌اکسیدان استاندارد
- در این آزمون، از BHT^۲ به عنوان کنترل مثبت استفاده شد

۲-۳-۲-۲ اندازه‌گیری محتوای فنولی کل (TPC)

محتوای فنولی کل با روش فولین-سیوکالتیو بر حسب میلی‌گرم معادل اسید گالیک در گرم عصاره خشک (mg GAE/g DW) تعیین شد [۱۲]. منحنی استاندارد با اسید گالیک (۱۲/۵ تا ۱۲۵ ppm) رسم (معادله $y = 0.0125x$): $R^2 = 0.998$ با ۰.۰۲۱ و جذب در ۷۶۵ نانومتر قرائت گردید.

۲-۳-۲-۳ طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوری (FTIR)

فشار بالا به نانومولسیون تبدیل می‌شود. در مرحله بعد، قطرات این نانومولسیون با استفاده از کامپوزیت دیواره‌ای متشکل از کنسانتره پروتئین سویا، اینولین و صمغ عربی به روش خشک‌کن انجمادی ریزپوشانی می‌گردند. هدف اصلی از این مطالعه، بررسی جامع ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی پودر نهایی شرایط استخراج و آماده‌سازی فازها و بررسی جامع ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی پودر نهایی حاصل می‌باشد، تا گامی مؤثر در جهت توسعه افزودنی‌های غذایی فراسودمند با ماندگاری و کارایی بالا برداشته شود.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد و معرف‌های شیمیایی

برگ‌های گیاه (*Moringa oleifera* Lam) شماره بچ: MO-2023-0150/71836 تهیه و برای استخراج استفاده شد. حلال یوتکتیک عمیق (DES) از ترکیب کولین کلراید و اسید سیتریک (نسبت مولی ۱:۱) آماده گردید. روغن کانولای خوراکی، کنسانتره پروتئین سویا (از شرکت مرک، آلمان)، اینولین و صمغ عربی به‌عنوان مواد دیواره به کار رفتند. سایر مواد شیمیایی شامل: سورفکتانت مورد استفاده Tween 80 (پلی‌سوربات ۸۰)، DPPH، متانول، اتانول، فولین-سیوکالتیو، کربنات سدیم، اسید گالیک، پتاسیم برمید (KBr)، بافر فسفات (pH=7)، BHT و آب دیونیزه همگی با درجه خلوص آزمایشگاهی تهیه شدند.

۲-۲ استخراج عصاره برگ گیاه *Moringa oleifera*

برای استخراج، ۱ گرم از پودر برگ با ۱۰ میلی‌لیتر حلال یوتکتیک عمیق پایه کولین کلراید-اسید سیتریک (نسبت مولی ۱:۱) پایه کولین کلراید-اسید سیتریک مخلوط و ۳۰ درصد حجمی آب مقطر برای کاهش ویسکوزیته افزوده شد. DES در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با هم‌زدن ۵۰۰ دور در

۳ گرم پودر با ۳ میلی لیتر بافر فسفات (pH=7.0) به مدت ۹۰ دقیقه مخلوط و سانتریفیوژ شد [۱۶]. TPC در فاز آبی اندازه گیری و درصد رهایش محاسبه گردید.

$$\text{درصد رهاسازی} = 100 - \frac{C2 \times 100}{C1}$$

در این فرمول C1 درصد ریزپوشانی شدن ترکیبات فاز خارجی، C2 درصد ریزپوشانی شدن ترکیبات فاز داخلی

توجه: این مطالعه تنها رهایش اولیه را در یک زمان مشخص بررسی کرده است. بررسی مدل های سینتیکی رهایش در مطالعات آتی انجام خواهد شد.

۲-۳-۵ پتانسیل زتا و اندازه ذرات

با استفاده از DLS و Zetasizer Nano ZS (Malvern, UK)، اندازه و پتانسیل زتا پس از رقیق سازی (۱:۵) در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد [۱۸]. شرایط آزمون: زاویه ۱۷۳ درجه (بازپراکنش)، ۳ تکرار، هر تکرار ۱۰ بار. شاخص Span از فرمول (D90 - D10)/D50 محاسبه شد. شاخص پراکندگی (PDI) برای نانوامولسیون آزاد ۰.۱۵±۰.۰۲ و برای ریزپوشانی شده ۰.۱۸±۰.۰۳ بود.

۲-۴-۵ مورفولوژی سطحی (SEM)

مورفولوژی پودر با SEM پس از پوشش دهی طلا بررسی و تصاویر ثبت شدند [۱۹]. امولسیون آزاد ابتدا به روش خشک کن انجمادی به پودر تبدیل و سپس با طلا پوشش دهی شد. حداقل ۵ میدان دید مختلف از هر نمونه ثبت و تحلیل شد. بزرگنمایی ۴۰۰۰× و میله مقیاس ۵ میکرومتر بود.

۲-۶ آنالیز آماری

برای تجزیه و تحلیل داده های به دست آمده از آزمایشات انجام شده با حداقل سه تکرار، از نرم افزار آماری SPSS نسخه ۱۹ استفاده گردید. نرمال بودن داده ها با آزمون شاپیرو-ویلک و همگنی واریانس ها با آزمون لون بررسی شد ($p > 0.05$). برای تعیین معنی دار بودن اختلاف بین میانگین ها، از روش آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) و آزمون دانکن (دانکن که برای مقایسه های پس از-ANOVA

قرص های نازک از مخلوط عصاره خشک و KBr تهیه و طیف ها در محدوده 4000 تا 400 cm^{-1} با قدرت تفکیک 0.5 cm^{-1} ثبت شد [۱۳]. هدف، شناسایی گروه های عاملی و برهم کنش های شیمیایی بود. طیف خام FTIR به عنوان داده های تکمیلی قابل ارائه است.

