



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

استخراج سبز پکتین از ضایعات پوست پرتقال: مقایسه کارایی روش گرمایش اهمی و متداول

سیدرسول شاه‌حسینی^۱، سارا جعفریان^{۲*}، سید روح الله جوادیان^۲، سمیه بهرام^۲

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۲- گروه شیلات، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

روش‌های متداول استخراج پکتین از ضایعات مرکبات با چالش‌هایی نظیر زمان طولانی، مصرف انرژی بالا و تخریب ساختار پکتین همراه هستند. در پژوهش حاضر، استخراج پکتین از ضایعات پوست پرتقال (رقم تامسون ناول) با روش گرمایش اهمی به عنوان یک فناوری سبز و کارآمد بررسی و با روش گرمایش متداول مقایسه شد. استخراج پکتین با روش گرمایش اهمی در شرایط بهینه (گرادیان ولتاژ ۱۵ ولت بر سانتی‌متر، دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۳۰ دقیقه) و با روش گرمایش متداول (دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۹۰ دقیقه) انجام گرفت. پکتین استخراج‌شده از نظر راندمان استخراج، درجه استریفیکاسیون، ظرفیت نگهداری آب و روغن، شاخص‌های رنگی، ساختار شیمیایی (FTIR) و مورفولوژی سطح (SEM) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که روش گرمایش اهمی راندمان استخراج را به طور معنی‌داری افزایش داد (۱۵/۲۷ درصد در مقابل ۱۲/۵۴ درصد). درجه استریفیکاسیون پکتین استخراج‌شده با روش اهمی (۶۲/۴۰ درصد) به طور معنی‌داری بیشتر از روش متداول (۵۱/۴۵ درصد) بود که نشان‌دهنده تعلق آن به گروه پکتین‌های با متوکسیل بالا است. ظرفیت نگهداری آب (۷/۱۱ گرم بر گرم) و روغن (۶/۲۳ گرم بر گرم) در روش اهمی به ترتیب حدود ۱۸ و ۲۶ درصد بیشتر از روش متداول بود. پکتین استخراج‌شده با روش اهمی روشنایی بیشتر، قرمزی و زردی کمتری نشان داد. آنالیز FTIR حفظ بهتر ساختار شیمیایی پکتین را در روش اهمی تأیید کرد و تصاویر SEM ساختاری یکنواخت‌تر و ذرات ریزتر را نشان دادند. در مجموع، گرمایش اهمی به عنوان یک فناوری سبز، کارآمد و کم‌مصرف، پتانسیل بالایی برای جایگزینی روش‌های متداول در استخراج پکتین از ضایعات مرکبات دارد و می‌تواند رویکردی پایدار و ارزش‌آفرین برای مدیریت پسماندهای صنایع فرآوری مرکبات فراهم سازد.

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

کلمات کلیدی:

پکتین،

گرمایش اهمی،

درجه استریفیکاسیون،

طیف‌سنجی FTIR،

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

DOI:10.48311/fsct.2026.121074.83189

* مسئول مکاتبات:

drsajafarian2024@iau.ac.ir

۱-مقدمه

ضایعات صنعت مرکبات یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و اقتصادی در سراسر جهان محسوب می‌شود. محصول فراوری مرکبات عمدتاً آب میوه و کنسانتره است و حدود نیمی از مرکبات ورودی به کارخانجات به صورت ضایعات (شامل پوست، پالپ، دانه و بافت‌های باقی‌مانده) از خط تولید خارج می‌گردد [۱]. با استفاده بهینه از ضایعات مرکبات در صنایع تبدیلی می‌توان سالیانه مقادیر قابل توجهی پکتین، الیاف خوراکی، اسانس و روغن هسته مرکبات تولید کرد و علاوه بر ایجاد ارزش افزوده اقتصادی بالا، از آلودگی محیط زیست نیز جلوگیری به عمل آورد [۲]. از میان ترکیبات ارزشمند قابل استخراج از ضایعات مرکبات، پکتین به دلیل خواص عملکردی منحصر به فرد خود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پکتین یک هیدروکلوئید اسیدی از خانواده پلی‌ساکاریدهای موجود در دیواره سلولی گیاهان است. از نظر ساختاری، پکتین یک پلی‌ساکارید ناهمگن پیچیده است که عمدتاً از بخش‌های هوموگالاکتورونان (HG)، رامنوگالاکتورونان I (RG-I) و رامنوگالاکتورونان II (RG-II) تشکیل شده است [۳]. تنوع ساختاری پکتین باعث ایجاد طیف گسترده‌ای از خواص عملکردی از جمله ژل‌شدگی، افزایش ویسکوزیته و پایدارسازی کلوئیدی می‌شود [۴]. به همین دلیل، پکتین به طور گسترده به عنوان عامل ژل‌کننده، پایدارکننده و غلیظ‌کننده در صنایع غذایی، آرایشی و دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵، ۶]. پکتین به عنوان یک پلیمر زیستی مؤثر در تولید فیلم و پوشش‌های خوراکی نیز استفاده می‌شود که دلیل آن سازگاری با محیط زیست، غیرسمی بودن، تراکم‌پذیری، تجزیه‌پذیری زیستی، ویسکوزیته بالا، حالت ژل‌شدگی، عدم نفوذ اکسیژن و ظرفیت نگهداری بالای ترکیبات فرار این ترکیب می‌باشد [۳]. در صنعت، پکتین به طور سنتی با استفاده از اسیدهای معدنی رقیق (محدوده pH ۳-۵/۱) در دماهای بالا (۷۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) استخراج می‌شود [۳]. با این حال، روش‌های متداول استخراج با مشکلات متعددی از جمله مسائل زیست‌محیطی ناشی از استفاده اسیدهای معدنی،

