

Journal Pre-proofs

Nanoencapsulation of Barley and Rice Sprout Extracts: The Key Role of Combined Plasma-Ultrasound Extraction in a Comparative Study

Behnaz Kaviyani, Reza Esmailzadeh Kenari, Reza Farahmandfar,

DOI: <https://doi.org/10.22104/ift.2026.8091.2263>

To appear in: *Innovative Food Technologies (IFT)*

Received Date: 31 December 2025

Revised Date: 10 February 2026

Accepted Date: 24 February 2026



Please cite this article as: Behnaz Kaviyani, Reza Esmailzadeh Kenari, Reza Farahmandfar, Nanoencapsulation of Barley and Rice Sprout Extracts: The Key Role of Combined Plasma-Ultrasound Extraction in a Comparative Study, *Innovative Food Technologies* (2026), doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2026.8091.2263>

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.

© 2026 The Author(s). Published by irost.org.

نانوکپسوله‌سازی عصاره جوانه‌ی جو و برنج: نقش کلیدی استخراج ترکیبی پلاسما-فراصوت در یک مطالعه مقایسه‌ای

بهناز کاویانی^۱، رضا اسماعیل زاده کناری^{۲*}، رضا فرهمندفر^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه آموزشی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲. استاد، گروه آموزشی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳. استاد، گروه آموزشی علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

* نویسنده مسئول: r.esmaeilzade@sanru.ac.ir

چکیده

جوانه‌های جو و برنج به‌عنوان منابع غنی از ترکیبات زیست‌فعال، پتانسیل آنتی‌اکسیدانی بالایی دارند. این پژوهش با هدف بهبود کارایی این ترکیبات از طریق بهینه‌سازی استخراج و نانوکپسوله‌سازی انجام شد. در گام اول، عصاره‌های جوانه جو و برنج با سه روش پلاسمای سرد (CP)، فراصوت (UAE) و روش ترکیبی متشکل از پیش‌ تیمار با پلاسمای سرد و به دنبال آن استخراج با فراصوت (CP-UAE) استخراج شدند. ارزیابی کمی نشان داد که روش CP-UAE برای جوانه جو به‌طور معنی‌داری مؤثرتر عمل کرده و بالاترین بازده استخراج (۱۴/۱۰۷۱ ± ۰/۱۴٪)، میزان فنل کل (۴/۱۱ ± ۰/۰۹ میلی گرم اسید گالیک بر گرم) و فلاونوئید کل (۳/۶۵ ± ۰/۰۷ میلی گرم کوئرستین بر گرم) و نیز قوی‌ترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی را ایجاد نمود. در گام دوم، کلیه عصاره‌ها در دو ماتریس ایزوله پروتئین آب‌پنیر (WPI) و صمغ دانه قدومه شهری (LPSG) نانوکپسوله شدند. طبق نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (شامل اندازه ذرات، پتانسیل زتا و راندمان کپسوله‌سازی)، نانوکپسول‌های حاوی عصاره‌های استخراج‌شده با روش ترکیبی CP-UAE به‌عنوان فرمولاسیون‌های برتر شناسایی شدند. در میان این نمونه‌ها، نانوکپسول-BCP-WPI (حاوی عصاره جو) با دارا بودن کوچک‌ترین اندازه ذره (۱۶۱/۴۰ نانومتر) و بالاترین راندمان کپسوله‌سازی (۸۵/۲۰ درصد)، مطلوب‌ترین مشخصات را نشان داد. در نهایت، کارایی آنتی‌اکسیدانی چهار فرمولاسیون برتر (حاوی عصاره‌های CP-UAE) در قالب یک آزمون پایداری اکسیداتیو تسریع‌شده به مدت ۲۴ روز در روغن آفتابگردان مورد سنجش قرار گرفت. داده‌ها آشکار ساخت که نانوکپسول BCP-UAE-WPI، پس از آنتی‌اکسیدان TBHQ، مؤثرترین نمونه بود و کمترین مقادیر شاخص‌های پراکسید و پارا-آنیزیدین را ایجاد نمود. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که راهبرد ترکیبی «بهینه‌سازی استخراج به روش CP-UAE» و به دنبال آن «طراحی نانوحامل بر پایه WPI» می‌تواند منجر به تولید یک آنتی‌اکسیدان طبیعی با کارایی قابل مقایسه با استانداردهای سنتزی شود.

کلمات کلیدی: اکسیداسیون، فراصوت، پلاسمای سرد، نانوکپسوله‌سازی

۱- مقدمه

فساد اکسیداتیو یکی از چالش‌های اصلی در حفظ کیفیت و ایمنی روغن‌های گیاهی پرمصرف، نظیر روغن آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، به شمار می‌رود. این روغن، با دارا بودن سطوح بالای اسیدهای چرب غیراشباع و ترکیبات زیست‌فعال ارزشمند مانند توکوفرول‌ها، در معرض اکسیداسیون قرار دارد که به کاهش ارزش تغذیه‌ای و ایجاد طعم و بوی نامطلوب می‌انجامد [۱، ۲]. اگرچه آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی نظیر BHA، BHT و TBHQ به‌طور گسترده برای مهار این پدیده مورد استفاده قرار

می‌گیرند، نگرانی‌های فزاینده در مورد اثرات بالقوه سرطان‌زایی آنها، تمایل به جایگزینی با آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی را تشدید کرده است [۳]. در این میان، جوانه‌های غلاتی مانند جو (*Hordeum vulgare* L.) و برنج (*Oryza sativa* L.) به عنوان منابعی غنی و امیدوارکننده از ترکیبات فنولی، فلاونوئیدی و اسیدهای فنولیک شناخته می‌شوند که به دلیل قدرت مهار رادیکال‌های آزاد، پتانسیل بالایی در جلوگیری از اکسیداسیون لیپیدها دارند [۴، ۵].

برای بهره‌برداری مؤثر از این پتانسیل، به کارگیری روش‌های استخراج کارآمد ضروری است [۶]. در این زمینه، فناوری‌های غیرحرارتی پلاسمای سرد (CP) و فراصوت (UAE) به‌عنوان روش‌های سبز مطرح گردیده‌اند. مکانیسم عمل CP مبتنی بر تولید گونه‌های فعال و ایجاد تغییرات مؤثر در ساختار دیواره سلولی است که نفوذپذیری آن را افزایش می‌دهد [۷-۹]. در مقابل، UAE با ایجاد پدیده کلویتاسیون، تخریب فیزیکی مستقیم دیواره سلول و افزایش انتقال جرم را موجب می‌شود [۱۰-۱۳]. نکته حائز اهمیت، رویکرد ترکیبی این دو تکنیک (CP-UAE) است. مطالعه موراکوندا و دیوودی (۲۰۲۴) به‌وضوح نشان می‌دهد که پیش‌تیمار با پلاسمای، کارایی استخراج به کمک فراصوت را از طریق یک اثر سینرژیستی قابل توجه، ارتقا می‌بخشد [۱۴].

با این حال، حتی با دستیابی به عصاره ای بهینه، پایین بودن پایداری و زیست‌دسترسی ترکیبات زیست‌فعال گیاهی در ماتریس‌های غذایی چالشی جدی باقی می‌ماند. فناوری نانوکپسوله‌سازی با محصورسازی این ترکیبات درون یک دیواره محافظ، راهکاری بنیادین برای غلبه بر این محدودیت ارائه می‌دهد [۱۵]. موفقیت این راهکار مستقیماً به انتخاب مواد دیواره‌ای زیست‌سازگار و عملکردی وابسته است. بر این اساس، در این پژوهش حاضر صمغ دانه قدومه شهری (*Lepidium perfoliatum* seed gum, LPSG) به‌عنوان یک پلی‌ساکارید گیاهی با قابلیت تشکیل ژل پایدار [۱۶] و ایزوله پروتئین آب‌پنیر (Whey Protein Isolate, WPI) با خواص امولسیفایری و آنتی‌اکسیدانی ذاتی [۱۷] به‌عنوان مواد دیواره‌ای انتخابی مورد بررسی قرار گرفتند. شواهد پژوهشی، از جمله مطالعات الصبحی و همکاران (۲۰۲۵) روی WPI و سیاری و همکاران (۲۰۲۱) روی LPSG، مؤید قابلیت این مواد در افزایش پایداری و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات زیست‌فعال محصورشده هستند [۱۸، ۱۹].

با بررسی پیشینه، اگرچه کارایی روش‌های استخراج نوین و فناوری نانوکپسوله‌سازی با دیواره‌های طبیعی (نظیر WPI و LPSG) به‌طور مجزا مورد تأیید قرار گرفته است، اما یک خلأ دانشی آشکاری در زمینه تلفیق روش استخراج ترکیبی CP-UAE (به‌عنوان مؤثرترین روش برای آزادسازی ترکیبات) با نانوکپسوله‌سازی هدفمند در دو دیواره‌ی LPSG و WPI و سپس ارزیابی مستقیم عملکرد نهایی این سیستم یکپارچه در مدل غذایی واقعی و حساسی مانند روغن آفتابگردان مشاهده می‌شود.

این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ طراحی شده است. بنابراین، اهداف این پژوهش عبارتند از: (۱) ارزیابی و مقایسه کارایی روش‌های مختلف استخراج (UAE, CP, CP-UAE) در بازیابی ترکیبات زیست‌فعال جوانه جو و برنج، (۲) بررسی تأثیر کپسوله‌سازی عصاره‌های برتر در دو دیواره طبیعی مذکور بر ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی نانوکپسول‌ها و (۳) تعیین کارایی نانوکپسول‌های بهینه در افزایش پایداری اکسیداتیو روغن آفتابگردان. این مطالعه برای نخستین بار این راهبرد یکپارچه را به منظور دستیابی به یک جایگزین طبیعی و مؤثر برای آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

برنج، جو و دانه قدومه شهری از بازار محلی ساری خریداری شدند. ایزوله پروتئین آب‌پنیر از شرکت سولیکو مستقر در شهرستان آمل تأمین شد. روغن آفتابگردان بدون مواد افزودنی آنتی‌اکسیدان از کارخانه غنچه (ساری) تهیه گردید. کلیه مواد شیمیایی، استانداردها و حلال‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر از شرکت مرک (Merck, Darmstadt, Germany) تهیه شدند.

۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- جوانه‌زنی برنج و جو

ابتدا بذره‌های تمیز و سالم، به منظور ضدعفونی، به مدت ۵ دقیقه در محلول پراکسید هیدروژن با غلظت حجمی ۵ درصد قرار داده شدند. سپس بذور به مدت ۶ ساعت در آب مقطر و در شرایط تاریک خیسانده شدند. پس از اتمام مرحله خیساندن، آب زهکشی گردید و بذور مجدداً با آب مقطر شست‌وشو شدند. فرآیند جوانه‌زنی به مدت هفت روز ادامه یافت و جوانه‌های حاصل در دمای 8°C - منجمد شدند. جوانه‌های منجمد شده توسط آسیاب (مدل MX-AC400، شرکت پاناسونیک، ژاپن) پودر گردیده و از الک با قطر مش ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شدند. پودر حاصل در کیسه‌های پلی پروپیلن بسته‌بندی و در دمای 20°C - جهت انجام آنالیزهای بعدی نگهداری شد [۲۰].

۲-۲-۲- استخراج عصاره با استفاده از پلاسما سرد

در این روش از دستگاه تولید پلاسما بر پایه تخلیه الکتریکی دی‌الکتریک (DBD) بهره گرفته شد. پروتکل اعمال پلاسمای سرد با استناد به مطالعه احمدیان و همکاران (۲۰۲۴) که استفاده موفقیت آمیز از این روش را نشان داده بود، انتخاب گردید. نمونه‌ها بین دو الکترود آلومینیومی با ابعاد 9×11 سانتی‌متر قرار گرفتند؛ الکترودها توسط صفحات میکا (الکترود پایین با ضخامت ۲ میلی‌متر و بالایی با ۱ میلی‌متر) عایق شده بودند. فاصله بین دو الکترود ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ولتاژ پیک به پیک برابر ۳۰ کیلوولت و فرکانس ۳۴۵ هرتز تنظیم گردید. نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در معرض پلاسما نیتروژنی با دبی گاز ورودی ۵ لیتر استاندارد در دقیقه (slm) قرار گرفتند [۲۱].

۲-۲-۳- استخراج عصاره با استفاده از فراصوت

عصاره‌گیری به روش فراصوت مطابق با پروتکل استاندارد شده‌ای انجام شد که پیش‌تر برای استخراج بهینه ترکیبات زیست فعال از ماتریس‌های گیاهی تدوین گردیده است [۲۲]. بدین ترتیب، جوانه‌های خشک‌شده در آن تحت خلا (مدل K.V150، شرکت پارس آزما، تهران) با دمای 50°C درجه سانتی‌گراد، آسیاب شده و با محلول اتانول 80% درصد به نسبت ۱:۵ (وزن/حجم) مخلوط شدند. مخلوط به دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک (مدل Soner206، شرکت روکر، تایوان) با دمای 35°C درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۳۵ کیلوهرتز قرار گرفت. در پایان، محلول‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ صاف شدند و حلال باقیمانده نیز از طریق تبخیر در آن خلأ حذف گردید.