۲-۴-۲ تهیه و ریزپوشانی نانوامولسیون عصاره

۲-۴-۲-۱ نانوامولسیون سازی با روغن کانولا

فاز روغنی (روغن کانولا، ۵-۱۰٪ وزنی/حجمی، نسبت روغن به آب ۵:۹۵) و فاز آبی (آب مقطر و سورفکتانت Tween 80 با غلظت ۲-۵) آماده و مخلوط شدند تا پیش امولسیون تشکیل شود. این پیش امولسیون در هموژنایزر پرفشار (150 MPa، ۵ سیکل) به نانوامولسیون با اندازه قطرات زیر ۱۰۰ نانومتر تبدیل گردید [۱۴].

۲-۴-۲-۲ نانوریزپوشانی به روش خشک کن انجمادی

محلول دیواره شامل ۴۰ گرم مخلوط کنسانتره پروتئین سویا، اینولین و صمغ عربی (نسبت ۱:۱:۱) در ۲۰۰ میلی لیتر آب حل و در دمای ۴۰-۶۰ درجه سانتی گراد هم زده شد. ۲ گرم نانوامولسیون اضافه و با هموژنایزر (8000-9500 rpm، ۵ دقیقه) پراکنده شد [۱۵]. مخلوط نهایی با خشک کن انجمادی به پودر تبدیل و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد نگهداری گردید.

۲-۵-۲ مشخصه یابی پودر نانوریزپوشانی شده

۲-۵-۲-۱ راندمان ریزپوشانی (EE%)

۲۰۰ میلی گرم پودر با اتانول مطلق و تیمار فراصوت (20 kHz، دو مرحله ۱۰ دقیقه ای) ستشو و سانتریفیوژ شد [۱۶]. فنول سطحی (کپسول نشده) با روش فولین-سیوکالتیو در ۷۴۰ نانومتر تعیین و راندمان از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{capsulation Efficiency (\%)} = \frac{W1 - W2}{W2} \times 100$$

۲-۵-۲-۲ رهایش ترکیبات فنولی

با تعداد تیمارهای محدود مناسب است) در سطح احتمال ۵ درصد بهره گرفته شد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- استخراج عصاره برگ گیاه *Moringa oleifera*

۳-۱-۱- فعالیت آنتی اکسیدانی و محتوای فنولی کل

نتایج حاصل از ارزیابی غلظت‌های مختلف عصاره (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ppm) نشان داد که هر دو شاخص درصد مهار رادیکال آزاد و محتوای فنولی کل به‌طور معنی‌داری با افزایش غلظت عصاره افزایش می‌یابند ($p < 0.05$) (جدول ۱). بیشترین فعالیت آنتی اکسیدانی ($68.01 \pm 1.8\%$) و بالاترین محتوای فنولی (87.5 ± 1.5 mg GAE/g) در غلظت ۲۰۰ ppm مشاهده شد، در حالی که کمترین مقادیر به ترتیب با $35.71 \pm 1.2\%$ و 25.3 ± 0.9 mg GAE/g به غلظت ۵۰ ppm اختصاص داشت. این همبستگی مثبت میان TPC و فعالیت آنتی اکسیدانی با یافته‌های پیشین مطابقت دارد و نشان می‌دهد که ظرفیت خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد عمدتاً ناشی از حضور ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی است [۱۹ و ۱۸].

به‌منظور دستیابی به این مقادیر بالا از ترکیبات زیست‌فعال، در این مطالعه از روش استخراج به کمک امواج فراصوت با حلال یوتکتیک عمیق متشکل از کولین کلراید و اسید سیتریک استفاده شد. این روش با بهره‌گیری از پدیده کاویتاسیون، تخریب ساختار دیواره سلولی را تسهیل کرده و

با افزایش انتقال جرم میان ماتریکس گیاه و حلال، آزادسازی متابولیت‌های ثانویه را به‌طور چشمگیری افزایش داد [۲۰]. روند افزایشی TPC از ۲۵.۳ به ۸۷.۵ mg GAE/g هم‌راستا با افزایش RSA% از ۳۵.۷۱ به ۶۸.۰۱٪، کارایی بالای این سیستم استخراج سبز را اثبات می‌کند. حلال DES به‌کار رفته بر پایه کولین کلراید (به‌عنوان پذیرنده پیوند هیدروژنی) و اسید سیتریک (به‌عنوان دهنده پروتون و عامل کلاته‌کننده)، یک محیط استخراجی با قطبیت بالا و شبکه هیدروژنی گسترده فراهم می‌کند که در حفظ پایداری پلی‌فنول‌های حساس و جلوگیری از اکسیداسیون آن‌ها در طول فرآیند بسیار مؤثر است [۲۱، ۲۲]. کنترل دما در ۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز از تخریب حرارتی ترکیباتی نظیر اسید گالیک و تانن‌ها جلوگیری کرده و فعالیت زیستی عصاره را حفظ نموده است [۲۳].

یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های پیشین هم‌راستا است؛ Choudhary و همکاران (۲۰۲۱) اثربخشی DES بر پایه کولین کلراید و اسیدهای آلی را در استخراج آنتی اکسیدان‌های گیاهی تأیید کرده‌اند [۲۴]، و Osorio-Tobón (۲۰۲۰) نیز نشان داده که امواج فراصوت با کاهش زمان و دمای فرآیند، کیفیت ترکیبات فنولی را حفظ می‌کند [۲۵]. در مجموع، تلفیق UAE با DES یک روش بهینه، پایدار و با راندمان بالا برای استخراج عصاره غنی از فنول از برگ *Moringa oleifera* ارائه می‌دهد.