تخریب ساختار پکتین در اثر حرارت بالا و زمان طولانی، و مصرف بالای انرژی همراه هستند [۷]. برای غلبه بر محدودیت‌های روش استخراج متداول، محققان به دنبال استفاده از اسیدهای آلی (مانند اسید سیتریک) و به کارگیری روش‌های نوین استخراج از جمله استخراج با فراصوت، استخراج آنزیمی و استخراج با گرمایش اهمی هستند. در سال‌های اخیر، روش‌های نوین استخراج پکتین مبتنی بر میدان‌های فیزیکی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استخراج به کمک فراصوت (UAE) اشاره کرد که به عنوان یک فناوری کارآمد و اقتصادی برای استخراج پکتین اثبات شده است [۳]. همچنین استخراج به کمک مایکروویو [۸]، استخراج با فشار بالا [۸] و استخراج با میدان الکتریکی متوسط [۹] نیز برای استخراج پکتین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های نویدبخش در این زمینه، استخراج با گرمایش اهمی است. گرمایش اهمی یک روش گرمایش حجمی است که در آن به دلیل اثر اهمی هنگام عبور جریان الکتریکی از ماده، حرارت به طور یکنواخت در داخل ماده تولید می‌شود [۱]. این روش دارای مزایای قابل توجهی از جمله گرمایش سریع و یکنواخت، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش زمان فرآیند است [۶]. علاوه بر این، اثر غیرحرارتی میدان الکتریکی باعث تخریب بافت‌های گیاهی شده و منجر به افزایش بازده استخراج می‌گردد [۱۰]. مطالعات متعدد گزارش کرده‌اند که از گرمایش اهمی برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال از جمله اسانس‌ها [۱۰] و ترکیبات فنلی [۱۱] از مواد گیاهی مختلف استفاده شده است. با این حال، بر اساس دانش نویسندگان، تا کنون مطالعات محدودی بر روی بهینه‌سازی استخراج پکتین با استفاده از گرمایش اهمی و مقایسه آن با روش متداول انجام شده است [۱، ۷].

با توجه به مطالب بیان شده و برتری روش‌های نوین استخراج نسبت به روش‌های سنتی در زمینه افزایش بازده، کاهش زمان فرآیند، حفظ کیفیت محصول نهایی و ملاحظات زیست‌محیطی، هدف از مطالعه حاضر مقایسه کارایی دو روش گرمایش اهمی و گرمایش معمولی در استخراج پکتین

از ضایعات پوست پرتقال (رقم تامسون ناول) می‌باشد. در این پژوهش، پکتین استخراج‌شده با هر دو روش از نظر راندمان استخراج، درجه استریفیکاسیون و خواص عملکردی شامل ظرفیت نگهداری آب و روغن مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند مزایای روش گرمایش اهمی را به عنوان یک فناوری سبز، کم‌مصرف و کارآمد در مقایسه با روش سنتی به وضوح نشان داده و رویکردی پایدار و ارزش‌آفرین برای مدیریت پسماندهای صنایع تبدیلی مرکبات ارائه نماید.

۲- مواد و روش

۲-۱ مواد اولیه

ضایعات مرکبات (پرتقال، رقم تامسون ناول) از ضایعات حاصل از شرکت تعاونی کشاورزی باغداران مرکبات رامسر-کارخانجات کشت و صنعت کوثر تهیه گردید. نمونه‌ها در آون تحت خلأ با دمای ۴۵ درجه‌سانتی‌گراد به مدت ۵۰ دقیقه خشک و سپس پودر شده و تا زمان انجام آزمایش تحت شرایط بدون نور در دمای ۴ درجه‌سانتی‌گراد نگهداری شدند [۱]. تمامی مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مرک آلمان تهیه و از درجه خلوص آزمایشگاهی برخوردار بودند. آب دیونیزه با pH تنظیم‌شده روی ۱/۵ با استفاده از اسید کلریدریک ۰/۵ مولار به عنوان حلال استخراج استفاده گردید.