۲-۲-۴- پیش‌تیمار با پلاسما و استخراج به کمک فراصوت

به منظور بررسی اثر سینرژیستی احتمالی بین دو فناوری غیرحرارتی، یک روش ترکیبی طراحی شد. در این مرحله، جوانه‌ها ابتدا طبق روش مذکور در بخش ۲-۲-۲ تحت تیمار پلاسما قرار گرفتند تا با ایجاد تغییرات اولیه در ساختار دیواره سلولی، نفوذپذیری آن افزایش یابد. سپس، عصاره‌گیری با استفاده از روش شرح داده شده در بند ۲-۲-۳ و به کمک حمام اولتراسونیک انجام گرفت تا تخریب مکانیکی مؤثرتری صورت پذیرد.

۲-۲-۵- ارزیابی بازده استخراج عصاره

برای محاسبه بازده استخراج، وزن عصاره خشک‌شده بر وزن اولیه نمونه عصاره‌گیری شده تقسیم شده و نتیجه به صورت درصد استخراج گزارش شد [۲۳].

۲-۲-۶- اندازه‌گیری فنول کل (TPC)

مقدار کل ترکیبات فنولی با استفاده از واکنش فولین-سیوکالتیو تعیین گردید. در این روش، 0.5 میلی‌لیتر از عصاره با 125 میکرولیتر معرف فولین رقیق‌شده (نسبت رقت ۱:۴ با آب مقطر) مخلوط شد. سپس، 250 میکرولیتر سدیم کربنات 25% درصد به ترکیب اضافه شده و نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب (مدل J-BAS8، شرکت جیسیکو، کره) با دمای 40°C درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند. میزان جذب در طول موج 760 نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر UV/Visible (مدل Uv 2100، شرکت یونیکو، آمریکا) اندازه‌گیری شد [۲۴].

۲-۲-۷- اندازه‌گیری ترکیبات فلاونوئیدی کل (TFC)

گردید. در نهایت، فرآیند خشک کردن انجمادی نمونه‌های منجمد با استفاده از دستگاه (مدل SUBLIMATOR-VACO5، شرکت زیربوس، آلمان) تحت شرایط خلأ (فشار ۰/۰۱۷ میلی‌پاسکال، دمای ۵۷- درجه سانتی‌گراد، ۴۸ ساعت) انجام شد. به این ترتیب، نانوکپسول‌هایی حاوی عصاره با پوشش‌های زیستی طبیعی حاصل گردید [۳۰].

۱۱-۲-۲- تعیین اندازه ذرات، PDI و پتانسیل زتا

جهت تعیین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی (PDI) و پتانسیل زتا، از دستگاه پراکندگی نور دینامیک (Malvern Instruments، Worcestershire، انگلستان) استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت [۳۱].

۱۲-۲-۲- راندمان کپسوله‌سازی

به‌منظور تعیین راندمان کپسوله‌سازی (EE)، مقدار ۰/۶ گرم از پودر نمونه در ۲۰ میلی‌لیتر آب با pH برابر ۱۰/۵ به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از همزن مغناطیسی (مدل D500، شرکت آلفا، ایران) همگن شد. سپس محلول به مدت ۱۰ دقیقه در سانتی‌فیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت تا فاز آبی از ذرات جدا گردد. فاز رویی به‌دست‌آمده با افزودن اسید غلیظ تا pH برابر ۷ خنثی شد. سپس مقدار ترکیبات فنولی موجود در این فاز با بهره‌گیری از روش فولین-سیوکالتیو اندازه‌گیری گردید. راندمان کپسوله‌سازی بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$EE(\%) = \frac{C_e}{C_t} \times 100 \quad (2)$$

C_e = مقدار ترکیبات فنولی کپسوله شده

C_t = مقدار اولیه ترکیبات فنولی موجود [۳۲].

۱۳-۲-۲- اندازه‌گیری میزان رهایش ترکیبات فنولی

برای سنجش میزان رهایش ترکیبات فنولی نانوکپسوله‌شده، مطابق با روش اسفنجانی و همکاران (۲۰۱۵)، مقدار ۳ گرم از نانوکپسول با ۳ گرم از محلول بافر فسفات (pH = 7) مخلوط گردید. مخلوط حاصل به مدت ۹۰ دقیقه در سانتی‌فیوژ با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت. سپس فاز زیرین جمع‌آوری شد و میزان ترکیبات فنولی آزاد آن با استفاده از روش فولین-سیوکالتیو اندازه‌گیری گردید. درصد رهایش ترکیبات فنولی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۳۳]:

$$\text{Release} (\%) = 100 - \left(\frac{C_2}{C_1} \times 100 \right) \quad (3)$$

C1: درصد ترکیبات فنولی در فاز داخلی

C2: درصد ترکیبات فنولی در فاز خارجی

۱۴-۲-۲- بررسی ساختار میکروسکوپی

برای بررسی ساختار سطحی و مورفولوژی نانوکپسول‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل XI30 Philips، شرکت فیلیپس، هلند) استفاده شد. نمونه‌ها ابتدا با چسب نقره‌ای روی پایه آلومینیومی قرار داده شدند و به مدت ۶ دقیقه با یک لایه نازک از جنس طلا پوشش داده شدند تا رسانایی لازم جهت تصویربرداری فراهم گردد. سپس با تابش پرتو الکترونی، تصویر از بازتاب الکترون‌های برگشتی به‌دست آمد [۲۷].

۱۵-۲-۲- ارزیابی پایداری اکسیداتیو روغن

به منظور بررسی پایداری اکسیداتیو، نمونه‌ها شامل: روغن آفتابگردان خالص (نمونه کنترل)، روغن حاوی عصاره آزاد، روغن حاوی عصاره کپسوله‌شده و روغن حاوی آنتی‌اکسیدان سنتزی TBHQ با غلظت ۱۰۰ ppm، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ روز در آون نگهداری شدند. آزمون‌های عدد پراکسید و پارا-آنیزیدین در فواصل زمانی ۴ روزه انجام گرفت.

۱-۱۵-۲-۲- عدد پراکسید

برای تعیین عدد پراکسید، ۵ گرم از نمونه روغن با محلول اسید استیک و کلروفرم به نسبت ۳:۲ مخلوط گردید. سپس ۰/۵ میلی لیتر محلول اشباع دیدید پتاسیم به محلول اضافه شده و مخلوط به مدت ۱ دقیقه در تاریکی نگهداری شد. پس از آن، ۳۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد و نمونه با محلول تیوسولفات سدیم ۰/۱ نرمال تا بی‌رنگ شدن تیترا گردید. ۰/۵ میلی لیتر چسب نشاسته به محلول افزوده شد و تیتراسیون تا از بین رفتن رنگ آبی ادامه یافت [۳۴]. عدد پراکسید بر حسب میلی‌اکی‌والان پراکسید به ازای هر کیلوگرم روغن با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$PV \text{ (meq O}_2\text{/kg)} = \frac{(V - V_0) \times C \times 1000}{m} \quad (۴)$$

که در آن:

V و V_0 به ترتیب حجم تیوسولفات مصرفی نمونه و بلانک (میلی لیتر)

C : غلظت تیوسولفات سدیم (mol/L)

m : جرم نمونه روغن (g)

۲-۱۵-۲-۲- شاخص پارا-آنیزیدین

برای تعیین شاخص پارا-آنیزیدین، یک گرم از نمونه روغن (m) در ۲۵ میلی لیتر ایزواکتان حل شد. جذب نمونه در طول موج ۳۵۰ نانومتر (X_b) در برابر ایزواکتان بلانک اندازه گیری شد. سپس ۵ میلی لیتر از محلول فوق با ۱ میلی لیتر معرف پارا-آنیزیدین واکنش داده شد. پس از انجام واکنش، جذب نمونه واکنش داده شده (X_a) مجدد در طول موج ۳۵۰ نانومتر اندازه گیری شد. شاخص پارا-آنیزیدین از رابطه زیر به دست آمد [۳۵]:

$$AV = \frac{25 \times (1.2X_a - X_b)}{m} \quad (۵)$$

۳-۲- روش آماری

تجزیه و تحلیل آماری تمامی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. جهت تعیین تفاوت معنادار بین تیمارها، از آزمون تحلیل واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) استفاده گردید و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan's multiple range test) در سطح معنی داری $P < 0.05$ انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار Excel 2013 ترسیم شدند. برای کاهش خطای آزمایش، کلیه آزمون‌ها به صورت سه تکراری اجرا گردیدند.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- ارزیابی میزان ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی و بازده استخراج

در این مطالعه، میزان ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی عصاره‌های جوانه جو و برنج استخراج شده با روش‌های CP، UAE و CP-UAE اندازه‌گیری شد (جدول ۲). تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که روش استخراج تاثیر معنی داری ($P < 0.05$) بر کلیه شاخص‌های اندازه‌گیری شده دارد. نتایج به وضوح نشان داد که روش ترکیبی به طور معنی داری برترین روش استخراج از نظر بازیابی ترکیبات زیست‌فعال است، به طوری که عصاره جوانه جو حاصل از این روش (BCP-UAE) با دارا بودن مقادیر ترکیبات فنولی کل (TPC) و

فلانوئیدی کل (TFC) به ترتیب $4/11 \pm 0/09$ میلی گرم اسید گالیک بر گرم و $3/65 \pm 0/07$ میلی گرم کوئرستین بر گرم)، در بالاترین رده معنی داری ($P < 0/05$) در آزمون مقایسه میانگین دانکن قرار گرفت و برتری آماری خود را نسبت به روش های منفرد تایید کرد. راندمان استخراج نیز در این روش $14/01 \pm 0/71$ ٪ برای BCP-UAE به طور معناداری از روش های منفرد (UAE $0/66$ تا $12/08 \pm 0/08$) و CP ($10/26 \pm 0/90$) بیشتر بود. این برتری چشمگیر را می توان به اثر سینرژیستی دو فناوری نسبت داد. پیش تیمار پلاسمای سرد با تولید گونه های فعال و تابش UV، پیوندهای دیواره سلولی را تضعیف می کند. این امر نفوذپذیری را افزایش داده و منجر به آزادسازی ترکیبات فنولی متصل به دیواره می شود که در شرایط عادی قابل استخراج نیستند [36، 37]. در مرحله بعد، امواج فراصوت با ایجاد پدیده کاویتاسیون، ساختار سلولی ازپیش تضعیف شده را به طور مؤثر تخریب می کند و در نتیجه، انتقال جرم و راندمان استخراج به طور قابل توجهی افزایش می یابد [12]. یافته های این بخش با نتایج پژوهش های مشابه کاملاً هم خوانی دارد. به عنوان مثال، موراکوندا و دویودی (2024) گزارش کردند که تیمار ترکیبی پلازما و فراصوت بر پوسته سیب چوبی (*Limonia acidissima*)، به طور قابل توجهی مقادیر TPC و TFC را در مقایسه با هر روش به تنهایی افزایش داد، که آن را با ایجاد ترک ها و منافذ بیشتر در سطح سلول تأیید کردند [14]. به طور مشابه، سامانی و همکاران (2025) نیز برتری روش ترکیبی را در استخراج ترکیبات از شیرین بیان گزارش نمودند [38]. به طور کلی، فراصوت با افزایش انتقال جرم [39-41] و پلازما با افزایش نفوذپذیری اولیه [42، 43] نقش مکمل ایفا می کنند.

۲-۳- خاصیت آنتی اکسیدانی عصاره ها

۱-۲-۳- روش مهار رادیکال آزاد DPPH

فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره ها با آزمون DPPH ارزیابی شد. نتایج جدول ۳ نشان می دهد که تمامی عصاره ها رفتار وابسته به غلظت داشتند؛ به طوری که با افزایش غلظت از 200 تا 1000 ppm، درصد مهار رادیکال به طور پیوسته افزایش یافت. این رفتار وابسته به غلظت، که با یک همبستگی خطی مثبت بسیار قوی بین مقادیر TPC و حداکثر فعالیت مهار ($r = 0/96$ ، $P < 0/05$) همراه بود، رابطه مستقیم بین محتوای فنولی عصاره ها و قدرت آنتی اکسیدانی آنها را تایید می کند. در واقع با افزایش غلظت عصاره، تعداد گروه های هیدروکسیل قابل واکنش با رادیکال های آزاد افزایش یافته و در نتیجه مهار مؤثرتری حاصل می شود [44]. در مقایسه میان عصاره ها، عصاره جوانه جو حاصل از روش ترکیبی (BCP-UAE) در غلظت 1000 ppm با $83/51$ ٪ مهار، قوی ترین فعالیت را به نمایش گذاشت و پس از آن عصاره برنج ترکیبی (RCP-UAE) با $75/68$ ٪ مهار قرار گرفت. عملکرد برتر این عصاره ها به وضوح با مقادیر بالاتر TPC و TFC اندازه گیری شده در بخش قبل (جدول 2) هم خوانی دارد و همبستگی مثبت قوی بین میزان فنلی و فعالیت آنتی اکسیدانی در آزمون DPPH را تأیید می کند. آنتی اکسیدان سنتزی TBHQ در غلظت بسیار پایین تر (100 ppm) با $92/25$ ٪ مهار، فعالیت به مراتب بالاتری نشان داد که قدرت ذاتی این ترکیب را می رساند.

عملکرد بهتر عصاره های حاصل از فراصوت تنها نسبت به عصاره های حاصل از پلاسمای سرد تنها، نشان می دهد که ممکن است گونه های اکسیدکننده تولید شده در طی فرآیند پلازما، به بخشی از ترکیبات فنولی آسیب زده باشند [45]. با این وجود، استفاده کوتاه مدت از پلازما به عنوان پیش تیمار، به گونه ای دیواره سلولی را تضعیف می کند که در مرحله بعد، فراصوت بتواند بدون آسیب رساندن به ترکیبات داخلی، استخراج مؤثری انجام دهد. این رویکرد ترکیبی است که منجر به برترین فعالیت آنتی اکسیدانی شده است [46].