Table 1. Free radical scavenging and total phenolic content of *Moringa oleifera* extract 1

غلظت عصاره (ppm)	%RSD	مقدار فنولی کل (mg GAE/g)
50	35.71 ± 1.2^a	25.3 ± 0.9^a
100	53.04 ± 1.5^b	51.25 ± 1.2^b
200	68.01 ± 1.8^c	87.5 ± 1.5^c

* نتایج بصورت میانگین $\pm$ انحراف استاندارد بیان شده و کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گردیده است. اختلاف در حروف لاتین بیانگر اختلاف معنی $(p > 0.05)$ دارد. آماری در سطح ۵٪ می باشد.

۳-۱-۲- تحلیل طیف سنجی FTIR عصاره

طیف FTIR عصاره استخراجی (تصویر ۱) حضور مؤثر گروه‌های عاملی کلیدی ترکیبات زیست‌فعال را تأیید کرد. باند پهن و قوی در ناحیه $3400-3200$ cm^{-1} به ارتعاشات

کششی O-H در پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدها نسبت داده می‌شود که نشان‌دهنده سهم عمده این ترکیبات در خاصیت آنتی اکسیدانی است [۲۶]. پیک مشاهده‌شده در $1720-1700$ cm^{-1} مربوط به کشش C=O اسیدهای

در دمای کنترل شده ۵۰ درجه سانتی گراد است [۲۹]. همچنین، باندهای $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ (کشش C-O) حضور پلی ساکاریدها و ترکیبات گلیکوزیدی را نشان می دهد که با ماهیت آبدوست DES به خوبی استخراج شده اند [۳۰]. این مشاهدات با یافته های Zheng و همکاران (۲۰۲۲) و Wu و همکاران (۲۰۲۰) که نشان دادند DES در ترکیب با UAE نسبت به حلال های سنتی برتری دارد، هم خوانی کامل دارد [۳۱، ۳۲]. در جدول ۲، گروه های عاملی شیمیایی اصلی شناسایی شده به همراه ترکیبات مرتبط دسته بندی شده اند.

فنولیک و فلاونوئیدهای (مانند مشتقات کوئرستین) است و باندهای $1650-1600\text{ cm}^{-1}$ نیز وجود حلقه های آروماتیک $\text{C}=\text{C}$ را در ترکیبات فنولی تأیید می کنند [۲۷]. لازم به ذکر است که تأیید قطعی وجود ترکیب خاصی مانند کوئرستین نیازمند آنالیزهای تکمیلی مانند LC-MS است و صرفاً حضور گروه های عاملی مرتبط را نشان می دهد. استفاده از حلال DES با ایجاد شبکه هیدروژنی پایدار میان کولین کلراید و اسید سیتریک، قطبیت محیط را افزایش داده و امکان استخراج کارآمدتر این ترکیبات قطبی را فراهم کرده است [۲۸].

پیک های مشاهده شده در $3000-2500\text{ cm}^{-1}$ (کشش C-H)

بیانگر حفظ زنجیره های هیدروکربنی و عدم تخریب حرارتی

Table 2- Chemical functional groups of the extract extracted from the plant leaves *Moringa oleifera*

ترکیب مرتبط	نوع ارتعاش	نوع گروه عاملی	شماره موج (cm^{-1})
پلی فنول ها، فلاونوئیدها، آب متصل	(Stretch) کشش ارتعاشی	گروه هیدروکسیل OH	3200–3400
اسیدهای فنولیک، کوئرستین	کشش ارتعاشی	گروه کربونیل C=O	1700–1720
ترکیبات فنولی معطر	کشش ارتعاشی	مزدوج آروماتیک C=C	1600–1650
قندها، ترکیبات گلیکوزیدی	(Bending) خمشی	C–O–C / C–H	1000–1200
ترکیبات فرار و غیر فنولی	ارتعاشات پیچیده	آلکالوئیدها و تریپن ها	< 900