۲-۲ استخراج پکتین با روش گرمایش معمولی

استخراج پکتین با روش گرمایش معمولی بر اساس روش Wang و همکاران (۲۰۱۶) با اعمال تغییراتی انجام شد. ۳ گرم از پودر ضایعات پوست پرتقال با ۱۵۰ میلی‌لیتر حلال استخراج (اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال، pH برابر ۱/۵) مخلوط گردید. مخلوط حاصل در حمام آب گرم با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه قرار داده شد [۱۲]. پس از استخراج، مخلوط تا دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خنک و سپس با سرعت $9000 \times g$ به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ گردید. محلول حاصل جمع‌آوری و تا یک چهارم حجم اولیه تغلیظ شد. سپس pH

محلول با استفاده از سود ۰/۱ نرمال به ۲ رسانده و پکتین با افزودن دو برابر اتانول ۹۶ درصد رسوب داده شد. نمونه به مدت ۱۲ ساعت استراحت داده تا دو فاز شود. قسمت رسوب داده شده توسط فیلتراسیون جدا و دو مرحله با اتانول ۶۰ درصد، دو مرحله با اتانول ۷۰ درصد و در نهایت یک مرحله با اتانول ۹۶ درصد شستشو داده شد. سپس پکتین حاصله برای حذف الکل پرس شده و در آون تحت خلأ با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید [۱، ۱۲]. پکتین حاصل در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در تاریکی نگهداری شد.

۲-۳ استخراج پکتین با روش گرمایش اهمی

استخراج پکتین با سیستم گرمایش اهمی (فرکانس ۵۰ هرتز) بر اساس نتایج مطالعات پیشین و همچنین آزمایش‌های مقدماتی انجام‌شده، صورت گرفت. نسبت جامد به مایع ثابت در ۱:۲۰ گرم بر میلی‌لیتر و pH اولیه محلول با افزودن اسید کلریدریک روی ۲ تنظیم شد. نمونه (۳۰ میلی‌لیتر) به محفظه استوانه‌ای شیشه‌ای پیرکس انتقال شد که دو الکتروود پلاتین با فاصله ۶/۶ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر به صورت موازی داخل آن قرار داشتند. محفظه روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و دمای نمونه نزدیک دیواره سلول با ترموکوپل نوع K به طور مداوم اندازه‌گیری گردید. استخراج در شرایط بهینه شامل گرادیان ولتاژ ۱۵ ولت بر سانتی‌متر، دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳۰ دقیقه انجام شد [۱]. پس از استخراج، محلول فیلتر شده و مراحل رسوب‌دهی، شستشو و خشک‌کردن مشابه روش گرمایش معمولی انجام گرفت.

۲-۴ اندازه‌گیری راندمان

مقدار بازده پکتین با تقسیم مقدار پکتین خشک استخراج شده بر مقدار ماده خشک اولیه بدست آمد [۱].

$$100 \times (\text{وزن پودر ضایعات مرکبات} / \text{وزن خشک شده}$$

پکتین) = راندمان استخراج

۲-۵ درجه استریفیکاسیون

برای شناسایی گروه‌های عاملی و تأیید ساختار شیمیایی پکتین، از طیف‌سنجی FTIR استفاده شد. طیف‌ها در محدوده ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر⁻¹ با استفاده از دستگاه FTIR (مدل Bruker Tensor 27، آلمان) ثبت گردید. برای تهیه قرص، ۲ میلی‌گرم از نمونه پکتین با ۲۰۰ میلی‌گرم پتاسیم بروماید (KBr) مخلوط و تحت فشار ۱۰ تن به صورت قرص شفاف درآمد. طیف‌ها با وضوح ۴ سانتی‌متر⁻¹ ثبت شدند [۶].

۲-۹ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی مورفولوژی سطح ذرات پکتین، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل TESCAN MIRA3، جمهوری چک) استفاده شد. نمونه پودر پکتین بر روی استاب آلومینیومی چسبانده شده و با استفاده از دستگاه پوشش‌دهنده پاششی با یک لایه نازک طلا (ضخامت ۱۰-۱۵ نانومتر) پوشش داده شد. تصاویر در ولتاژ شتاب ۱۵ کیلوولت و بزرگنمایی‌های مختلف تهیه گردید [۱].