یافته های حاضر با ادبیات علمی هم خوانی دارد؛ به طوری که وابستگی فعالیت آنتی اکسیدانی به غلظت عصاره و میزان ترکیبات فنولی [47، 48] پیش تر نیز گزارش شده است. همچنین، اثربخشی پیش تیمار پلاسمای سرد در ترکیب با استخراج فراصوت برای افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی در سایر مواد گیاهی نیز به اثبات رسیده است [49]. مطالعاتی مانند بائو و همکاران (2020) و خالد و همکاران (2025) نیز افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی پس از تیمار پلازما تفاله انگور و ریشه نخود (*Cicer arietinum*) را گزارش کرده اند که عموماً آن را به آزادسازی ترکیبات زیست فعال نسبت می دهند [50، 51].

۳-۲-۲- ارزیابی قدرت احیاکنندگی آهن

روش FRAP به عنوان یکی از آزمون‌های معتبر برای سنجش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات، بر اساس توانایی احیای یون‌های Fe^{3+} به Fe^{2+} عمل می‌کند [۳، ۵۲]. نتایج این آزمون (جدول ۴) نشان داد که قدرت احیاکنندگی با افزایش غلظت عصاره از ۲۰۰ به ۱۰۰۰ ppm به صورت معنی‌داری افزایش یافت. هرچه قدرت احیاکنندگی یک ترکیب بیشتر باشد، پتانسیل آن برای مهار واکنش‌های پراکسیداسیونی نیز افزایش می‌یابد. همچنین عصاره BCP-UAE مجدداً بالاترین قدرت احیاکنندگی را نشان داد. این روند، همبستگی قوی بین محتوای فنولی بالا (جدول ۲) و قدرت احیاکنندگی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد روش ترکیبی در آزادسازی ترکیبات احیاکننده مؤثرتر عمل کرده است [۴۹].

مقایسه با آنتی‌اکسیدان سنتزی TBHQ نشان داد که این ترکیب در تمامی سطوح غلظتی، قدرت احیاکنندگی به مراتب بالاتری (۹۱/۳۸) دارد. همچنین، عصاره‌های استخراج‌شده با فراصوت به طور کلی قدرت احیاکنندگی بالاتری نسبت به نمونه‌های استخراج‌شده تنها با پلاسمای سرد نشان دادند. این مشاهده ممکن است نشان‌دهنده این باشد که اگرچه پلاسمای سرد فرآیند آزادسازی ترکیبات فنولی را تسهیل می‌کند، اما گونه‌های فعال اکسیدکننده تولیدشده می‌توانند به برخی از این ترکیبات حساس آسیب رسانده و بخشی از پتانسیل احیاکنندگی آنها را کاهش دهند. با این حال، روش ترکیبی با بهینه‌سازی شرایط توانست بر این چالش غلبه کند [۴۵].

یافته‌های این بخش با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. به عنوان مثال، گزارش شده است که با افزایش غلظت عصاره رزماری، قدرت احیای آهن نیز به شکل خطی افزایش می‌یابد [۵۳، ۵۴]. احمدیان و همکاران (۲۰۲۳) اعلام کردند که در پژوهش آنها نمونه‌های پیش تیمار شده با پلاسمای هوا و نیتروژن اثر مثبتی در افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در مقایسه با نمونه تیمار نشده و روش مرسوم استخراج نشان دادند. همچنین TBHQ قدرت احیاکنندگی آهن بالاتری نسبت به تمام عصاره‌ها از خود نشان داد و به طور معنی‌داری بالاتر بود [۵۵]. گوکسن (۲۰۲۳) در پژوهشی اعلام کرد که عصاره جلبک *Laurencia papillosa* به دست‌آمده با فراصوت مقدار FRAP بسیار بالاتری نسبت به عصاره استخراج‌شده با روش مرسوم داشت و این را به اختلال مؤثرتر دیواره سلولی نسبت داد [۵۶].

۳-۳- بررسی خصوصیات نانوکپسول‌ها

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوکپسول‌های حاوی عصاره جو و برنج که در دو دیواره متفاوت LPSG و WPI کپسوله شده بودند، در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج آزمون ANOVA تاثیر معنی دار ($P < 0.05$) هر دو فاکتور نوع عصاره (هسته) و جنس دیواره را بر کلیه پارامترهای اندازه‌گیری شده نشان داد. اندازه ذرات تمامی نمونه‌ها در محدوده نانومتری قرار داشت که حاکی از موفقیت آمیز بودن روش امولسیون‌سازی و سونیکاسیون به کار رفته است [۵۷]. کوچکترین اندازه ذره به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) مربوط به نانوکپسول BCP-UAE-WPI (۱۶۱/۴۰ نانومتر) و پس از آن BCP-UAE-LPSG (۱۶۶/۰۱ نانومتر) بود. این کاهش اندازه‌ی معنادار در نمونه‌های حاوی عصاره‌ی استخراج‌شده با روش ترکیبی (CP-UAE) را می‌توان به ماهیت شیمیایی غنی‌تر و برهم‌کنش قوی‌تر ترکیبات زیست‌فعال آزادشده در این عصاره‌ها با ساختار دیواره نسبت داد. به نظر می‌رسد که ترکیبات با دسترس‌ی بهتر و گروه‌های عاملی فعال‌تر، امکان تشکیل ساختارهای امولسیونی فشرده‌تر و پایدارتری را در طول فرآیند هموژنیزاسیون فراهم می‌کنند. افزون بر آن، حضور ایزوله پروتئین آب‌پنیر (WPI) به دلیل ویژگی‌های سطحی مطلوب و قابلیت ایجاد دافعه‌های الکترواستاتیکی مؤثر، در جلوگیری از تجمع ذرات و حفظ اندازه کوچک آن‌ها نقش داشته است. این مشاهدات با یافته‌های پژوهش‌های مشابهی که تأثیر نوع دیواره و روش استخراج بر اندازه نهایی نانوذرات را گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد [۴۷، ۵۸-۶۰].

در پژوهشی مرتبط، رشید و همکاران (۲۰۲۲) نانوکپسوله‌سازی عصاره پوست انار استخراج‌شده با امواج فراصوت را در ماتریس‌هایی شامل مالتودکسترین، ایزوله پروتئین آب‌پنیر و ترکیب این دو به‌نسبت ۱:۱ انجام دادند. اندازه میانگین ذرات در این ترکیبات به ترتیب ۱۵۷/۸۲، ۱۸۹/۹۴ و ۱۹۱/۱۲ نانومتر گزارش شد [۶۱]. داده‌های پژوهش خلیلی و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که نانوذرات عصاره پوست انار، در شرایط استخراج اولتراسونیک و با دیواره صمغ دانه مرو، اندازه‌ای کمتر از ذرات حاصل از روش CP-UAE داشتند [۶۲]. هرچند نتایج احمدیان و همکاران (۲۰۲۴) با یافته‌های خلیلی در راستا بود، برخی تفاوت‌ها نیز مشاهده گردید که می‌تواند ناشی از تنوع در ماهیت عصاره، ساختار شیمیایی آن، یا میزان برهم‌کنش با ترکیبات دیواره باشد [۵۵].

یکی دیگر از شاخص‌های حیاتی، ضریب پراکندگی اندازه ذرات یا PDI است. PDI کمتر از ۰/۳ معمولاً دلالت بر ساختاری همگن و پایدار دارد [۶۰، ۶۳]. در این پژوهش میزان PDI برای تمامی نمونه‌ها کمتر از ۰/۳ بود (در بازه ۰/۱۸ تا ۰/۲۷) که نشان‌دهنده توزیع اندازه یکنواخت و باریک و در نتیجه پایداری فیزیکی مطلوب است. مطابق با نتایج بدست آمده، کمترین مقدار این شاخص در نمونه‌های BCP-UAE-WPI، BCP-UAE-LPSG و BCP-WPI مشاهده گردید. این همراهی اندازه کوچک ذره با PDI پایین در نمونه‌های برتر، نشان می‌دهد که نه تنها ذرات ریزتر شده‌اند، بلکه توزیع اندازه نیز یکنواخت‌تر بوده که خود حاکی از یک فرآیند امولسیون‌سازی کنترل‌شده‌تر و پایدارتر است.

از جمله عوامل مؤثر، می‌توان به بار سطحی نانوذرات اشاره کرد؛ به‌ویژه پتانسیل زتا که به‌عنوان شاخصی برای سنجش پایداری کلئیدی شناخته می‌شود [۶۴]. در این پژوهش پتانسیل زتای تمامی نانوکپسول‌ها مقادیر منفی را نشان داد (بین ۲۶- تا ۳۷- میلی‌ولت) که ماهیت آنیونی سطح این نانوکپسول‌ها را تأیید می‌کند. نمونه‌های BCP-UAE-WPI، BCP-UAE-LPSG و BCP-WPI دارای بالاترین مقادیر منفی پتانسیل زتا (بیشتر از ۳۴- میلی‌ولت) بودند. این مقادیر بالا نشان‌دهنده وجود نیروهای دافعه الکترواستاتیکی قوی بین ذرات است که مانع از هم‌جوشی و تجمع آنها شده و پایداری کلئیدی بلندمدت را پیش‌بینی می‌کند [۵۹، ۶۵، ۶۶]. محمدی ثانی و همکاران (۱۳۹۹) برای نانوکپسول‌های مبتنی بر WPI، پتانسیل زتای منفی (۱۵/۵- میلی‌ولت) گزارش کردند. نتایج مشابهی توسط سلیمان و همکاران (۲۰۲۴) نیز برای نمونه‌های مشابه ثبت گردید [۶۷]. افزون بر این، ابوطالب زاده و همکاران (۲۰۲۲) برای سامانه حاوی صمغ دانه قدومه شهری، پتانسیل زتای ۲۷- میلی‌ولت را گزارش کردند که بیانگر حضور گروه‌های کربوکسیلیک و ماهیت آنیونی صمغ مزبور است [۶۰].

راندمان کپسوله‌سازی، به عنوان معیار کلیدی موفقیت فرآیند کپسوله‌سازی، در محدوده ۷۲/۴۸ تا ۸۵/۲۰ درصد متغیر بود (جدول ۵). به طور کلی راندمان کپسوله‌سازی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع دیواره و هسته، نسبت بین فاز داخلی و دیواره، فناوری خشک‌سازی مورد استفاده و ویژگی‌های رئولوژیکی امولسیون اولیه قرار دارد؛ عواملی که همگی در تعامل با یکدیگر می‌توانند راندمان نهایی کپسوله‌سازی را در بازه‌ای میان صفر تا حدود ۹۵ درصد دستخوش تغییر سازند [۶۸].

داده‌های حاصل به‌وضوح نشان دادند که ترکیب دیواره و نوع هسته تأثیری تعیین‌کننده بر کارایی کپسوله‌سازی داشته‌اند؛ به‌ویژه آنکه نانوکپسول‌های BCP-UAE-WPI، BCP-UAE-LPSG و RCP-UAE-WPI به طور معنی‌داری ($P < 0/05$) بالاترین راندمان را از خود نشان دادند. چنان‌که پیش‌تر نیز بدان اشاره شد، ماهیت دیواره نقش برجسته‌ای در این میان ایفا می‌کند. تفاوت در ساختارهای پلیمری تشکیل‌شده می‌تواند منجر به تفاوت در ویژگی‌های نگهدارنده، نفوذپذیری و قابلیت تشکیل پوسته محافظ شود؛ ویژگی‌هایی که به‌نوبه خود راندمان کپسوله‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۶۹]. در تأیید این مسئله، دهقان و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی نانوامولسیون‌هایی را با بهره‌گیری از اسانس پوست پرتقال به‌عنوان هسته و صمغ‌های دانه شاهی، قدومه شهری و ترکیب ۱:۱ این دو به‌عنوان دیواره تولید نمودند. یافته‌های آنان تفاوت راندمان را ناشی از اختلاف در ساختار ماتریس‌های پلیمری حاصل دانستند [۷۰]. افزون بر این، آغباشلو و همکاران (۲۰۱۳) نیز با تأکید بر اهمیت ترکیب دیواره، تصریح کرده‌اند که تغییر در ساختار دیواره می‌تواند تأثیری قابل‌توجه در ارتقاء راندمان کپسوله‌سازی ایفا نماید [۷۱]. افزون بر این، نوع عصاره مورد استفاده به‌عنوان هسته و همچنین روش استخراج آن، به‌طرز قابل‌توجهی توانست بر راندمان کپسوله‌سازی مؤثر باشد و بهره‌گیری از روش‌های ترکیبی در استخراج عصاره‌ها منجر به افزایش راندمان کپسوله‌سازی گردید. در همین راستا، خلیلی و همکاران (۲۰۲۵)

دریافتند که استفاده از ترکیب روش‌های استخراج نظیر پلاسمای سرد و فراصوت نسبت به کاربرد صرف فراصوت، موجب ارتقاء معنادار راندمان کپسوله‌سازی عصاره پوست انار گردیده است [۶۲]. همچنین، رابطه معکوس معناداری بین اندازه ذرات و راندمان کپسوله‌سازی مشاهده شد؛ به طوری که نانوکپسول‌های با اندازه کوچکتر مانند (BCP-UAE-WPI) راندمان بالاتری داشتند. این موضوع را می‌توان به سطح تماس بیشتر و تشکیل پوسته محافظتی یکنواخت‌تر در اطراف ذرات ریزتر نسبت داد [۷۲].