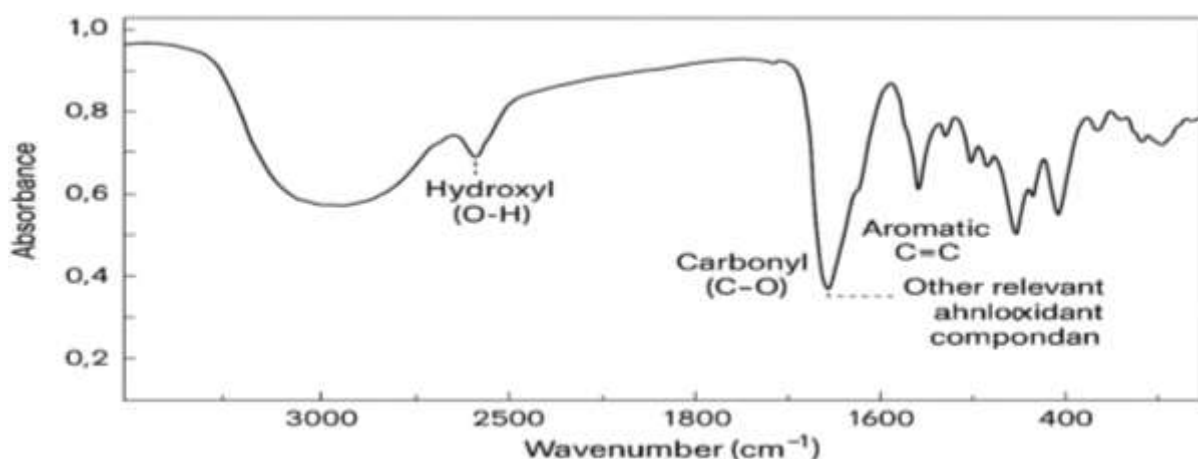


Figure 1. FTIR spectroscopy spectrum diagram of *Moringa oleifera* leaf extract

داده های جدول ۳ نشان می دهد که نانوریزپوشانی با استفاده از ماتریکس ترکیبی صمغ عربی، اینولین و کنسانتره پروتئین، تأثیر معنی داری ($p < 0.05$) بر تمامی پارامترهای

۳-۲ ریزپوشانی عصاره مورینگا

۳-۲-۱ ویژگی های فیزیکوشیمیایی و کارایی نانوریزپوشانی

اندازه قطرات روغن و نقش اینولین و صمغ عربی در تثبیت سریع سطوح جدید است [۳۸]. شاخص اسپن نیز از ۰.۷۰ به ۰.۴۵ کاهش یافت که بیانگر توزیع یکنواخت‌تر اندازه ذرات در سیستم ریزپوشانی شده است و پیش‌نیازی برای پایداری بلندمدت کلوئیدی محسوب می‌شود [۳۹]. کاهش متناظر در مقادیر D10، D50 و D90 (از ۱۴۰، ۱۸۰ و ۲۲۰ نانومتر به ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ نانومتر) موفقیت فرآیند را در محدود کردن توزیع اندازه به ذرات ریزتر و یکنواخت‌تر تأیید می‌کند. این عملکرد به نقش دوگانه اینولین (تشکیل ماتریکس سه‌بعدی و محافظت فیزیکی) و صمغ عربی (امولسیفایر طبیعی با قابلیت تثبیت عالی) نسبت داده می‌شود [۴۰، ۴۱]. همچنین، روغن کانولا با پروفایل اسیدهای چرب غیراشباع و ویسکوزیته پایین، هم به پایداری ترمودینامیکی نانوامولسیون کمک کرده و هم به عنوان حامل لیپوفیل از ترکیبات فنولی در برابر اکسیداسیون محافظت می‌کند [۴۲]. در مجموع، تلفیق موفق DES-UAE با نانوامولسیون‌سازی و ریزپوشانی انجمادی، سامانه‌ای با کارایی بالا برای محافظت و رهایش کنترل‌شده ترکیبات فنولی ارائه داده است [۴۳].

فیزیکوشیمیایی داشته است. راندمان ریزپوشانی (EE%) به $70.0 \pm 2.5\%$ رسید که نشان‌دهنده کارایی بالای مواد دیواره در به دام انداختن ترکیبات فنولی است [۳۳]. میزان رهایش ترکیبات فنولی در نمونه ریزپوشانی شده ($1.5 \pm 20.0\%$) نسبت به امولسیون آزاد ($1.8 \pm 45.0\%$) کاهش معنی‌داری یافت که مبین ایجاد یک سد فیزیکی مؤثر برای کنترل آزادسازی و جلوگیری از اکسیداسیون زودرس است [۳۴، ۳۵]. لازم به ذکر است که این مطالعه تنها رهایش اولیه را در یک زمان مشخص (۹۰ دقیقه) بررسی کرده است و بررسی مدل‌های سینتیکی رهایش در مطالعات آتی انجام خواهد شد. پتانسیل زتا در نمونه ریزپوشانی شده به -35.2 mV رسید که نسبت به -25.3 mV در امولسیون آزاد، پایداری الکترواستاتیکی بسیار بالاتری را فراهم می‌کند و با دفع قوی‌تر ذرات از تجمع و به هم چسبیدگی آن‌ها جلوگیری می‌کند [۳۶]. این افزایش بار منفی سطحی، مطابق با یافته‌های Piacenza و همکاران (۲۰۱۸)، ناشی از حضور صمغ عربی با گروه‌های عاملی آنیونی در سطح مشترک است [۳۷]. میانگین اندازه ذرات از ۱۸۰ نانومتر در امولسیون آزاد به ۹۸ نانومتر در نمونه ریزپوشانی شده کاهش یافت که عمدتاً به دلیل عملکرد هموژنایزر پرفشار (MPa 150) در کاهش

Table 3. Evaluation of key physicochemical and functional parameters between free nanoemulsion and nanoencapsulated emulsion of *Moringa oleifera* leaf extract

Parameters	Free emulsion	Encapsulated emulsion
Encapsulation efficiency (%)	—	70.0 ± 2.5^a
Release rate (%)	45.0 ± 1.8^b	20.0 ± 1.5^c
Zeta potential (mV)	-25.3 ± 1.2^b	-35.2 ± 0.8^a
Mean particle size (nm)	180 ± 5.0^b	98 ± 3.2^c
Span index	0.7 ± 0.05^b	0.45 ± 0.02^c
D10% (nm)	140 ± 3.4^b	80 ± 2.5^c

Parameters	Free emulsion	Encapsulated emulsion
D50% (nm)	180 ± 4.0 ^b	100 ± 3.0 ^c
D90% (nm)	220 ± 5.0 ^b	120 ± 4.0 ^c
Loading efficiency (for 15% treatment)	—	7.5%