۲-۱۰ ارزیابی آماری

تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام شد و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش گردید. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد. برای مقایسه میانگین داده‌های حاصل از دو روش استخراج، از آزمون t مستقل در سطح معنی‌داری ۵ درصد ($P < 0.05$) استفاده گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ راندمان استخراج پکتین

راندمان استخراج یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اقتصادی و فنی در فرآیند استخراج ترکیبات زیست‌فعال از ضایعات صنایع غذایی محسوب می‌شود، زیرا تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های تولید و قابلیت تجاری‌سازی محصول نهایی دارد [۱]. نتایج پژوهش حاضر نشان داد (جدول ۱) که راندمان استخراج پکتین از ضایعات پوست پرتقال با استفاده از روش

۲۰ میلی‌گرم نمونه پکتین را به وسیله اتانول مرطوب شد. سپس در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت قرار گرفت، در ادامه ۵ قطره معرف فنل فتالین به محلول اضافه و با سود ۰/۱ نرمال تیترا شد (V1)، سپس ۱۰ میلی‌لیتر سود ۰/۵ نرمال جهت هیدرولیز به محلول اضافه گردید، درب ارلن مایر گذاشته و روی هات پلیت به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق، عمل همزدن صورت گرفت. در ادامه، ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۰/۵ نرمال به محلول اضافه و تا ظهور رنگ صورتی با سود ۰/۵ نرمال (V2)، تیتراسیون ادامه یافت. درجه استریفیکاسیون از رابطه ذیل بدست آمد [۱، ۱۳].

$$DE = V2 / V2 + V1 \times 100$$

۲-۶ ظرفیت نگهداری آب (WHC) و ظرفیت

نگهداری روغن (OHC)

برای اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری آب و روغن، ۱ گرم پکتین به ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر و روغن آفتابگردان (با چگالی ۰/۹ گرم بر میلی‌لیتر) به طور جداگانه اضافه گردید. نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه با همزن مغناطیسی همزده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از سانتریفیوژ آزمایشگاهی (مدل Hettich Universal ۳۲۰، ساخت آلمان) با حداکثر نیروی گریز از مرکز $3000 \times g$ سانتریفیوژ شدند. پس از سانتریفیوژ، قسمت رویی (آب یا روغن اضافی) به طور کامل حذف و قسمت زیرین (پکتین جذب‌کننده آب یا روغن) توزین گردید. ظرفیت نگهداری آب و ظرفیت نگهداری روغن به صورت گرم آب یا روغن نگهداری‌شده توسط ۱ گرم پکتین محاسبه و گزارش شد [۱، ۱۳].

۲-۷ رنگ سنجی

پارامترهای رنگی پکتین شامل L (روشنایی)، a (قرمزی) و b (زردی) با استفاده از دستگاه رنگ سنج (مدل HunterLab ColorFlex EZ، آمریکا) اندازه‌گیری شد. دستگاه با استفاده از صفحه سفید استاندارد کالیبره گردید و هر نمونه در سه تکرار اندازه‌گیری شد [۶].

۲-۸ طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری (FTIR)

گرمایش اهمی برابر ۱۵/۲۷ درصد (بر اساس وزن خشک) بود، در حالی که این مقدار در روش گرمایش معمولی ۱۲/۵۴ درصد به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی باعث افزایش حدود ۲۱/۸ درصدی راندمان استخراج در مقایسه با روش معمولی شده است ($P < 0.05$). روش گرمایش اهمی بر خلاف روش‌های گرمایش معمولی که در آنها انتقال حرارت از سطح به مرکز نمونه به صورت تدریجی و با شیب دمایی انجام می‌شود، یک روش گرمایش حجمی است. در این روش، جریان الکتریکی مستقیماً از داخل نمونه عبور کرده و بر اساس مقاومت الکتریکی ماده، حرارت به طور همزمان و یکنواخت در تمام نقاط نمونه تولید می‌شود [۱۰]. این ویژگی باعث می‌شود که دیواره سلولی گیاه (شامل پوست، پالپ و بافت‌های لیگنوسلولزی) به طور مؤثرتری تخریب شده و ترکیبات درون سلولی از جمله پروتوپکتین به راحتی در حلال استخراج آزاد شوند [۱۴]. در مقابل، در روش گرمایش معمولی، گرمایش تدریجی از سطح خارجی نمونه آغاز می‌شود و ممکن است دما در نقاط مختلف نمونه یکسان نباشد، که این امر می‌تواند منجر به استخراج ناقص ترکیبات هدف و کاهش راندمان گردد [۶]. یکی از مهم‌ترین مزایای روش گرمایش اهمی که آن را از روش‌های گرمایش معمولی متمایز می‌کند، وجود اثر غیرحرارتی میدان الکتریکی است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که اعمال میدان الکتریکی در حین فرآیند استخراج، حتی در دماهای پایین، باعث ایجاد حفره‌های ریزی در غشای سلولی و افزایش نفوذپذیری آن می‌شود [۱۵]. این پدیده که به عنوان الکتروپوریشن^۱ شناخته می‌شود، منجر به تخریب ساختاری دیواره سلولی و خروج مؤثرتر ترکیبات درون سلولی بدون نیاز به دماهای بسیار بالا می‌گردد [۱۵]. در نتیجه، ترکیبات حساس به حرارت مانند پکتین در معرض تخریب حرارتی کمتری قرار گرفته و راندمان استخراج افزایش می‌یابد [۱۰]. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج سایر محققین در این زمینه همخوانی کامل دارد. Saberian و

همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای بر روی استخراج پکتین از ضایعات آب پرتقال گزارش کردند که راندمان استخراج با روش گرمایش اهمی (۱۴/۳۲ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) به طور معنی‌داری بالاتر از روش گرمایش معمولی (۱۳/۵۳ گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک) بود و آن‌ها این برتری را به گرمایش سریع‌تر و یکنواخت‌تر و همچنین اثر غیرحرارتی میدان الکتریکی نسبت دادند [۱]. در مطالعه دیگری که بر روی استخراج پکتین از ضایعات سیب با روش گرمایش اهمی انجام شد، Wang و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که روش گرمایش اهمی با راندمان ۲۵/۰۲ درصد، افزایش ۱۹/۸۷ درصدی را نسبت به روش معمولی (۲۰/۸ درصد) نشان داد و علاوه بر این، مصرف انرژی را تا ۳۷.۵۳ درصد کاهش داد [۶]. Razak و همکاران (۲۰۲۵) نیز در استخراج پکتین از پوست پرتقال بیتانگور، افزایش چشمگیر راندمان از ۳۹/۷۷ درصد در روش معمولی به ۵۸/۵۹۰ درصد در روش گرمایش اهمی را گزارش کردند که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه نوع ماده اولیه بر میزان بهبود راندمان است [۷]. این تنوع در نتایج نشان می‌دهد که میزان افزایش راندمان استخراج به عوامل متعددی از جمله نوع ماده اولیه (پوست پرتقال معمولی در مقابل پرتقال بیتانگور یا پسماند سیب)، شرایط استخراج (دما، زمان، pH، شدت میدان الکتریکی) و ساختار دیواره سلولی ماده گیاهی بستگی دارد [۶].

۲-۳ درجه استریفیکاسیون

درجه استریفیکاسیون یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی پکتین است که به طور مستقیم بر خواص عملکردی آن از جمله حلالیت، رفتار ژل‌شدگی، پایداری در برابر pH و توانایی امولسیفایری تأثیر می‌گذارد. درجه استریفیکاسیون بیانگر درصد گروه‌های کربوکسیل استری شده در زنجیره پلی‌گالاکتورونیک پکتین می‌باشد و بر اساس استانداردهای بین‌المللی، پکتین‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: پکتین با متوکسیل بالا با درجه استریفیکاسیون بیش از ۵۰ درصد که در حضور قند و اسید ژل تشکیل می‌دهد، و پکتین با

متوکسیل پایین با درجه استریفیکاسیون کمتر از ۵۰ درصد که برای ژل شدن به یون‌های کلسیم نیاز دارد [۱۶]. نتایج پژوهش حاضر نشان داد (جدول ۱) که درجه استریفیکاسیون پکتین استخراج شده از ضایعات پوست پرتقال با استفاده از روش گرمایش اهمی برابر ۶۲/۴۰ درصد بود، در حالی که این مقدار در روش گرمایش معمولی ۵۱/۴۵ درصد به دست آمد. هر دو مقدار بالاتر از ۵۰ درصد هستند، بنابراین پکتین استخراج شده با هر دو روش در گروه پکتین‌های با متوکسیل بالا قرار می‌گیرند [۱۶]. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی باعث حفظ بهتر گروه‌های متوکسیل در ساختار پکتین شده و در نتیجه درجه استریفیکاسیون بالاتری (افزایش حدود ۲۱ درصدی) نسبت به روش معمولی ایجاد کرده است ($P < 0.05$). این تفاوت معنی‌دار را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد. روش گرمایش معمولی به دلیل زمان استخراج طولانی‌تر (۹۰ دقیقه در مقابل ۳۰ دقیقه در روش اهمی) و گرمایش تدریجی از سطح، باعث می‌شود که گروه‌های متوکسیل موجود در زنجیره پلی‌گالاکتورونیک پکتین در معرض هیدرولیز قلیایی یا اسیدی بیشتری قرار گرفته و حذف شوند [۶]. در مقابل، روش گرمایش اهمی با گرمایش سریع و یکنواخت و زمان استخراج کوتاه‌تر، فرصت کمتری برای هیدرولیز گروه‌های متوکسیل فراهم می‌کند و در نتیجه ساختار اصلی پکتین بهتر حفظ می‌شود [۱]. علاوه بر این، اثر غیرحرارتی میدان الکتریکی در روش گرمایش اهمی ممکن است با ایجاد تغییرات موضعی در ساختار دیواره سلولی، استخراج انتخابی پکتین با درجه استریفیکاسیون بالاتر را تسهیل کند [۱۰]. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج سایر محققین در این زمینه همخوانی کامل دارد. Saberian و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود بر روی استخراج پکتین از ضایعات آب پرتقال گزارش کردند که تمام پکتین‌های استخراج شده با روش گرمایش اهمی دارای درجه استریفیکاسیون بالا و در محدوده ۵۳ تا ۷۸ درصد بودند و این ویژگی نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی به ساختار پکتین آسیبی نمی‌رساند [۱]. در مطالعه دیگری که بر روی پکتین استخراج شده از پوست پرتقال ناول با استفاده