۳-۴- رهایش ترکیبات فنولی از نانوکپسول‌ها

توانایی رهایش کنترل‌شده و تدریجی ترکیبات زیست‌فعال، یکی از مزایای اصلی فناوری نانوکپسوله‌سازی در کاربردهای غذایی محسوب می‌شود. از آنجایی که در مراحل ابتدایی نگهداری مواد غذایی، نیاز به حضور غلظت بالای آنتی‌اکسیدان‌ها کمتر است و این نیاز به تدریج با پیشرفت اکسیداسیون افزایش می‌یابد، آزادسازی آهسته و کنترل‌شده این ترکیبات می‌تواند به مهار مؤثرتر فرآیندهای اکسیداتیو منجر شود [۷۳]. میزان رهایش ترکیبات فنولی از نانوکپسول‌های مختلف طی ۲۴ روز نگهداری در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، میزان رهایش در تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان به طور معنی‌داری افزایش یافت. این روند افزایشی، ناشی از نفوذ تدریجی حلال به درون ماتریس دیواره، تورم پلیمری و در نهایت افزایش نفوذپذیری و انتشار ترکیبات هسته به محیط بیرونی است [۷۴]. این یافته با نتایج مطالعات پیشین که گزارش کرده‌اند رهایش ترکیبات زیست‌فعال از نانوکپسول‌ها معمولاً رفتار زمان-وابسته دارد، هم‌خوانی دارد [۷۵-۷۷].

در این پژوهش، تفاوت معناداری در میزان رهایش ترکیبات هسته از نانوکپسول‌های مختلف مشاهده گردید، به طوری که کمترین میزان رهایش مربوط به نانوکپسول BUAE-LPSG و بیشترین میزان رهایش از نانوکپسول BCP-UAE-WPI ثبت شد ($P < 0.05$). نانوکپسول‌های BCP-UAE-LPSG، RCP-UAE-WPI، RCP-UAE-LPSG و نیز رهایش بالایی نشان دادند. این تفاوت به روشنی نقش نوع دیواره، نوع هسته و حتی روش استخراج هسته را در رفتار رهایشی ترکیبات فنولی نمایان می‌سازد. تحقیقات نشان داده است که خواص ذاتی ماده دیواره، برهمکنش‌های شیمیایی بین ماده پوسته و ترکیب کپسوله شده و محیط بر رفتار رهایش تأثیر می‌گذارند [۷۸]. جالب توجه اینکه، رابطه‌ای معکوس میان میزان رهایش ترکیبات هسته و اندازه ذرات مشاهده شد. این یافته می‌تواند حاکی از نقش مؤثر اندازه نانوذرات در افزایش سطح تماس و تسهیل فرایند نفوذ عصاره به محیط پیرامون باشد. نانوذرات کوچک‌تر به دلیل نسبت سطح به حجم بالاتر، امکان تماس بیشتر با محیط را فراهم کرده و می‌توانند رهایش سریع‌تری داشته باشند. این الگوی رهایش کنترل‌شده و وابسته به فرمولاسیون، امکان تنظیم و بهینه‌سازی عملکرد نهایی نانوکپسول‌ها را در کاربرد هدف (مانند حفاظت از روغن) فراهم می‌سازد.

۳-۵- بررسی ساختار میکروسکوپی نانوکپسول‌ها

برای ارزیابی کیفی مورفولوژی سطح، چهار نمونه برتر از نانوکپسول‌ها که بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مطلوب (اندازه کوچک، راندمان بالا و پتانسیل زتای مناسب) انتخاب شده بودند - شامل BCP-UAE-WPI، BCP-UAE-LPSG، RCP-UAE-LPSG و WPI - مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور، پودر خشک‌شده‌ی نانوکپسول‌ها در آب مقطر بازسازی شد و یک قطره از سوسپانسیون حاصل پس از خشک شدن در دمای محیط، با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصویربرداری گردید. شکل‌های به دست‌آمده (شکل ۱) ساختارهایی کاملاً کروی، یکنواخت و با سطح صاف را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهند که فاقد هرگونه ترک، چروکیدگی یا فرورفتگی هستند.

این یکنواختی و یکپارچگی مورفولوژیکی، از دو جنبه حائز اهمیت است: نخست، تأییدی بر موفقیت روش امولسیون‌سازی و حفظ یکپارچگی ذرات در طول فرآیند خشک‌سازی انجمادی و بازسازی مجدد است که منجر به تشکیل ذراتی با هندسه مطلوب و پوسته‌ای یکپارچه گردیده است. دوم، چنین ساختار سطحی صاف و فشرده، به عنوان یک سد فیزیکی مؤثر در برابر نفوذ رطوبت و اکسیژن عمل کرده و پایداری ترکیبات زیست‌فعال محصورشده را در طول زمان افزایش می‌دهد. مشاهده ساختارهای کروی

یکنواخت پس از بازسازی، نشان می‌دهد که رطوبت در طی فرآیند خشک‌سازی به طور کامل از ماتریس پلیمری خارج شده و از بروز ناهنجاری‌های متداول مانند چروکیدگی ناشی از انقباض نامتوازن جلوگیری شده است [۵۸، ۷۹، ۸۰]. این یافته‌ها با نتایج سایر پژوهش‌هایی که از مواد دیواره‌ای طبیعی مشابهی مانند صمغ قدومه شهری [۱۸] و ایزوله پروتئین آب‌پنیر [۸۱] برای کپسوله‌سازی ترکیبات زیست‌فعال استفاده کرده‌اند، هم‌خوانی کامل دارد و نشان می‌دهد که این مواد پلیمری قابلیت تشکیل نانوکپسول‌های با ساختار مطلوب را دارا هستند.

۳-۶-۳- بررسی میزان اکسایش روغن آفتابگردان

۳-۶-۳-۱- عدد پراکسید

عدد پراکسید (PV) یکی از شاخص‌های کلیدی در سنجش کیفیت روغن‌ها و ارزیابی وضعیت اکسایشی آن‌هاست. این شاخص بیانگر غلظت هیدروپراکسیدها، به‌عنوان محصولات اولیه اکسیداسیون لیپیدها می‌باشد [۸۲]. بر اساس استانداردهای تعریف‌شده، عدد پراکسید بالاتر از ۹ میلی‌اکی‌والان اکسیژن به ازای هر کیلوگرم روغن دلالت بر آغاز فرآیندهای جدی اکسیداسیون دارد [۸۳]. پایداری اکسیداتیو روغن آفتابگردان غنی شده با عصاره‌های آزاد و نانوکپسوله‌شده، در طول یک دوره تسریع‌شده ۲۴ روزه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد با اندازه‌گیری عدد پراکسید، ارزیابی شد (شکل ۲). همان‌گونه که انتظار می‌رفت، نمونه کنترل (روغن بدون آنتی‌اکسیدان) در طول دوره، سریع‌ترین روند افزایشی را نشان داد و در روز ۲۴ به بالاترین مقدار (تقریباً ۲۵ میلی‌اکی‌والان اکسیژن به ازای یک کیلوگرم روغن) رسید. این شتاب اکسیداتیو در غیاب هرگونه بازدارنده، ناشی از پیشرفت آزادانه واکنش‌های زنجیره‌ای رادیکالی و تشکیل انباشته پراکسیدها است. این الگو که مطابق با استانداردها نشان‌دهنده آغاز اکسیداسیون جدی است [۸۳]. این مشاهده، با گزارش‌های پیشین مطابقت کامل دارد [۴۸، ۸۴-۸۶].

تمام تیمارهای حاوی آنتی‌اکسیدان، اعم از عصاره آزاد و نانوکپسوله‌شده، به‌طور معنی‌داری روند اکسیداسیون را در مقایسه با کنترل کند کردند. در میان عصاره‌های آزاد، نمونه‌های حاوی عصاره جوانه جو و برنج، هرچند مؤثر بودند، اما کارایی کمتری نسبت به نمونه‌های نانوکپسوله‌شده نشان دادند. این برتری نانوکپسول‌ها را می‌توان به نقش محافظتی دیواره نسبت داد که ترکیبات حساس آنتی‌اکسیدانی را از تخریب زودهنگام در محیط روغن حفظ می‌کند. برترین عملکرد در بین تیمارهای حاوی عصاره طبیعی، مربوط به نانوکپسول BCP-UAE-WPI (حاوی عصاره جو استخراج‌شده با روش ترکیبی و دیواره WPI) بود. این نمونه در پایان دوره، کمترین PV را در بین تمامی عصاره‌ها ثبت کرد و اختلاف آماری معنی‌داری با آنتی‌اکسیدان سنتزی TBHQ نشان نداد. این نتیجه نشان می‌دهد که این فرمولاسیون نانوکپسول قادر است عملکردی قابل مقایسه با یک آنتی‌اکسیدان سنتزی قوی از خود نشان دهد. این عملکرد را می‌توان به رهایش تدریجی و مناسب ترکیبات آنتی‌اکسیدانی از ساختار این نانوکپسول نسبت داد. این نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌ها که برتری نانوکپسوله‌سازی را در مهار اکسیداسیون روغن‌ها نشان داده‌اند، هم‌خوانی کامل دارد. آنها نشان می‌دهند که نانوکپسوله‌سازی نه تنها از تخریب زودهنگام ترکیبات زیست‌فعال جلوگیری می‌کند، بلکه با ایجاد یک سیستم رهایش کنترل‌شده، حضور پایدار و مؤثر آنتی‌اکسیدان را در سرتاسر دوره نگهداری تضمین می‌نماید [۱۶، ۸۱]. در نهایت، در حالی که TBHQ قوی‌ترین مهارکننده اکسیداسیون باقی ماند، عملکرد نزدیک نانوکپسول بهینه BCP-UAE-WPI، پتانسیل بالای آن را به عنوان یک جایگزین طبیعی و ایمن برای آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی در صنعت روغن نشان می‌دهد.

۳-۶-۳-۲- عدد پارا-آنیزیدین

اندیس پارا-آنیزیدین غلظت محصولات ثانویه اکسیداسیون (ترکیبات آلدئیدی مانند ۲-آلکنال‌ها و ۲-آلکادی‌انال‌ها) را اندازه‌گیری می‌کند که Z عامل اصلی طعم و بوی نامطلوب روغن هستند [۸۷]. بر اساس استانداردها، عدد پارا-آنیزیدین کمتر از ۱۰ بیانگر کیفیت مطلوب روغن است [۸۸]. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در ابتدای دوره نگهداری، اختلاف آماری معنی‌داری میان تیمارها از نظر مقدار این شاخص وجود نداشت. اما با پیشرفت زمان، روند افزایشی این شاخص در تمامی نمونه‌ها

ثبت گردید ($P < 0.05$). نمونه‌ی کنترل بیشترین افزایش را نشان داد. تشکیل این ترکیبات ثانویه، عمدتاً از طریق تجزیه ناپایدار هیدروپراکسیدهای اولیه رخ می‌دهد.

در تیمارهای حاوی عصاره‌ی نانوکپسوله‌شده، مقدار پارا-آنیزیدین به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از نمونه‌های دارای عصاره‌ی آزاد بود. این نتایج نشان می‌دهد که نانوکپسول‌ها نه تنها با مهار تشکیل پراکسیدها (مرحله اولیه)، بلکه با جلوگیری از تجزیه آنها به آلدئیدهای فرار (مرحله ثانویه)، اکسیداسیون را در دو مرحله متوالی مهار می‌کنند. در روز ۲۴، کمترین مقدار عدد پارا-آنیزیدین مربوط به تیمارهای حاوی نانوکپسول‌های BCP-UAE-WPI و BCP-UAE-LPSG بود. این عملکرد مطلوب را می‌توان به مدیریت موثر رهایش ترکیبات فعال در طول زمان نسبت داد که از تجزیه سریع و یک‌باره آنتی‌اکسیدان‌ها جلوگیری کرده و ظرفیت مهارکنندگی پایداری در برابر محصولات ثانویه ایجاد می‌کند. این مزیت رهایش کنترل‌شده در مطالعات متعددی به عنوان کلید موفقیت نانوکپسول‌ها در سیستم‌های روغنی ذکر شده است [۸۴، ۸۷، ۸۹-۹۱]. با این حال، عملکرد این دو تیمار همچنان از TBHQ ضعیف‌تر بود. این یافته به‌طور جامع نشان می‌دهد که سیستم نانوکپسول طراحی‌شده، یک راهبرد حفاظتی دوسطحی موثر در برابر اکسیداسیون لیپیدها ارائه می‌دهد و پتانسیل بالایی به عنوان یک جایگزین طبیعی برای آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی دارد.