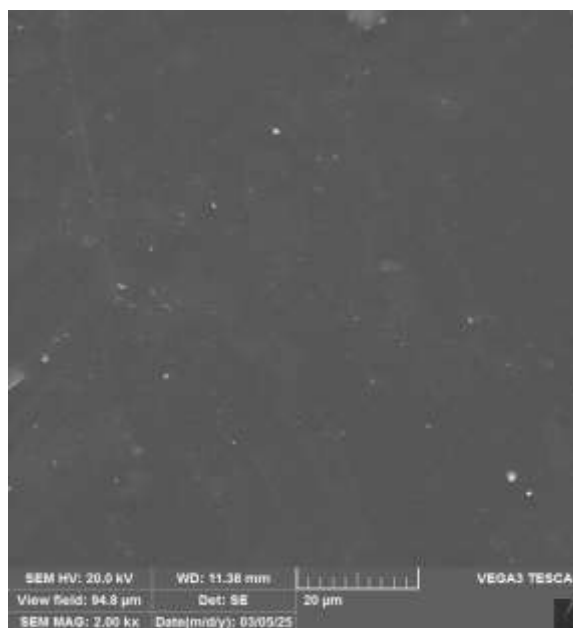
*Results are expressed as mean ± standard deviation, and all experiments were performed in triplicate. Different superscript letters indicate statistically significant differences at the 5% level.

سطح نیمه متخلخل ایجاد شده، ضمن ایجاد یک سپر فیزیکی

در برابر اکسیژن، امکان رهایش کنترل شده ترکیبات فعال را فراهم کرده و با یافته‌های Pieczykolan و Kurek (۲۰۱۹) مبنی بر هم‌افزایی پلی‌ساکاریدها در تشکیل دیواره‌های یکپارچه هم‌خوانی دارد [۴۶]. فقدان ترک‌خوردگی عمیق نشان‌دهنده شرایط بهینه خشک‌کردن و نسبت مناسب مواد دیواره است. این ویژگی‌ها با نتایج DLS (کاهش Span و اندازه ذرات) کاملاً هم‌خوانی داشته و تأیید می‌کند که ریزپوشانی با ماتریکس ترکیبی، علاوه بر بهبود پایداری کلوئیدی، محافظت مؤثرتری از ترکیبات زیست‌فعال در برابر عوامل مخرب محیطی فراهم می‌کند [۴۷ و ۴۸].

۲-۲-۳ تحلیل ریزساختار نانوامولسیون‌ها (SEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی در تصویر ۲، تفاوت‌های چشمگیری را در مورفولوژی سطحی دو نمونه آشکار می‌سازد. امولسیون آزاد (a) ساختاری ناهمگن، غیرکروی و همراه با تجمعات گسترده نشان داد که بیانگر ناپایداری فیزیکی و عدم وجود لایه محافظ است [۴۴]. در مقابل، نمونه ریزپوشانی شده (b) ذراتی کاملاً کروی، با سطوح صاف و نسبتاً متخلخل و توزیع یکنواخت را به نمایش گذاشت. این ساختار شبکه‌ای منسجم، حاصل امتزاج موفق اینولین و صمغ عربی در اطراف هسته روغنی حاوی عصاره طی فرآیند خشک‌کن انجمادی است [۴۵].



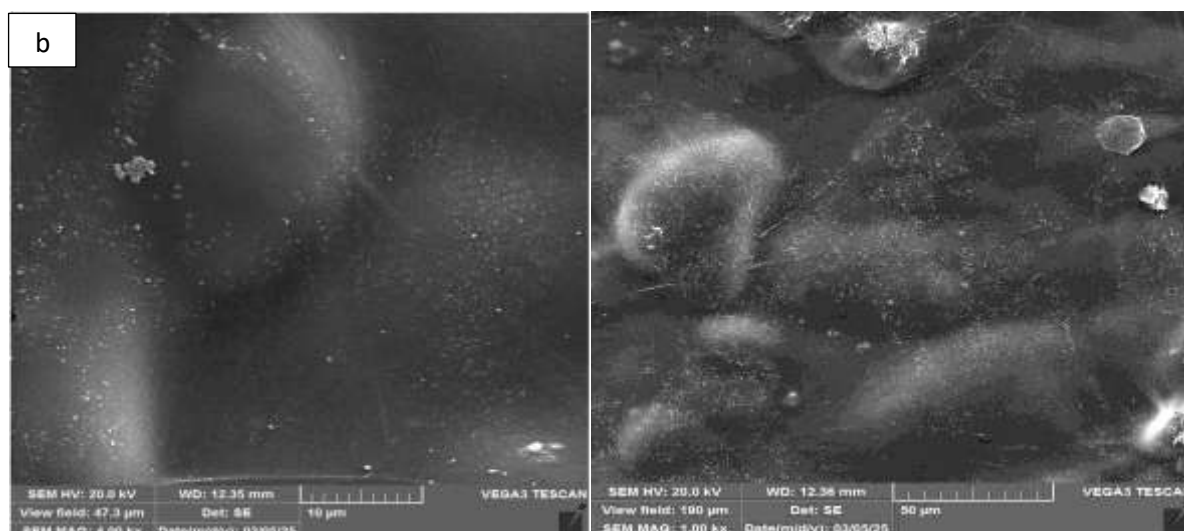


Figure 2 – Scanning electron microscope (SEM) images of the microstructure of a) free nanoemulsion of *Moringa oleifera* leaf extract and b) microencapsulated nanoemulsion with a composite wall of inulin and gum arabic