از روش‌های مختلف استخراج انجام شد، Wang و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که درجه استریفیکاسیون پکتین استخراج شده در محدوده ۵۹/۷ تا ۶۳/۵ درصد قرار داشت که با نتایج پژوهش حاضر (۶۲/۴۰ درصد) کاملاً قابل مقایسه است [۱۷]. همچنین، در مطالعه استخراج پکتین از ضایعات سیب با روش گرمایش اهمی، Wang و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که پکتین استخراج شده با روش اهمی دارای درجه استریفیکاسیون بالاتری نسبت به روش معمولی است که این موضوع را به حفظ بهتر ساختار در اثر زمان کوتاه‌تر استخراج نسبت داد [۶]. Razak و همکاران (۲۰۲۵) نیز در استخراج پکتین از پوست پرتقال بیتانگور، درجه استریفیکاسیون پکتین استخراج شده با روش اهمی را بالاتر از روش معمولی گزارش کردند و این تفاوت را به تخریب کمتر زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی در اثر زمان استخراج کوتاه‌تر نسبت دادند [۷]. Tsirigotis-Maniecka و همکاران (۲۰۲۴) نیز تأکید کرده است که پکتین‌های با درجه استریفیکاسیون بالا به دلیل گروه‌های متیل استری، تمایل بیشتری به برهمکنش با زنجیره‌های آب‌گریز دارند و به عنوان امولسیفایرهای طبیعی در صنایع غذایی عمل می‌کنند [۱۶]. در مجموع، درجه استریفیکاسیون ۶۲/۴۰ درصد پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی در پژوهش حاضر نشان‌دهنده کیفیت مطلوب این محصول است و آن را در گروه پکتین‌های با متوکسیل بالا قرار می‌دهد که برای کاربرد در صنایع غذایی به عنوان ژل‌کننده، پایدارکننده و امولسیفایر بسیار مناسب می‌باشد. برتری روش گرمایش اهمی نسبت به روش معمولی در حفظ درجه استریفیکاسیون بالاتر، یکی از مزایای کلیدی این فناوری سبز در استخراج پکتین از ضایعات مرکبات محسوب می‌شود [۱، ۶].

۳-۳ ظرفیت نگهداری آب و روغن

ظرفیت نگهداری آب و ظرفیت نگهداری روغن از جمله مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی پکتین هستند که کاربرد آن را در صنایع غذایی به عنوان عامل ژل‌کننده، امولسیفایر، پایدارکننده و بافت‌دهنده تعیین می‌کنند. این ویژگی‌ها به طور

مستقیم تحت تأثیر عواملی مانند وزن مولکولی، درجه استریفیکاسیون، ساختار شیمیایی و روش استخراج قرار دارند [۱۸]. نتایج پژوهش حاضر نشان داد (جدول ۱) که پکتین استخراج شده از ضایعات پوست پرتقال با روش گرمایش اهمی دارای ظرفیت نگهداری آب $7/11$ گرم آب بر گرم پکتین و ظرفیت نگهداری روغن $6/23$ گرم روغن بر گرم پکتین بود، در حالی که این مقادیر برای روش گرمایش معمولی به ترتیب $6/01$ گرم آب بر گرم پکتین و $4/93$ گرم روغن بر گرم پکتین به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی باعث افزایش معنی‌دار ظرفیت نگهداری آب (حدود ۱۸ درصد) و ظرفیت نگهداری روغن (حدود ۲۶ درصد) در مقایسه با روش معمولی شده است ($P < 0/05$). این مقادیر نشان‌دهنده توانایی بالای پکتین استخراج شده با روش اهمی در جذب و نگهداری فازهای آبی و روغنی است که برای کاربرد در فرآورده‌های غذایی کم چرب، سس‌ها، محصولات پخته شده و فرآورده‌های گوشتی بازفرموله شده بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۱۹]. تفاوت معنی‌دار در ظرفیت نگهداری آب و روغن بین دو روش استخراج را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد. روش گرمایش معمولی به دلیل زمان استخراج طولانی‌تر (۹۰ دقیقه در مقابل ۳۰ دقیقه در روش اهمی) و حرارت تدریجی، باعث تخریب جزئی زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی و کاهش تعداد گروه‌های هیدروکسیل آزاد در ساختار پکتین می‌شود که این امر توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب را کاهش می‌دهد [۶]. در مقابل، روش گرمایش اهمی با گرمایش سریع و یکنواخت و زمان استخراج کوتاه‌تر، ساختار پلی‌ساکاریدی را بهتر حفظ کرده و گروه‌های هیدروکسیل بیشتری در دسترس برای برهمکنش با آب باقی می‌ماند [۱]. در مورد ظرفیت نگهداری روغن، افزایش معنی‌دار در روش اهمی ($6/23$ گرم بر گرم در مقابل $4/93$ گرم بر گرم در روش معمولی) را می‌توان به درجه استریفیکاسیون بالاتر پکتین استخراج شده با روش اهمی ($62/40$ درصد در مقابل $51/45$ درصد) نسبت داد. پکتین‌های با درجه استریفیکاسیون بالا به دلیل دارا بودن