۴- نتیجه گیری

با پیشرفت روزافزون فناوری و افزایش آگاهی عمومی نسبت به آثار زیان‌بار آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی، گرایش به بهره‌گیری از ترکیبات طبیعی با منشأ گیاهی، به‌ویژه در صنایع غذایی و دارویی، رشد چشمگیری یافته است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف استخراج بر ویژگی آنتی‌اکسیدانی عصاره‌های حاصل از جوانه‌های جو و برنج و نیز مطالعه عملکرد نانوکپسول‌های حاوی این عصاره‌ها در ماتریس‌های زیست‌سازگار شامل صمغ دانه قدومه شهری و ایزوله پروتئین آب پنیتر طراحی و اجرا گردید. نتایج نشان داد که روش ترکیبی CP-UAE در مقایسه با روش‌های منفرد UAE و CP به‌طور معناداری راندمان استخراج، میزان ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی کل و در نتیجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره‌ها را افزایش می‌دهد. عصاره جوانه جو حاصل از این روش (BCP-UAE) دارای بالاترین میزان ترکیبات زیست‌فعال و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بود. نانوکپسوله‌سازی این عصاره‌های برتر در دیواره‌های WPI و LPSG منجر به تولید ذراتی با اندازه نانومتری، توزیع اندازه یکنواخت، پتانسیل زتای منفی بالا و راندمان کپسوله‌سازی مطلوب گردید. تصاویر SEM ساختار کروی، یکنواخت و عاری از ترک نانوکپسول‌ها را تأیید کرد. ارزیابی پایداری اکسیداتیو روغن آفتابگردان در طول ۲۴ روز نگهداری تسریع‌شده نشان داد که تمامی تیمارهای حاوی آنتی‌اکسیدان (عصاره آزاد و نانوکپسوله‌شده) به‌طور معنی‌داری اکسیداسیون را در مقایسه با نمونه کنترل کاهش دادند. در این میان، نانوکپسول حاوی عصاره جوانه جو استخراج‌شده با روش ترکیبی در دیواره WPI (BCP-UAE-WPI) بهترین عملکرد را داشت و پس از آنتی‌اکسیدان سنتزی TBHQ، کمترین مقادیر اکسیداسیون را نشان داد. به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعه مؤید برتری استراتژی تلفیقی استخراج ترکیبی CP-UAE و نانوکپسوله‌سازی در دیواره WPI برای تولید یک سیستم حامل طبیعی و مؤثر از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی جوانه غلات است. این سیستم قادر است پایداری اکسیداتیو روغن آفتابگردان را به‌طور چشمگیری افزایش داده و پتانسیل بالایی به عنوان یک جایگزین ایمن و طبیعی برای آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی مانند TBHQ در صنایع غذایی دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، از طرح‌های آزمایشی عاملی کامل همراه با تحلیل‌های آماری چندمتغیره (مانند ANOVA دوطرفه) برای بررسی دقیق‌تر اثرات متقابل بین پارامترهای مؤثر مانند روش استخراج، نوع دیواره و نوع عصاره استفاده شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از هلدینگ صنایع غذایی و استریوش که در انجام پژوهش یاری داده است، اعلام کنند.

مراجع

- [1] Khaleghizadeh, A. (2011). Effect of morphological traits of plant, head and seed of sunflower hybrids on house sparrow damage rate. *Crop Protection*, 30(3), 360-367. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.12.023>
- [2] Kolisnyk, O., Mazur, V., Butenko, S., Shumkova, O., Nechyporenko, V., Bahorka, M., . . . Selezon, O. (2025). Agroecological assessment of the impact of harmful organisms on the bioenergy productivity of sunflower and sustainable marketing to reduce harmful impact on the environment. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2025. Vol. 26, Issue 6. P. 139-145. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/204083>.
- [3] Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review. *Journal of functional foods*, 18, 820-897. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018>
- [4] Bibi, C., & Husain, S. (2024). A comprehensive review on medicinal properties, phytochemistry, and pharmacology of *Hordeum vulgare* linn: An important plant origin Unani drug. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 13(3), 132-139. DOI:10.22271/phyto.2024.v13.i3b.14954.
- [5] Andriani, R., Subroto, T., Ishmayana, S., & Kurnia, D. (2022). Enhancement methods of antioxidant capacity in rice bran: A review. *Foods*, 11(19), 2994. <https://doi.org/10.3390/foods11192994>
- [6] Garcia-Vaquero, M., Rajauria, G., & Tiwari, B. (2020). Conventional extraction techniques: Solvent extraction. In *Sustainable seaweed technologies* (pp. 171-189): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817943-7.00006-8>
- [7] Di, L., Zhang, J., Zhang, X., Wang, H., Li, H., Li, Y., & Bu, D. (2021). Cold plasma treatment of catalytic materials: a review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(33), 333001. DOI 10.1088/1361-6463/ac0269
- [8] Tabares, F. L., & Junkar, I. (2021). Cold plasma systems and their application in surface treatments for medicine. *Molecules*, 26(7), 1903. <https://doi.org/10.3390/molecules26071903>
- [9] Kaushik, N., Mitra, S., Baek, E. J., Nguyen, L. N., Bhartiya, P., Kim, J. H., . . . Kaushik, N. K. (2023). The inactivation and destruction of viruses by reactive oxygen species generated through physical and cold atmospheric plasma techniques: Current status and perspectives. *Journal of Advanced Research*, 43, 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.03.002>.
- [10] Pawliszyn, J. Extraction techniques and applications: Food and beverage. (No Title).
- [11] Tiwari, B. K. (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>.
- [12] Kumar, K., Srivastav, S., & Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>.
- [13] Osorio-Tobón, J. F. (2020). Recent advances and comparisons of conventional and alternative extraction techniques of phenolic compounds. *J Food Sci Technol*, 57(12), 4299-4315. doi:10.1007/s13197-020-04433-2
- [14] Murakonda, S., & Dwivedi, M. (2024). Combined use of pulse ultrasound–assisted extraction with atmospheric cold plasma: extraction and characterization of bioactive compounds from wood apple shell (*Limonia acidissima*). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(22), 28233-28251. 10.1007/s13399-022-03448-3
- [15] Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S., & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia food science*, 1, 1806-1815. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>
- [16] Bagheri, R., Izadi Amoli, R., Tabari Shahndasht, N., & Shahosseini, S. R. (2016). Comparing the effect of encapsulated and unencapsulated fennel extracts on the shelf life of minced common kilka (*C lupeonella cultriventris caspia*) and *Pseudomonas aeruginosa* inoculated in the mince. *Food Science & Nutrition*, 4(2), 216-222. <https://doi.org/10.1002/fsn3.275>
- [17] Hosseinnia, M., Almasi, H., & Alizadeh Khaledabad, M. (2018). Evaluation of the properties of microcapsules containing *Ziziphora clinopodiodes* extract stabilized by gum Arabic, whey protein isolate, guar gum and

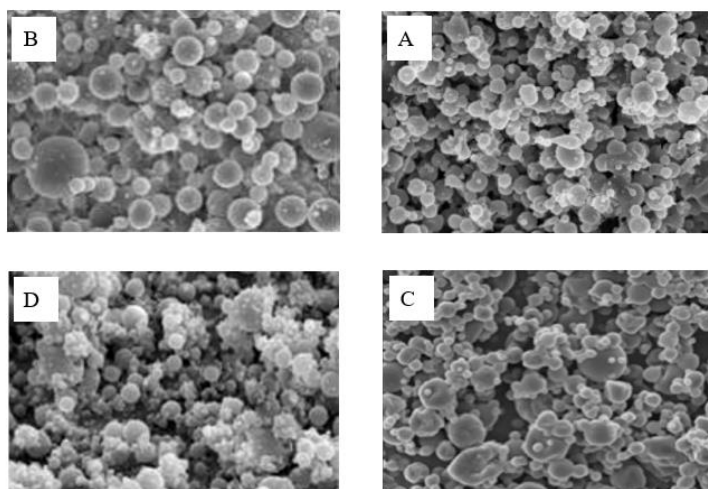
- their combinations. *Journal of Food Researches/vol.29 No.4/ 2020/pp 101-123*
<https://foodresearch.tabrizu.ac.ir>. [In Persian]
- [18] Sayyari, Z., Rabbani, M., Farahmandfar, R., Esmacilzadeh Kenari, R., & Mousavi Nadoushan, R. (2021). Investigation of the effect of essential oil along with nanocoatings containing gums in the development of fish fillet storage time. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4), 3539-3552. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00932-8>
- [19] Al-subhi, F. M. M. (2025). Development, characterization, and prolonged shelf life of functional yogurt enriched with nanoencapsulated yellow Capsicum Annuum extract using whey protein. *Applied Food Research*, 5(1), 100758. doi:<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100758>
- [20] Aborus, N. E., Brunet, J. Č., Šaponjac, V., & Vulić, J. (2019). Enhancement of functional properties and biological activity in barley and wheat grains by germination. *Scientific Journal of Applied Sciences of Sabratha University*, 20-41. DOI:10.47891/sabujas.v2i3.20-41
- [21] Ahmadian, S., Kenari, R. E., Amiri, Z. R., Sohbatzadeh, F., & Khodaparast, M. H. H. (2024). Fabrication of double nano-emulsions loaded with hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) extract stabilized with soy protein isolate alone and combined with chia seed gum in controlling the oxidative stability of canola oil. *Food Chemistry*, 430, 137093. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137093>
- [22] Hammi, K. M., Jdey, A., Abdelly, C., Majdoub, H., & Ksouri, R. (2015). Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidant compounds from Tunisian *Zizyphus lotus* fruits using response surface methodology. *Food Chemistry*, 184, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.047>
- [23] Felegary, M., Jafarinaeimi, K., & Akhavan, H. R. (2023). Developing and Evaluating a Hot Water-Assisted Extractor for Making Instant Drink from Date Kernels Powder. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 2(1), 84-98. DOI: 10.22103/bbr.2023.21799.1049.
- [24] Razavi, R., & Kenari, R. E. (2021). Antioxidant evaluation of *Fumaria parviflora* L. extract loaded nanocapsules obtained by green extraction methods in oxidative stability of sunflower oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(3), 2448-2457. DOI:10.1007/s11694-021-00837-6
- [25] salmanian, S., sadeghi mahoonak, A. R., Alami, M., & Ghorbani, M. (2014). Evaluation of Total Phenolic, Flavonoid, Anthocyanin Compounds, Antibacterial and Antioxidant Activity of Hawthorn (*Crataegus Elbursensis*) Fruit Acetonic Extract. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 13(1), 53-66. Retrieved from <http://journal.rums.ac.ir/article-1-1546-fa.html>
- [26] Yim, H. S., Chye, F. Y., Koo, S. M., Matanjun, P., How, S. E., & Ho, C. W. (2012). Optimization of extraction time and temperature for antioxidant activity of edible wild mushroom, *Pleurotus porrigens*. *Food and Bioprocess Processing*, 90(2), 235-242. DOI: 10.1016/j.fbp.2011.04.001
- [27] Peanparkdee, M., Yamauchi, R., & Iwamoto, S. (2018). Characterization of antioxidants extracted from Thai riceberry bran using ultrasonic-assisted and conventional solvent extraction methods. *Food and bioprocess technology*, 11, 713-722. DOI:10.1007/s11947-017-2047-4
- [28] Esmacilzadeh Kenari, R., Mohsenzadeh, F., & Amiri, Z. R. (2014). Antioxidant activity and total phenolic compounds of Dezful sesame cake extracts obtained by classical and ultrasound-assisted extraction methods. *Food Science & Nutrition*, 2(4), 426-435. <https://doi.org/10.1002/fsn3.118>
- [29] Dehghan, B., Esmacilzadeh Kenari, R., & Raftani Amiri, Z. (2018). The effect of *Lepidium sativum* and *Lepidium perfoliatum* gums on properties of nanocapsule containing essential oil of orange. JFST No. 78, Vol. 15. . Retrieved from https://fsct.modares.ac.ir/article_25602_2cd39cf1b560c1eef41a7cebffc64b75.pdf. [In Persian]
- [30] Jafari, S. Z., Jafarian, S., Hojjati, M., & Najafian, L. (2022). Evaluation of antioxidant activity of nano- and microencapsulated rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves extract in cress (*Lepidium sativum*) and basil (*Ocimum basilicum*) seed gums for enhancing oxidative stability of sunflower oil. *Food Science & Nutrition*, 10(6), 2111-2119. DOI: 10.1002/fsn3.2827.
- [31] Joye, I. J., Davidov-Pardo, G., & McClements, D. J. (2015). Encapsulation of resveratrol in biopolymer particles produced using liquid antisolvent precipitation. Part 2: Stability and functionality. *Food Hydrocolloids*, 49, 127-134. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.02.038
- [32] Jivan, M. J., Yarmand, M., & Madadlou, A. (2014). Encapsulation of date palm pit extract via particulation of starch nanocrystals in a microemulsion. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(3), 920-923. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12359>
- [33] Esfanjani, A. F., Jafari, S. M., Assadpoor, E., & Mohammadi, A. (2015). Nano-encapsulation of saffron extract through double-layered multiple emulsions of pectin and whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 165, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.022>