(magnification $\times 4000$, scale bar 5 μm)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک رویکرد تلفیقی و گام به گام شامل استخراج سبز با حلال DES و امواج فراصوت، نانوامولسیون سازی، با روغن کانولا و نانوریزپوشانی انجمادی با ماتریکس ترکیبی کنسانتره پروتئین سویا-اینولین-صمغ عربی با هدف تثبیت و ارتقای کارایی عصاره برگ *Moringa oleifera* طراحی و اجرا شد. نتایج به دست آمده، موفقیت این استراتژی را از جنبه های مختلف تأیید می نماید. استفاده از حلال یونکتیک عمیق (DES) بر پایه کولین کلراید-اسید سیتریک (نسبت مولی ۱:۱) در ترکیب با امواج فراصوت (دمای 50°C ، توان 40-20 W)، منجر به استخراج عصاره ای با محتوای فنولی بالا (mg 87.5 GAE/g در 200 ppm) و فعالیت آنتی اکسیدانی قابل توجه (68.01% مهار DPPH) گردید. آنالیز FTIR نیز حفظ یکپارچگی ساختاری گروه های عاملی کلیدی ترکیبات زیست فعال را تأیید کرد. این نتایج، کارایی بالای روش DES-UAE را به عنوان یک فناوری سبز و پایدار برای استخراج ترکیبات فنولی از برگ مورینگا اثبات می کند. در مرحله بعد، استفاده از روغن کانولا به عنوان فاز لیپوفیل (با نسبت روغن به آب ۵:۹۵) و هموژنایزر پرفشار (۱۵۰ MPa، ۵ سیکل) با سورفکتانت Tween 80، تشکیل نانوامولسیون

با اندازه ذرات زیر ۱۰۰ نانومتر را میسر ساخت. ریزپوشانی این نانوامولسیون با ماتریکس ترکیبی کنسانتره پروتئین سویا-اینولین-صمغ عربی (نسبت ۱:۱:۱) به روش خشک کن انجمادی، به طور معنی داری کلیه پارامترهای فیزیکوشیمیایی را بهبود بخشید. نانوریزپوشانی ضمن دستیابی به راندمان کپسوله کردن مناسب (۷۰٪)، منجر به کاهش چشمگیر اندازه ذرات (از ۱۸۰ به ۹۸ نانومتر)، افزایش بار سطحی (پتانسیل زتا از -25.3 به -35.2 mV) و توزیع یکنواخت تر ذرات (کاهش شاخص اسپن از ۰.۷۰ به ۰.۴۵) گردید. مهم تر از آن، رهایش کنترل شده (کاهش از ۴۵٪ به ۲۰٪) نشان داد که ماتریکس دیواره ای قادر است از آزادسازی زودهنگام ترکیبات فنولی جلوگیری کرده و محافظت بلندمدت را تضمین کند. تصاویر SEM نیز تشکیل ذرات کروی و یکپارچه با سطح مطلوب را تأیید نمودند که با داده های DLS همخوانی کامل داشت. لازم به ذکر است که در این مطالعه، آزمون های زیست دسترسی، هضم شبیه سازی شده گوارشی و مدل های سینتیکی رهایش انجام نشده و پیشنهاد می شود در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرند. در مجموع، این مطالعه نشان داد که تلفیق سه فناوری نوین شامل DES-UAE، نانوامولسیون سازی با روغن کانولا و ریزپوشانی انجمادی با دیواره پروتئین-پلی ساکارید، می تواند

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این مطالعه در صورت درخواست معقول از نویسندگان
مسئول در دسترس خواهد بود.

تضاد منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع را اعلام نمی‌کنند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند.

به‌طور هم‌افزایی چالش‌های مربوط به ناپایداری و پایداری بهبود یافته و رهایش کنترل‌شده پایین عصاره مورینگا را مرتفع سازد. پودر نانوریزپوشانی شده حاصل، با دارا بودن فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا، پایداری فیزیکی‌شیمیایی مطلوب و قابلیت رهایش کنترل‌شده، کاندیدای ایده‌آلی برای غنی‌سازی محصولات غذایی فراسودمند و توسعه داروهای گیاهی با کارایی بالا محسوب می‌شود. پژوهش‌های آتی می‌تواند بر ارزیابی پایداری بلندمدت این سامانه در ماتریکس‌های غذایی واقعی، بررسی سینتیک رهایش و زیست‌دسترسی در مدل‌های شبیه‌سازی شده گوارشی متمرکز گردد.