گروه‌های متیل استری در ساختار خود، تمایل بیشتری به برهمکنش با زنجیره‌های آبگریز روغن دارند و از جدایش فازی جلوگیری می‌کنند [۱۶]. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج سایر محققین در این زمینه همخوانی کامل دارد Saberian و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود بر روی استخراج پکتین از ضایعات پرتقال با روش گرمایش اهمی، خواص عملکردی مطلوبی را برای پکتین استخراج شده گزارش کردند و تأکید نمودند که روش گرمایش اهمی به دلیل حفظ ساختار پلی‌ساکاریدی، منجر به تولید پکتینی با ظرفیت نگهداری آب و روغن بالا می‌گردد [۱]. ظرفیت نگهداری آب بالای پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی ($7/11$ گرم بر گرم) را می‌توان به حفظ بهتر زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی و گروه‌های هیدروکسیل آزاد در ساختار پکتین نسبت داد که از طریق پیوندهای هیدروژنی قادر به جذب و نگهداری مولکول‌های آب هستند [۱۸]. همچنین، ظرفیت نگهداری روغن بالاتر در روش اهمی ($6/23$ گرم بر گرم در مقابل $4/93$ گرم بر گرم در روش معمولی) به دلیل درجه استریفیکاسیون بالاتر و حفظ بهتر گروه‌های متیل استری است که با زنجیره‌های آبگریز روغن برهمکنش داشته و از جدایش فازی جلوگیری می‌کند [۱۶]. در مقابل، مقادیر پایین‌تر ظرفیت نگهداری آب و روغن در روش معمولی حاکی از تخریب بیشتر ساختار پکتین در اثر زمان استخراج طولانی‌تر و حرارت تدریجی است که منجر به کاهش گروه‌های عاملی مؤثر در جذب آب و روغن می‌شود [۶]. این ویژگی‌ها باعث می‌شود پکتین استخراج شده با روش اهمی در پژوهش حاضر پتانسیل بالایی برای کاربرد در فرمولاسیون محصولات غذایی کم چرب (مانند سس‌های سالاد، مایونز کم چرب و فرآورده‌های گوشتی بازفرموله شده) و همچنین به عنوان پایدارکننده امولسیون در صنایع لبنی و آرایشی-بهداشتی داشته باشد [۱۸، ۱۹].

Table 1. Comparison of extraction yield, degree of esterification, and functional properties of pectin extracted by ohmic heating and conventional heating methods

Parameter	Conventional heating (CHE)	Ohmic heating (OHE)	Improvement (OHE vs. CHE)
Extraction yield (%)	12.54 ± 0.89 ^b	15.27 ± 0.37 ^a	~21.8%
Degree of esterification (%)	51.45 ± 2.15 ^b	62.40 ± 2.43 ^a	~21.3%
Water holding capacity (g/g)	6.01 ± 0.18 ^b	7.11 ± 0.25 ^a	~18.3%
Oil holding capacity (g/g)	4.93 ± 0.15 ^b	6.23 ± 0.19 ^a	~26.4%

Note: Different superscript letters (a, b) in the same row indicate significant differences ($p < 0.05$). Values are expressed as mean ± standard deviation.

حرارت تدریجی، باعث تخریب و اکسیداسیون بیشتر رنگدانه‌های طبیعی موجود در پوست پرتقال (مانند کاروتنوئیدها و فلاونوئیدها) می‌شود که منجر به تیره‌تر شدن و کاهش روشنایی محصول نهایی می‌گردد [۱۲]. در مقابل، روش گرمایش اهمی با گرمایش سریع و یکنواخت و زمان استخراج کوتاه‌تر، تخریب رنگدانه‌های طبیعی را به حداقل رسانده و در نتیجه محصولی با روشنایی بالاتر و ظاهر مطلوب‌تر تولید می‌کند [۱]. کاهش معنی‌دار شاخص قرمزی (a) در روش اهمی (۱/۵۸ در مقابل ۳/۲۲) و کاهش شاخص زردی (b) (۱۳/۸۷ در مقابل ۱۷/۹۶) نیز مؤید حفظ بهتر رنگدانه‌ها و جلوگیری از تشکیل ترکیبات رنگی تیره ناشی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن و اکسیداسیون در طی فرآیند استخراج است [۱۷]. نکته قابل توجه این است که اختلاف در شاخص زردی (b) بین دو روش نشان‌دهنده حساسیت بالای ترکیبات زردرنگ پوست پرتقال به زمان و شرایط استخراج است و روش گرمایش اهمی با کاهش چشمگیر این پارامتر، محصولی با رنگ روشن‌تر و مطلوب‌تر تولید کرده است. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج سایر محققین در این زمینه همخوانی کامل دارد. Wang و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود بر روی استخراج پکتین از پوست پرتقال ناول با روش‌های مختلف استخراج گزارش کردند که