- [34] Shen, Y., Lu, T., Liu, X.-Y., Zhao, M.-T., Yin, F.-W., Rakariyatham, K., & Zhou, D.-Y. (2020). Improving the oxidative stability and lengthening the shelf life of DHA algae oil with composite antioxidants. *Food chemistry*, 313, 126139. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126139>
- [35] Wang, Y.-Z., Fu, S.-G., Wang, S.-Y., Yang, D.-J., Wu, Y.-H. S., & Chen, Y.-C. (2018). Effects of a natural antioxidant, polyphenol-rich rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) extract, on lipid stability of plant-derived omega-3 fatty-acid rich oil. *Lwt*, 89, 210-216. DOI:10.1016/j.lwt.2017.10.055
- [36] Bao, Y., Reddivari, L., & Huang, J.-Y. (2020a). Development of cold plasma pretreatment for improving phenolics extractability from tomato pomace. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 65, 102445. DOI:10.1016/j.ifset.2020.102445
- [37] Hou, Y., Wang, R., Gan, Z., Shao, T., Zhang, X., He, M., & Sun, A. (2019). Effect of cold plasma on blueberry juice quality. *Food chemistry*, 290, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.123>
- [38] Samani, B. H., Sharifi, A., Jamshidi-Kia, F., Ghaterehsamani, S., & Taki, K. (2025). Advanced extraction of *Glycyrrhiza glabra* root extract using a combined ultrasonic and cold plasma reactor. *Scientific Reports*, 15(1), 1-17.
- [39] Kumar, Y., Singhal, S., Tarafdar, A., Pharande, A., Ganesan, M., & Badgujar, P. C. (2020). Ultrasound assisted extraction of selected edible macroalgae: Effect on antioxidant activity and quantitative assessment of polyphenols by liquid chromatography with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). *Algal Research*, 52, 102114. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102114>
- [40] Ummat, V., Tiwari, B. K., Jaiswal, A. K., Condon, K., Garcia-Vaquero, M., O'Doherty, J., . . . Rajauria, G. (2020). Optimisation of ultrasound frequency, extraction time and solvent for the recovery of polyphenols, phlorotannins and associated antioxidant activity from brown seaweeds. *Marine drugs*, 18(5), 250. <https://doi.org/10.3390/md18050250>
- [41] Sapatinha, M., Oliveira, A., Costa, S., Pedro, S., Gonçalves, A., Mendes, R., . . . Pires, C. (2022). Red and brown seaweeds extracts: A source of biologically active compounds. *Food chemistry*, 393, 133453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133453>
- [42] Rodríguez, Ó., Gomes, W. F., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. (2017). Effect of indirect cold plasma treatment on cashew apple juice (*Anacardium occidentale* L.). *Lwt*, 84, 457-463. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.010>
- [43] Herceg, Z., Kovačević, D. B., Kljusurić, J. G., Jambrak, A. R., Zorić, Z., & Dragović-Uzelac, V. (2016). Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice. *Food chemistry*, 190, 665-672. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.135>
- [44] Delfanian, M., Esmailzadeh Kenari, R., & Sahari, M. A. (2015). Frying stability of sunflower oil blended with jujube (*Ziziphus mauritiana* Lam.) leaf extract. *Food Science & Nutrition*, 3(6), 548-556. DOI: 10.1002/fsn3.247
- [45] Tabibian, S., Labbafi, M., Askari, G., Rezaeinezhad, A., & Ghomi, H. (2020). Effect of gliding arc discharge plasma pretreatment on drying kinetic, energy consumption and physico-chemical properties of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of food engineering*, 270, 109766. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109766>
- [46] Sarangapani, C., Thirumdas, R., Devi, Y., Trimukhe, A., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2016). Effect of low-pressure plasma on physico-chemical and functional properties of parboiled rice flour. *LWT-Food Science and Technology*, 69, 482-489. DOI:10.1016/j.lwt.2015.03.026
- [47] Rezaei Savadkouhi, N., Ariaei, P., & Charmchian Langerodi, M. (2020). The effect of encapsulated plant extract of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) in biopolymer nanoemulsions of *Lepidium perfoliatum* and *Orchis mascula* on controlling oxidative stability of soybean oil. *Food Science & Nutrition*, 8(2), 1264-1271. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1415>
- [48] Safarpour, B., Kenari, R. E., & Farmani, J. (2023). Evaluation of antioxidant properties of nanoencapsulated sage (*Salvia officinalis* L.) extract in biopolymer coating based on whey protein isolate and Qodumeh Shahri (*Lepidium perfoliatum*) seed gum to increase the oxidative stability of sunflower oil. *Food Science & Nutrition*, 11(3), 1394-1402. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3177>
- [49] Faria, G., Souza, M., Oliveira, J., Costa, C., Collares, M., & Prentice, C. (2020). Effect of ultrasound-assisted cold plasma pretreatment to obtain sea asparagus extract and its application in Italian salami. *Food Research International*, 137, 109435. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109435>
- [50] Bao, Y., Reddivari, L., & Huang, J.-Y. (2020b). Enhancement of phenolic compounds extraction from grape pomace by high voltage atmospheric cold plasma. *Lwt*, 133, 109970. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109970>

- [51] Khalid, W., Benmebarek, I. E., Zargarchi, S., Kumar, P., Javed, M., Moreno, A., . . . Esatbeyoglu, T. (2025). Optimization of the effect of cold plasma treatment on UAE-NADES green extraction of chickpea roots (*Cicer arietinum*) bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*, *114*, 107276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107276>
- [52] Baba, W. N., Rashid, I., Shah, A., Ahmad, M., Gani, A., Masoodi, F., . . . Wani, S. (2016). Effect of microwave roasting on antioxidant and anticancerous activities of barley flour. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *15*(1), 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.06.003>
- [53] Ramya Premanath, R. P., Sudisha, J., Devi, N. L., & Aradhya, S. (2011). Antibacterial and anti-oxidant activities of fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.) leaves. DOI: 10.3923/tjimp.2011.695.705
- [54] Saini, A., Pandey, A., Sharma, S., Suradkar, U. S., Ambedkar, Y. R., Meena, P., . . . Gurjar, A. S. (2020). Assessment of antioxidant activity of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) leaves extract. *J. Pharmacogn. Phytochem*, *9*, 14-17.
- [55] Ahmadian, S., Kenari, R. E., Amiri, Z. R., Sohbatzadeh, F., & Khodaparast, M. H. H. (2023). Effect of ultrasound-assisted cold plasma pretreatment on cell wall polysaccharides distribution and extraction of phenolic compounds from hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). *International journal of biological macromolecules*, *233*, 123557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123557>
- [56] Goksen, G. (2023). Elucidation and quantification health-promoting phenolic compounds, antioxidant properties and sugar levels of ultrasound assisted extraction, aroma compositions and amino acids profiles of macroalgae, *Laurencia papillosa*. *Ultrasonics Sonochemistry*, *98*, 106527. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106527>
- [57] Li, P.-H., & Chiang, B.-H. (2012). Process optimization and stability of D-limonene-in-water nanoemulsions prepared by ultrasonic emulsification using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, *19*(1), 192-197. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.05.017>
- [58] Kenari, R. E., Amiri, Z. R., Motamedzadegan, A., Milani, J. M., Farmani, J., & Farahmandfar, R. (2020). Optimization of Iranian golpar (*Heracleum persicum*) extract encapsulation using sage (*Salvia macrosiphon*) seed gum: chitosan as a wall materials and its effect on the shelf life of soybean oil during storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *14*, 2828-2839. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00528-8>
- [59] Razavi, R., & Kenari, R. E. (2021). Antioxidant evaluation of *Fumaria parviflora* L. extract loaded nanocapsules obtained by green extraction methods in oxidative stability of sunflower oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-10. DOI:10.1007/s11694-021-00837-6
- [60] Aboutalebzadeh, S., Esmailzadeh-Kenari, R., & Jafarpour, A. (2022). Nano-encapsulation of sweet basil essential oil based on native gums and its application in controlling the oxidative stability of Kilka fish oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *16*(3), 2386-2399. DOI: 10.22541/au.162066324.45396746/v1
- [61] Rashid, R., Masoodi, F. A., Wani, S. M., Manzoor, S., & Gull, A. (2022). Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from pomegranate peel, their nanoencapsulation and application for improvement in shelf life extension of edible oils. *Food chemistry*, *385*, 132608. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132608>
- [62] Khalili, M., Najafi, A., & Razavi, R. (2025). Preservative activity of free and nano-encapsulated pomegranate peel extract obtained using cold plasma and ultrasound-assisted method in increasing the shelf life of thigh mutton mince. *Applied Food Research*, *5*(1), 100668. doi:<https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100668>
- [63] Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S. R., Chougule, M. B., & Tekade, R. K. (2019). Importance of physicochemical characterization of nanoparticles in pharmaceutical product development. In *Basic fundamentals of drug delivery* (pp. 369-400): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817909-3.00010-8>
- [64] Astutiningsih, F., Anggrahini, S., Fitriani, A., & Supriyadi, S. (2022). Optimization of saffron essential oil nanoparticles using chitosan-Arabic gum complex nanocarrier with ionic gelation method. *International Journal of Food Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4035033>
- [65] Lu, G. W., & Gao, P. (2010). Emulsions and microemulsions for topical and transdermal drug delivery. In *Handbook of non-invasive drug delivery systems* (pp. 59-94): Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2025-2.10003-4>
- [66] Kenari, R. E., & Razavi, R. (2022). Encapsulation of bougainvillea (*Bougainvillea spectabilis*) flower extract in *Urtica dioica* L. seed gum: Characterization, antioxidant/antimicrobial properties, and in vitro digestion. *Food Science & Nutrition*, *10*(10), 3436-3443. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2944>

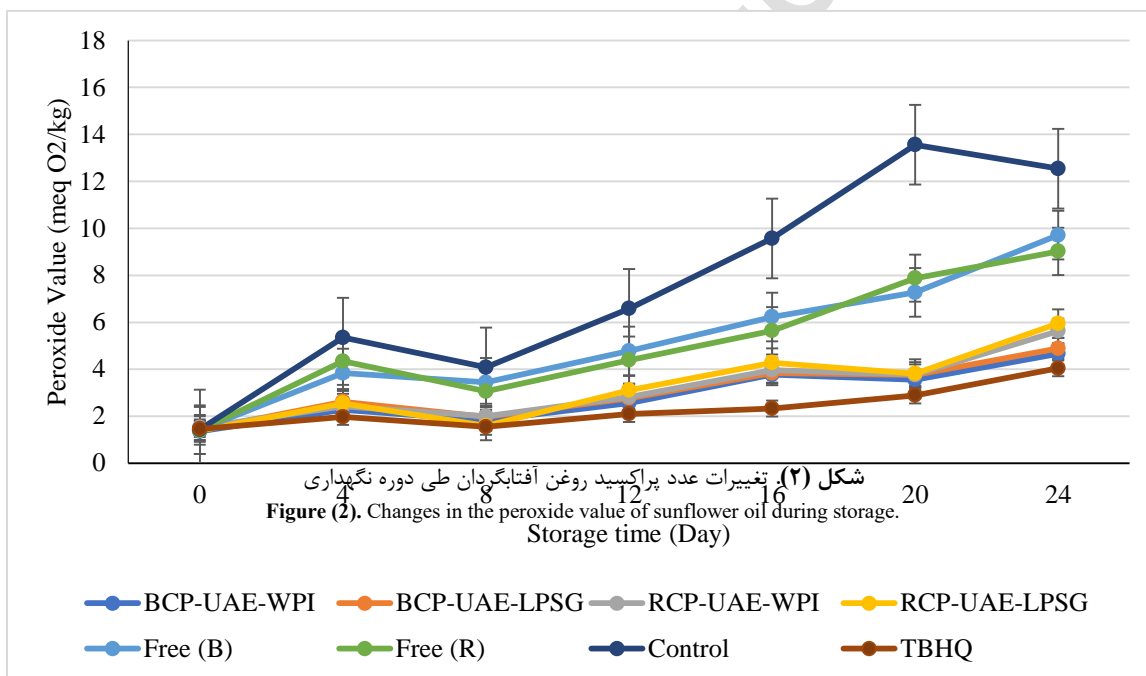
- [67] Soliman, T. N., Karam-Allah, A. A. K., Abo-Zaid, E. M., & Mohammed, D. M. (2024). Efficacy of nanoencapsulated *Moringa oleifera* L. seeds and *Ocimum tenuiflorum* L. leaves extracts incorporated in functional soft cheese on streptozotocin-induced diabetic rats. *Phytomedicine Plus*, 4(3), 100598. doi:<https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2024.100598>
- [68] Maghsoudi, S. 1 , EsmailzadehKanari, R. 2* , Farahmandfar, R. (2019). Effect of Type and Concentration of Wall Materials on Kilka Fish Oil Nano and Microcapsules Properties Using Xanthan and *Lepidium Sativum* Seeds gum. *JFST* No. 88, Vol. 16. [In Persian]
- [69] Etzbach, L., Meinert, M., Faber, T., Klein, C., Schieber, A., & Weber, F. (2020). Effects of carrier agents on powder properties, stability of carotenoids, and encapsulation efficiency of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) powder produced by co-current spray drying. *Current Research in Food Science*, 3, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.03.002>
- [70] Dehghan, B., Esmailzadeh Kenari, R., & Raftani Amiri, Z. (2020). Nano-encapsulation of orange peel essential oil in native gums (*Lepidium sativum* and *Lepidium perfoliatum*): Improving oxidative stability of soybean oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11), e14889. DOI:10.1111/jfpp.14889
- [71] Aghbashlo, M., Mobli, H., Madadlou, A., & Rafiee, S. (2013). Influence of wall material and inlet drying air temperature on the microencapsulation of fish oil by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1561-1569. DOI:10.1007/s11947-012-0796-7
- [72] Teng, Z., Luo, Y., & Wang, Q. (2012). Nanoparticles synthesized from soy protein: preparation, characterization, and application for nutraceutical encapsulation. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(10), 2712-2720. DOI: 10.1021/jf205238x
- [73] Roshanpour, S., Tavakoli, J., Beigmohammadi, F., & Alaei, S. (2021). Improving antioxidant effect of phenolic extract of *Mentha piperita* using nanoencapsulation process. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 23-32. DOI:10.1007/s11694-020-00606-x
- [74] Najafi, M. N., Kadkhodae, R., & Mortazavi, S. A. J. F. b. (2011). Effect of drying process and wall material on the properties of encapsulated cardamom oil. 6(1), 68-76. DOI:10.1007/s11483-010-9176-x
- [75] Paini, M., Aliakbarian, B., Casazza, A. A., Lagazzo, A., Botter, R., & Perego, P. (2015). Microencapsulation of phenolic compounds from olive pomace using spray drying: A study of operative parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 177-186. DOI:10.1016/j.lwt.2015.01.022
- [76] Estévez, M., Güell, C., De Lamo-Castellví, S., & Ferrando, M. (2019). Encapsulation of grape seed phenolic-rich extract within W/O/W emulsions stabilized with complexed biopolymers: Evaluation of their stability and release. *Food chemistry*, 272, 478-487. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.217>
- [77] Yazdan-Bakhsh, M., Nasr-Esfahani, M., Esmailzadeh-Kenari, R., & Fazel-Najafabadi, M. (2021). Evaluation of antioxidant properties of *Heracleum Lasiopetalum* extract in multilayer nanoemulsion with biopolymer coating to control oxidative stability of sunflower oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(2), 1014-1023. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00691-y>
- [78] Adejoro, F. A., Hassen, A., & Thantsha, M. S. (2018). Characterization of starch and gum arabic-maltodextrin microparticles encapsulating acacia tannin extract and evaluation of their potential use in ruminant nutrition. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(7), 977. DOI: 10.5713/ajas.18.0632
- [79] Nijdam, J., & Langrish, T. (2006). The effect of surface composition on the functional properties of milk powders. *Journal of food engineering*, 77(4), 919-925. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.020>
- [80] Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of food engineering*, 88(3), 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029>.
- [81] Jafari, S. Z., Jafarian, S., Hojjati, M., & Najafian, L. (2022). Evaluation of antioxidant activity of nano- and microencapsulated rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves extract in cress (*Lepidium sativum*) and basil (*Ocimum basilicum*) seed gums for enhancing oxidative stability of sunflower oil. *Food Science & Nutrition*, 10(6), 2111-2119. DOI: 10.1002/fsn3.2827.
- [82] Ganji, S., & Sayyed-Alangi, S. Z. (2017). Encapsulation of ginger ethanolic extract in nanoliposome and evaluation of its antioxidant activity on sunflower oil. *Chemical papers*, 71(9), 1781-1789. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0164-1>
- [83] Ozcan, M. M. (2009). Some nutritional characteristics of fruit and oil of walnut (*Juglans regia* L.) growing in Turkey. 10.30492/ijcce.2009.6915
- [84] Faria, W. C. S., de Oliveira, M. G., da Conceição, E. C., Silva, V. B., Veggi, N., Converti, A., . . . Bragagnolo, N. (2020). Antioxidant efficacy and in silico toxicity prediction of free and spray-dried extracts of green Arabica and Robusta coffee fruits and their application in edible oil. *Food Hydrocolloids*, 108, 106004. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106004>