۵- منابع

- [1] Fitriani, F., Rahmawati, D., Nugroho, A. E., & Murwanti, R. (2024). Data on characteristics of simplicia, phytoconstituents, and antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaves ethanol extract. Data in Brief, 54, 110425. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110425>
- [2] Pop, O. L., Kerezi, A. D., & Ciont, C. (2022). A comprehensive review of *Moringa oleifera* bioactive compounds - cytotoxicity and encapsulation. Foods, 11(23), 3787. <https://doi.org/10.3390/foods11233787>
- [3] Yamin, Y., Ruslin, R., Susidarti, R. A., & Rohman, A. (2025). *Moringa oleifera* Linn: Extraction, phytochemistry constituent and pharmacology activity: A review. Traditional Medicine Journal.
- [4] Perumalsamy, H., Balusamy, S. R., Sukweenadhi, J., et al. (2024). A comprehensive review on *Moringa oleifera* nanoparticles: Importance of polyphenols in nanoparticle synthesis, nanoparticle efficacy and their applications. Journal of Nanobiotechnology, 22(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02345-7>
- [5] Harimurti, N., Setiasih, S., & Hudiyono, S. (2024). Optimization of high-pressure homogenization for *Moringa oleifera* leaf extract nanoemulsion. Journal of Applied Food Technology, 11(1), 45-52.
- [6] Limthin, D., & Phromyothin, S. (2019). Enhancing stability of nanoemulsion by freeze-drying encapsulation techniques. Journal of Nanostructure in Chemistry, 9(3), 213-225. <https://doi.org/10.1007/s40097-019-00311-4>
- [7] de Alencar, P. F. S., Monteiro, A. R., Menezes, H. C., & de Souza, E. L. (2024). Inulin as a multifunctional wall material in encapsulation: A review. Food Hydrocolloids, 149, 109650. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109650>
- [8] Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2024). Protein-polysaccharide interactions for stabilizing freeze-dried emulsions: A review of current advances. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(5), 1489-1505. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2115412>
- [9] Jaglan, P., Buttar, H. S., & Alshammari, K. F. (2024). Green extraction of polyphenols using deep eutectic solvents: Process optimization and mechanistic insights. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 37, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101395>
- [10] Wang, Y., Li, X., & Zhang, H. (2024). Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from *Moringa oleifera* leaves using deep eutectic solvent: Kinetics and modelling. Ultrasonics Sonochemistry, 102, 106740. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106740>
- [11] Jahan, N., Afaq, S., & Khan, N. A. (2018). Antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaf extract by DPPH radical scavenging assay. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 7(2), 182-186.
- [12] Nobossé, P., Fombang, E. N., & Mbofung, C. M. F. (2018). Effects of age and extraction solvent on the total phenol content and antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaves. Journal of

- Food Measurement and Characterization, 12(1), 208-216. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9632-2>
- [13] Joshi, S., Adhikari, B., & Dutta, P. (2021). FTIR characterization of Moringa oleifera leaf extract and its metal complexes for potential therapeutic agents. Materials Today: Proceedings, 45, 4567-4572. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.008>
- [14] Hani, N. M., Torkamani, A. E., & Zainul Abidin, S. (2016). Comparison of spray-drying and freeze-drying for phenolic compounds encapsulation: A microstructural and physicochemical study. Food Bioscience, 16, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.10.003>
- [15] Aleixandre-Tudo, J. L., & Du Toit, W. (2019). The role of in vitro release kinetics in understanding the functionality of encapsulated phenolic compounds. Food Chemistry, 274, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.124>
- [16] Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential -- What they are and what they are not? Journal of Controlled Release, 235, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- [17] Gray, D. A., Clarke, J., & Baux, M. (2016). Scanning electron microscopy analysis of freeze-dried microcapsules: Techniques for high-resolution imaging. Journal of Microscopy, 262(3), 283-293. <https://doi.org/10.1111/jmi.12403>
- [18] Asif, M. (2015). Chemistry and antioxidant activity of plants containing phenolic compounds. Pharmaceutical Chemistry Journal, 49(8), 537-547. <https://doi.org/10.1007/s11094-015-1325-4>
- [19] Shi, L., Zhao, W., Yang, Z., & Subirade, M. (2022). Plant-derived phenolic compounds: Their antioxidant and antimicrobial properties and potential applications. Food Reviews International, 38(sup1), 286-310. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1868513>
- [20] Panda, D., & Manickam, S. (2019). Cavitation technology---A greener extraction technique for bioactive compounds from plant materials. Chemical Engineering & Technology, 42(12), 2532-2544. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900108>
- [21] Amoroso, R., Micalizzi, G., & Dugo, P. (2021). Deep eutectic solvents and their applications in extraction of natural products: A review. Molecules, 26(4), 982. <https://doi.org/10.3390/molecules26040982>
- [22] Marchel, M., Cieśliński, H., & Boczkaj, G. (2022). Deep eutectic solvents for the extraction of polyphenols from natural sources: A review. Journal of Molecular Liquids, 347, 118284. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118284>
- [23] Wang, W., An, T., & Li, Q. (2023). Thermal stability of phenolic compounds during extraction processes: A comprehensive review. Food Chemistry, 404, 134612. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134612>
- [24] Choudhary, N., Singh, S., & Kumar, V. (2021). Deep eutectic solvents for extraction of bioactive compounds from plants: A review. Trends in Food Science & Technology, 115, 266-279. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.042>
- [25] Osorio-Tobón, J. F. (2020). Recent advances and comparisons of conventional and alternative extraction techniques for natural products. Food Research International, 131, 109001. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109001>
- [26] Hayat, M., Abbas, S., & Sohail, M. (2020). FTIR spectroscopic analysis of Moringa oleifera leaf extract and its correlation with antioxidant activity. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 33(4), 1687-1693.
- [27] Rawat, S., & Garg, S. (2021). Structural elucidation of bioactive phytochemicals using FTIR spectroscopy: A comprehensive approach. Journal of Applied Spectroscopy, 88(3), 521-528. <https://doi.org/10.1007/s10812-021-01205-2>
- [28] Shafie, M. H., Yusof, R., & Gan, C. Y. (2019). Deep eutectic solvents: An overview on extraction of flavonoids from natural sources. Current Opinion in Food Science, 26, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.04.003>
- [29] Vincent, J. (2020). FTIR characterization of plant extracts: Principles and applications. Vibrational Spectroscopy, 108, 103060. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103060>
- [30] Abbasi, S., Amiri, S., & Ehsani, A. (2021). Polysaccharide-based green extraction of nutraceuticals: A review. Foods, 10(5), 1027. <https://doi.org/10.3390/foods10051027>
- [31] Zheng, Y., Li, L., & Li, B. (2022). Ultrasound-assisted extraction combined with deep eutectic solvents for enhanced phenolic compound recovery from plant

- materials. Separation and Purification Technology, 284, 120251. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.12.0251>
- [32] Wu, J., Zhang, Y., & Wang, Z. (2020). Green extraction of Moringa oleifera polyphenols using deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction. Industrial Crops and Products, 156, 112845. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.1.12845>
- [33] Peixoto, L. S., Santos, P., & Meireles, M. A. A. (2022). Encapsulation efficiency of bioactive compounds from plant extracts: A comprehensive review. Food Research International, 152, 110948. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.1.10948>
- [34] Chowdhury, N. S., Rahman, M. S., & Ahmed, T. (2024). Controlled release mechanisms of encapsulated phenolic compounds in food systems. Journal of Food Engineering, 366, 111860. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111860>
- [35] Pateiro, M., Gómez, B., & Munekata, P. E. S. (2021). Encapsulation of natural antioxidants: Techniques and applications. Antioxidants, 10(7), 1043. <https://doi.org/10.3390/antiox10071043>
- [36] Dai, L., Wei, Y., & Sun, C. (2022). Zeta potential and stability of colloidal delivery systems for bioactive compounds. Advances in Colloid and Interface Science, 302, 102618. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102618>
- [37] Piacenza, E., Presentato, A., & Turner, R. J. (2018). Stability of biogenic nanoparticles and its influence on their functionality. Nanomaterials, 8(9), 704. <https://doi.org/10.3390/nano8090704>
- [38] Kumar, S., Shukla, A., & Baul, P. P. (2022). High-pressure homogenization for nanoemulsion production: Principles and applications in food industry. Food Engineering Reviews, 14(2), 289-308. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09308-w>
- [39] Hu, M., Xie, F., & Singh, H. (2017). Impact of span index and particle size distribution on emulsion stability and rheology. Food Hydrocolloids, 68, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.008>
- [40] López-Castejón, M. L., Bengoechea, C., & Guerrero, A. (2019). Inulin as encapsulation matrix for bioactive compounds: Rheological and structural characterization. Carbohydrate Polymers, 222, 115002. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.1.15002>
- [41] Xu, W., Jin, W., & Huang, Q. (2020). Gum Arabic and its multifaceted application in encapsulation of bioactive compounds. Food Hydrocolloids, 108, 106038. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106038>
- [42] Choi, S. J., & McClements, D. J. (2020). Nanoemulsions containing canola oil for delivery of lipophilic bioactive compounds: Formation and stability. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68(46), 12904-12913. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04589>
- [43] Aghababaei, F., Cano-Sarabia, M., & Maspoch, D. (2021). High-pressure homogenization for production of functional nanoemulsions: A review. Trends in Food Science & Technology, 114, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.009>
- [44] Enaru, B., Socaci, S., & Farcas, A. (2021). Microstructural assessment of unstable emulsions by scanning electron microscopy. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 616, 126312. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.1.26312>
- [45] Halahlah, A., Hatim, Z., & Hafidi, A. (2023). Gum Arabic and inulin synergism in microencapsulation: Morphological and physicochemical characterization. Food Structure, 36, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.10.0316>
- [46] Pieczykolan, E., & Kurek, M. A. (2019). Use of inulin and gum Arabic as wall materials for spray-drying of bioactive compounds. Powder Technology, 349, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.023>
- [47] Rashwan, A. K., Karim, N., & Chen, W. (2023). Polysaccharide-based encapsulation for protection of phenolic compounds: A comprehensive review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22(2), 1327-1363. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13116>
- [48] Davoudi, Z., Shahedi, M., & Kadivar, M. (2024). Influence of freeze-drying wall materials on phenolic retention and microstructural properties. Drying Technology, 42(1), 62-76. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2267108>



Scientific Research

Extraction and Nanoencapsulation of Moringa oleifera Leaf Extract and Evaluation of Its Chemical and Physical Properties

Zahra Heydari¹, Mojgan Shahamiran^{2*}, Sedigheh Yazdanpanah³

1- M.Sc., Department of Food Science and Technology, Food Technology Major, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran.

2- Department of Chemistry, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran.

3- Department of Food Science and Technology, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/05/15

Review: 2026/09/20

Accepted: 2026/09/27

Keywords:

Biosensors;

Food safety;

Nanotechnology;

Smart packaging;

Real-time monitoring

DOI: 10.48311/fsct.2026.120524.83145

*Corresponding Author E-

mozhganshamirani@gmail.com

Biosensors represent one of the most innovative technologies developed in recent decades in the field of the food industry. By integrating biotechnology, materials engineering, and data science, these systems enable accurate, rapid, and cost-effective monitoring of food quality and safety. Biosensors are designed based on sensitive biological elements such as enzymes, antibodies, or DNA, allowing them to detect chemical compounds, pathogens, and contaminants at very low concentrations.

The present study reviews the theoretical foundations, historical development, and technological advancements of biosensors in the food sector, and analyzes their applications in areas such as microbial contamination detection, raw material quality control, supply chain monitoring, and the development of smart packaging systems. Advances in nanotechnology, micro-systems, artificial intelligence, and the Internet of Things (IoT) have significantly enhanced the sensitivity of biosensors and enabled their integration into intelligent monitoring networks.

Despite advantages such as high accuracy, low cost, and real-time performance, several challenges remain, including biological stability, commercialization, and industrial standardization. The future of this technology lies in its integration with digital systems, biocompatible materials, and sustainable production processes. Such an approach can accelerate the transition toward a smart, transparent, and safe food industry, contributing significantly to the achievement of global food security.