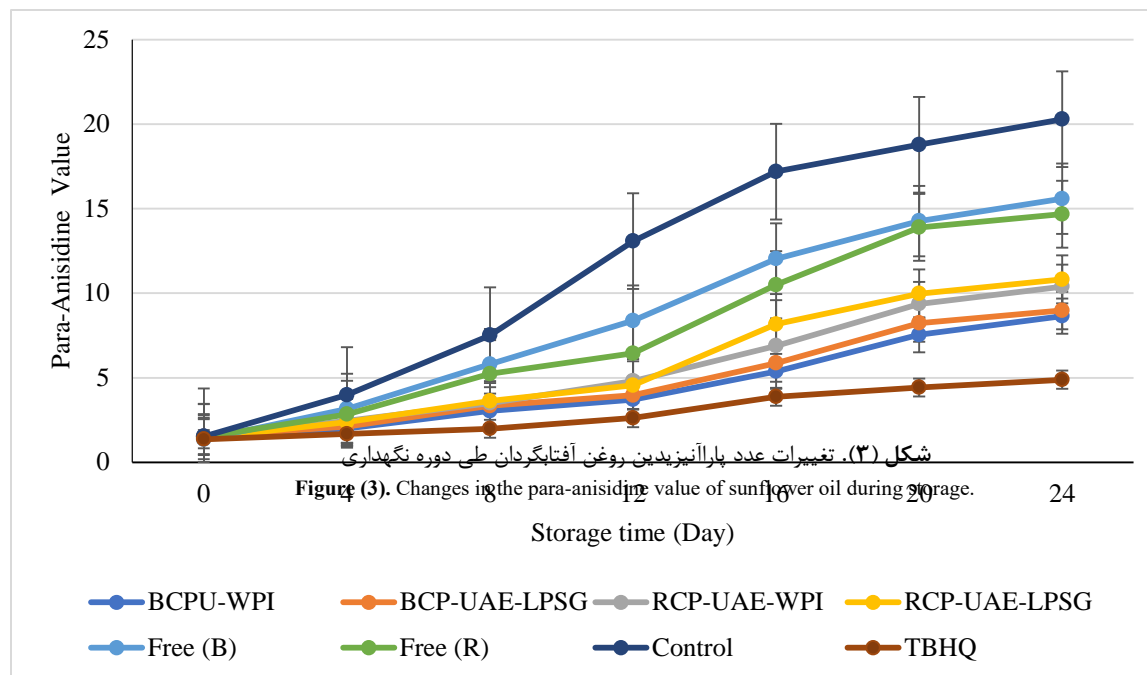
- [85] Nishad, J., Dutta, A., Saha, S., Rudra, S. G., Varghese, E., Sharma, R., . . . Kaur, C. (2021). Ultrasound-assisted development of stable grapefruit peel polyphenolic nano-emulsion: Optimization and application in improving oxidative stability of mustard oil. *Food chemistry*, 334, 127561. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127561
- [86] Taghvaei, M., Jafari, S. M., Mahoonak, A. S., Nikoo, A. M., Rahmanian, N., Hajitabar, J., & Meshginfar, N. (2014). The effect of natural antioxidants extracted from plant and animal resources on the oxidative stability of soybean oil. *LWT-Food Science and Technology*, 56(1), 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.11.009>
- [87] Hosseinalhashemi, M., Tavakoli, J., Rafati, A., & Ahmadi, F. (2021). The application of Pistacia khinjuk extract nanoemulsion in a biopolymeric coating to improve the shelf life extension of sunflower oil. *Food Science & Nutrition*, 9(2), 920-928. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2057>
- [88] Khoddami, A., & Roberts, T. H. (2015). Pomegranate oil as a valuable pharmaceutical and nutraceutical. *Lipid Technology*, 27(2), 40-42. <https://doi.org/10.1002/lite.201500002>
- [89] Estakhr, P., Tavakoli, J., Beigmohammadi, F., Alaei, S., & Mousavi Khaneghah, A. (2020). Incorporation of the nanoencapsulated polyphenolic extract of Ferula persica into soybean oil: Assessment of oil oxidative stability. *Food Science & Nutrition*, 8(6), 2817-2826. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1575>
- [90] Moczowska, M., Karp, S., Horbanczuk, O. K., Hanula, M., Wyrwicz, J., & Kurek, M. A. (2020). Effect of rosemary extract addition on oxidative stability and quality of hemp seed oil. *Food and bioproducts processing*, 124, 33-47. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2020.08.002>
- [91] Tavakoli, J., Abbasi, H., Gashtasebi, S., Salmanpour, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2023). Enhancing canola oil's shelf life with nano-encapsulated Mentha aquatica extract for optimal antioxidant performance. *Food Science & Nutrition*, 11(12), 7985-7995. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3717>



شکل (۱). تصاویر گرفته شده از نانوکپسول‌های حاوی عصاره جوانه جو در پوشش WPI (A) و LPSG (B)، عصاره جوانه برنج در پوشش WPI (C) و LPSG (D) توسط SEM.

Figure (1). Images taken of nanocapsules containing barley sprout extract coated with WPI (A) and LPSG (B), rice sprout extract coated with WPI (C) and LPSG (D) by SEM.





جدول (۱). اسامی نانوکپسول‌های تهیه شده در این پژوهش.

Table (1). Names of nanocapsules prepared in this research.

Nanocapsule name	Description
BCP-LPSG	Nanocapsules with LPSG walls containing cold plasma-extracted barley sprout extract
BCP-WPI	Nanocapsules with WPI walls containing cold plasma-extracted barley sprout extract.
BUAE- LPSG	Nanocapsules with LPSG walls containing ultrasound-extracted barley sprout extract.
BUAE- WPI	Nanocapsules with WPI walls containing ultrasound-extracted barley sprout extract.
BCP-UAE-LPSG	Nanocapsules with LPSG walls containing barley sprout extract pretreated with cold plasma and then extracted with ultrasound.
BCP-UAE-WPI	Nanocapsules with WPI walls containing barley sprout extract pretreated with cold plasma and then extracted with ultrasound.
RCP-LPSG	Nanocapsules with LPSG walls containing cold plasma-extracted rice sprout extract.
RCP-WPI	Nanocapsules with WPI walls containing cold plasma-extracted rice sprout extract.
RUAE- LPSG	Nanocapsules with LPSG walls containing ultrasound-extracted rice sprout extract.
RUAE- WPI	Nanocapsules with WPI walls containing ultrasound-extracted rice sprout extract.
RCP-UAE-LPSG	Nanocapsules with LPSG walls containing rice sprout extract pretreated with cold plasma and then extracted with ultrasound.
RCP-UAE-WPI	Nanocapsules with WPI walls containing rice sprout extract pretreated with cold plasma and then extracted with ultrasound.

¹ Abbreviations: B: Barley sprout; R: Rice sprout; CP: Cold plasma extraction; UAE: Ultrasound-assisted extraction; LPSG: *Lepidium perfoliatum* seed gum; WPI: Whey protein isolate.

جدول (۲). میزان ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی کل عصاره جوانه برنج و جو حاصل از روش‌های مختلف استخراج.

Table (2). Total phenol and flavonoid content of rice and barley sprout extracts obtained from different extraction methods.

Samples	Total phenol content (mg GAE/g)	Total flavonoid content (mg QE/g)	Extraction efficiency (%)
BCP	2.81±0.13 ^c	2.14±0.07 ^d	10.26±0.90 ^{dc}
BUAE	3.27±0.07 ^b	2.90±0.10 ^b	12.08±0.66 ^{bc}
BCP-UAE	4.11±0.09 ^a	3.65±0.07 ^a	14.01±0.71 ^a
RCP	2.23±0.18 ^c	1.21±0.04 ^f	9.63±0.84 ^c
RUAE	2.52±0.11 ^d	1.77±0.08 ^c	11.37±0.45 ^{cd}
RCP-UAE	3.36±0.11 ^b	2.55±0.07 ^c	13.29±0.87 ^{ab}

¹ Abbreviations: GAE: Gallic acid equivalent; QE: Quercetin equivalent. BCP (barley sprout extract extracted with cold plasma), BUAE (barley sprout extract extracted with ultrasound), BCP-UAE (barley sprout extract obtained from cold plasma pretreatment and extracted with ultrasound), RCP (rice sprout extract extracted with cold plasma), RUAE (rice sprout extract extracted with ultrasound), RCP-UAE (rice sprout extract obtained from cold plasma pretreatment and extracted with ultrasound).

² Values are expressed as mean ± standard deviation (n=3). Different lowercase superscript letters within a column indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

جدول (۳). فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH عصاره های حاصل از روش های مختلف استخراج.

Table (3). DPPH radical scavenging activity of extracts obtained from different extraction methods.

Samples	Concentration (ppm)				
	200	400	600	800	1000
BCP	35.63±1.52 ^d	50.15±1.73 ^d	64.29±1.14 ^c	66.8±0.66 ^d	70.27±0.51 ^e
BUAE	41.27±1.38 ^c	56.82±1.17 ^c	65.00±0.82 ^c	71.44±1.53 ^c	74.00±1.22 ^{cd}
BCP-UAE	49.82±0.36 ^b	65.37±0.40 ^b	75.01±0.94 ^b	79.69±0.93 ^b	83.51±0.42 ^b
RCP	28.40±0.41 ^e	41.00±0.82 ^e	50.57±0.89 ^e	56.57±1.17 ^f	66.39±0.50 ^f
RUAE	33.98±1.15 ^d	48.22±0.43 ^d	58.34±0.90 ^d	63.84±0.85 ^e	72.23±1.35 ^{de}
RCP-UAE	42.53±0.49 ^c	56.08±1.61 ^c	65.29±1.18 ^c	66.42±1.11 ^d	75.68±2.18 ^c
TBHQ (100 ppm)	92.25±0.97 ^a	92.25±0.97 ^a	92.25±0.97 ^a	92.25±0.97 ^a	92.25±0.97 ^a

¹ Abbreviations: BCP (barley sprout extract extracted with cold plasma), BUAE (barley sprout extract extracted with ultrasound), BCP-UAE (barley sprout extract obtained from cold plasma pretreatment and extracted with ultrasound), RCP (rice sprout extract extracted with cold plasma), RUAE (rice sprout extract extracted with ultrasound), RCP-UAE (rice sprout extract obtained from cold plasma pretreatment and extracted with ultrasound).

² Values are expressed as mean ± standard deviation (n=3). Different lowercase superscript letters within a column indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

جدول (۴). قدرت احیاکنندگی عصاره‌های حاصل از روش‌های مختلف استخراج.

Table (4). Reducing power of extracts obtained from different extraction methods.

Samples	Concentration (ppm)				
	200	400	600	800	1000
BCP	22.51±0.52 ^e	35.00±0.03 ^e	44.24±0.03 ^d	51.33±0.72 ^e	55.50±0.51 ^e
BUAE	28.16±0.66 ^c	41.20±1.33 ^d	51.00±0.75 ^c	57.84±0.93 ^c	61.10±1.04 ^d
BCP-UAE	34.94±0.80 ^b	48.61±1.00 ^b	36.58±0.11 ^f	65.46±0.77 ^f	70.64±1.63 ^b
RCP	18.92±0.80 ^f	30.53±0.41 ^f	38.99±0.62 ^e	44.57±0.79 ^f	53.20±0.64 ^f
RUAE	23.46±0.64 ^d	36.16±0.80 ^e	44.67±0.33 ^d	49.78±1.18 ^e	59.61±1.21 ^d
RCP-UAE	30.55±0.75 ^b	44.08±1.47 ^c	53.24±0.82 ^b	53.61±0.81 ^d	64.33±0.57 ^c
TBHQ (100 ppm)	91.38±0.57 ^a	91.38±0.57 ^a	91.38±0.57 ^a	91.38±0.57 ^a	91.38±0.57 ^a

¹ Abbreviations: BCP (barley sprout extract extracted with cold plasma), BUAE (barley sprout extract extracted with ultrasound), BCP-UAE (barley sprout extract obtained from cold plasma pretreatment and extracted with ultrasound), RCP (rice sprout extract extracted with cold plasma), RUAE (rice sprout extract extracted with ultrasound), RCP-UAE (rice sprout extract obtained from cold plasma pretreatment and extracted with ultrasound).

² Values are expressed as mean ± standard deviation (n=3). Different lowercase superscript letters within a column indicate statistically significant differences (p < 0.05).

جدول (٥). مشخصات نانوکپسول‌ها

Table (5). Nanocapsule specifications

Nanocapsules name	Particle size (nm)	PDI	Zeta potential (mV)	Encapsulation efficiency (%)
BCP-LPSG	185.77±12.20 ^{abcd}	0.20 ± 0.005 ^{ef}	-33.01±2.11 ^{abcd}	79.01±3.41 ^{abcde}
BCP-WPI	180.26±10.61 ^{abcd}	0.19±0.002 ^{fg}	-35.43±2.02 ^{ab}	81.26±2.31 ^{abcd}
BUAE- LPSG	192.73±14.85 ^{abcd}	0.23±0.003 ^c	-30.33±2.87 ^{bcde}	75.25±3.58 ^{cde}
BUAE – WPI	180.39±11.45 ^{abcd}	0.21 ± 0.001 ^{de}	-32.38±1.83 ^{abcd}	78.33±3.68 ^{abcde}
BCP-UAE-LPSG	166.01±13.38 ^{cd}	0.19±0.004 ^{fg}	-36.52±2.00 ^a	83.00±2.45 ^{ab}
BCP-UAE-WPI	161.40±10.95 ^d	0.18±0.004 ^g	-37.11±1.07 ^a	85.20±1.76 ^a
RCP-LPSG	195.22±12.25 ^{abc}	0.23±0.006 ^c	-29.23±2.32 ^{cde}	77.36±2.95 ^{bcde}
RCP-WPI	191.04±11.84 ^{abcd}	0.22±0.007 ^{cd}	-30.96±1.43 ^{bcde}	79.00±3.27 ^{abcde}
RUAE- LPSG	210.49±16.33 ^a	0.27±0.005 ^a	-26.33±2.87 ^e	72.48±3.88 ^e
RUAE – WPI	200.06±14.70 ^{ab}	0.25±0.002 ^b	-28.18±3.49 ^{de}	74.29±2.72 ^{de}
RCP-UAE-LPSG	174.12±12.97 ^{bcd}	0.21 ± 0.008 ^{de}	-33.13±2.41 ^{abcd}	80.05±2.83 ^{abcd}
RCP-UAE-WPI	170.35±10.61 ^{bcd}	0.20 ± 0.024 ^{ef}	-34.00±2.16 ^{abc}	82.18±2.14 ^{abc}

¹ Abbreviations: PDI: Polydispersity index; See Table 1 for nanocapsule name codes.

² Values are expressed as mean ± standard deviation (n=3). Different lowercase superscript letters within a column indicate statistically significant differences (p < 0.05).

جدول (۶). نرخ رهائش (%) ترکیبات فنولی از نانوکپسول‌های تهیه شده.

Table (6). Release rate (%) of phenolic compounds from prepared nanocapsules.

Nanocapsules name	Storage time (Day)						
	0	4	8	12	16	20	24
BUAE – WPI	16.54±0.19 ^{Ga}	22.00±0.51 ^{Ff}	30.21±0.64 ^{Efgh}	39.36±0.96 ^{Dhi}	49.76±0.94 ^{Cf}	58.65±0.53 ^{Bh}	65.29±0.44 ^{Ag}
BUAE- LPSG	14.75±0.97 ^{Gbc}	20.29±0.52 ^{Fg}	28.29±0.63 ^{Eh}	36.82±0.48 ^{Dk}	45.49±0.66 ^{Ch}	53.94±0.60 ^{Bk}	61.01±0.19 ^{Aj}
BCP-WPI	13.72±0.73 ^{Gc}	24.08±0.19 ^{Fde}	32.57±0.43 ^{Ede}	42.27±0.43 ^{Def}	51.96±0.40 ^{Ce}	61.07±0.09 ^{Bfg}	68.40±1.04 ^{Ae}
BCP-LPSG	15.85±0.62 ^{Gab}	21.52±0.47 ^{Ffg}	29.77±1.14 ^{Egh}	38.94±1.20 ^{Dij}	48.26±0.14 ^{Cg}	57.16±0.73 ^{Bi}	63.50±0.26 ^{Ah}
BCP-UAE- LPSG	15.76±0.25 ^{Gab}	26.97±0.40 ^{Fa}	36.76±0.23 ^{Eab}	47.55±0.24 ^{Db}	58.84±0.46 ^{Cb}	58.84±0.42 ^{Bb}	74.10±0.19 ^{Ab}
BCP-UAE- WPI	12.27±0.62 ^{Gc}	27.26±0.64 ^{Fa}	38.42±1.85 ^{Ea}	49.73±0.37 ^{Da}	61.88±0.11 ^{Ca}	70.09±0.17 ^{Ba}	76.47±0.46 ^{Aa}
RUAE – WPI	15.29±0.81 ^{Gab}	20.87±0.54 ^{Ffg}	29.09±0.91 ^{Egh}	37.89±0.79 ^{Djk}	47.07±0.78 ^{Cg}	55.52±0.58 ^{Bj}	62.35±0.41 ^{Ai}
RUAE- LPSG	11.83±0.86 ^{Gc}	25.10±0.41 ^{Fcd}	34.06±1.35 ^{Ecd}	43.37±0.65 ^{Dde}	53.65±0.60 ^{Cd}	63.07±0.85 ^{Be}	70.04±0.29 ^{Ad}
RCP-WPI	15.88±0.43 ^{Gab}	21.38±0.53 ^{Ffg}	30.69±1.00 ^{Eefg}	40.54±0.50 ^{Dgh}	51.18±0.75 ^{Ce}	60.36±0.26 ^{Bg}	66.82±0.93 ^{Af}
RCP-LPSG	13.15±0.51 ^{Gc}	23.50±0.98 ^{Fe}	32.16±0.41 ^{Edef}	41.63±0.46 ^{Dfg}	52.04±0.27 ^{Ce}	61.83±0.49 ^{Bf}	68.20±0.16 ^{Ae}
RCP-UAE-WPI	12.72±0.76 ^{Gc}	26.71±0.63 ^{Fab}	35.50±1.46 ^{Ebc}	45.13±0.66 ^{Dc}	56.41±0.28 ^{Cc}	65.90±0.72 ^{Bc}	72.12±0.77 ^{Ac}
RCP-UAE-LPSG	12.57±0.46 ^{Gc}	25.63±0.88 ^{Fbc}	34.34±0.65 ^{Ecd}	44.59±0.71 ^{Dcd}	54.78±0.96 ^{Cd}	64.27±0.13 ^{Bd}	70.97±0.38 ^{Ad}

¹ Abbreviations: See Table 5.

² Values are expressed as mean ± standard deviation (n=3). Different uppercase superscript letters within a row indicate statistically significant differences over time ($p < 0.05$). Different lowercase superscript letters within a column indicate statistically significant differences between samples at a specific time ($p < 0.05$).

Nanoencapsulation of Barley and Rice Sprout Extracts: The Key Role of Combined Plasma-Ultrasound Extraction in a Comparative Study

Behnaz Kaviyani¹, Reza Esmailzadeh Kenari^{*2}, Reza Farahmandfar³

1. PhD Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
3. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

*Corresponding Author: r.esmailzade@sanru.ac.ir

Introduction: Oxidative rancidity is a major challenge for the shelf-life of polyunsaturated vegetable oils like sunflower oil. While synthetic antioxidants are effective, safety concerns have increased demand for natural alternatives. Barley and rice sprouts are rich sources of bioactive phenolic and flavonoid compounds with high antioxidant potential. Efficient extraction of these compounds requires novel, non-thermal technologies. Cold plasma (CP) and ultrasound-assisted extraction (UAE) are two promising green methods. CP modifies surface

structure via active species, while UAE enhances mass transfer through cavitation. Their combination may have synergistic effects. Furthermore, the low stability and bioavailability of plant extracts in food matrices necessitate encapsulation. Nanocapsulation using natural biopolymers like whey protein isolate (WPI) and *Lepidium sativum* seed gum (LPSG) can protect bioactive compounds and enable controlled release. This study aims to: 1) Evaluate and compare the efficiency of UAE, CP, and combined CP-UAE methods for extracting bioactive compounds from barley and rice sprouts, 2) Investigate the impact of encapsulating the best-performing extracts in WPI and LPSG on the physicochemical properties of nanocapsules, and 3) Determine the efficacy of optimized nanocapsules in enhancing the oxidative stability of sunflower oil, presenting an integrated natural alternative to synthetic antioxidants.

Materials and Methods: Barley and rice sprouts were germinated, dried, and powdered. Extracts were obtained using three methods: UAE (35 kHz, 35°C, 30 min), CP (Dielectric Barrier Discharge, nitrogen, 30 kV, 5 min), and a combined method (CP pre-treatment followed by UAE). Extraction yield, total phenolic content (TPC, Folin-Ciocalteu), and total flavonoid content (TFC, aluminum chloride method) were measured. Antioxidant activity was evaluated via DPPH radical scavenging and FRAP assays at concentrations of 200-1000 ppm. Selected extracts were nanocapsulated using an emulsification-sonication method with WPI and LPSG as wall materials, followed by freeze-drying. Nanocapsule properties (particle size, PDI, zeta potential, encapsulation efficiency (EE), phenolic release rate) were characterized. The oxidative stability of sunflower oil fortified with free extracts, nanocapsules, synthetic TBHQ (100 ppm), and a control (no antioxidant) was assessed during 24 days of accelerated storage at 60°C by measuring peroxide value (PV) and para-anisidine value (p-AV) at 4-day intervals. Statistical analysis was performed using one-way ANOVA and Duncan's test ($p < 0.05$).

Results and Discussion: The combined CP-UAE method yielded the highest extraction efficiency, TPC, and TFC for both sprouts, with barley sprout extract (BCP-UAE) showing the best results (14.01% yield, 4.11 mg GAE/g, 3.65 mg QE/g). This is attributed to the synergistic effect of CP-induced cell wall permeability and UAE-enhanced mass transfer. Antioxidant activities (DPPH & FRAP) of all extracts were concentration-dependent. BCP-UAE exhibited the strongest activity among natural extracts (83.51% DPPH inhibition at 1000 ppm), correlating with its higher phenolic content. TBHQ showed superior activity at a much lower concentration (100 ppm). Nanocapsules exhibited nanometric particle sizes (161.40-210.49 nm), low PDI (< 0.3), high negative zeta potential (up to -37 mV), and good EE (72.48-85.20%). The smallest particle size and highest EE were observed for BCP-UAE-WPI nanocapsules (161.40 nm, 85.20%). SEM images confirmed spherical, smooth, and crack-free morphology for optimal nanocapsules (BCP-UAE-WPI, BCP-UAE-LPSG, etc.). The phenolic release from nanocapsules increased over 24 days, with BCP-UAE-WPI showing the highest release rate. In the oxidative stability test, all antioxidant treatments significantly delayed oil oxidation compared to the control. Nanocapsules outperformed their corresponding free extracts. The BCP-UAE-WPI nanocapsules demonstrated the most effective protection among natural treatments, showing the lowest PV and p-AV values after 24 days. Its performance was statistically comparable to that of TBHQ, indicating its high potential as a natural alternative. The superior performance of BCP-UAE-WPI is attributed to the high antioxidant potency of the combined-method extract and the effective protection and controlled release provided by the WPI nanocapsule matrix.

Conclusions: The integrated strategy of combined CP-UAE extraction followed by nanocapsulation within a WPI matrix proved highly effective. This approach maximized the recovery of bioactive antioxidants from barley sprouts and successfully delivered them in a protected, controlled-release format into sunflower oil. The resulting BCP-UAE-WPI nanocapsules significantly enhanced the oil's oxidative stability, performing comparably to the synthetic antioxidant TBHQ. This study provides a promising, green, and effective protocol for developing natural antioxidant systems from cereal sprouts to replace synthetic additives in lipid-based food products.

Keywords: Oxidation, Cold Plasma, Ultrasound, Nanoencapsulation.