۳-۴ شاخص‌های رنگی

شاخص‌های رنگی یکی از معیارهای مهم کیفی در ارزیابی پکتین استخراج‌شده از ضایعات مرکبات محسوب می‌شود، زیرا رنگ محصول نهایی به طور مستقیم بر پذیرش مصرف‌کننده و کاربردهای صنعتی آن تأثیر می‌گذارد [۱۷]. پارامترهای رنگی اندازه‌گیری‌شده شامل روشنایی (L)، قرمزی (a) و زردی (b) می‌باشند که در سیستم رنگی CIE-Lab تعریف می‌شوند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد (جدول ۲) که پکتین استخراج‌شده با روش گرمایش اهمی دارای مقادیر روشنایی (L) برابر ۸۳/۱۱، قرمزی (a) برابر ۱/۵۸ و زردی (b) برابر ۱۳/۸۷ بود، در حالی که این مقادیر برای روش گرمایش معمولی به ترتیب ۷۸/۴۴ (روشنایی)، ۳/۲۲ (قرمزی) و ۱۷۹/۹۶ (زردی) به دست آمد ($P < 0.05$). این نتایج نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی منجر به تولید پکتینی با روشنایی بیشتر قرمزی کمتر و زردی کمتر در مقایسه با روش معمولی شده است. افزایش معنی‌دار روشنایی در پکتین استخراج‌شده با روش گرمایش اهمی (۸۳/۱۱ در مقابل ۷۸/۴۴) را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد. روش گرمایش معمولی به دلیل زمان استخراج طولانی‌تر (۹۰ دقیقه در مقابل ۳۰ دقیقه در روش اهمی) و

به طور معنی‌داری شاخص‌های رنگی را بهبود بخشیده و پکتین با رنگ روشن‌تر و مطلوب‌تری تولید کرده است [۷]. از نظر کاربردی، رنگ روشن و مطلوب پکتین استخراج‌شده با روش گرمایش اهمی (L بالا و a و b پایین) یک مزیت رقابتی مهم برای کاربرد در صنایع غذایی محسوب می‌شود، زیرا محصولاتی با رنگ تیره معمولاً کمتر مورد استقبال مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند و کاربرد آن‌ها در محصولاتی مانند ژله‌ها، مرباها، دسرهای لبنی و فرآورده‌های گوشتی محدود می‌شود [۱۷]. پکتین با رنگ روشن می‌تواند بدون ایجاد تغییر رنگ نامطلوب در محصول نهایی، به عنوان عامل ژل‌کننده و پایدارکننده استفاده شود [۱۶]. بنابراین، برتری روش گرمایش اهمی در تولید پکتین با کیفیت رنگی بهتر، یکی دیگر از مزایای کلیدی این فناوری سبز در استخراج پکتین از ضایعات مرکبات محسوب می‌شود [۱، ۶].

روش‌های استخراج با زمان کوتاه‌تر و دمای پایین‌تر، منجر به تولید پکتینی با روشنایی بالاتر و مقادیر a و b پایین‌تر می‌شوند. در مطالعه دیگری که بر روی استخراج پکتین از ضایعات سیب با روش گرمایش اهمی انجام شد [۱۷]، Wang و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که پکتین استخراج‌شده با روش اهمی دارای رنگ روشن‌تر و مطلوب‌تری نسبت به روش معمولی است و این تفاوت را به کاهش تخریب حرارتی رنگدانه‌ها در اثر زمان استخراج کوتاه‌تر نسبت دادند [۶]. Saberian و همکاران (۲۰۱۷) نیز در مطالعه خود بر روی استخراج پکتین از ضایعات آب پرتقال با روش گرمایش اهمی تأکید کردند که روش گرمایش اهمی به دلیل گرمایش سریع و یکنواخت، محصولی با کیفیت ظاهری بهتر و رنگ روشن‌تر تولید می‌کند [۱]. Razak و همکاران (۲۰۲۵) در استخراج پکتین از پوست پرتقال بیتانگور نیز گزارش کردند که روش گرمایش اهمی

Table 2. Color parameters of pectin extracted by ohmic heating and conventional heating methods

Parameter	Conventional heating (CHE)	Ohmic heating (OHE)
Lightness (L*)	78.44 ± 1.99 ^b	83.11 ± 2.25 ^a
Redness (a*)	3.22 ± 0.23 ^a	1.58 ± 0.12 ^b
Yellowness (b*)	17.96 ± 0.78 ^a	13.87 ± 0.78 ^b

Note: Different superscript letters (a, b) in the same row indicate significant differences ($p < 0.05$). Values are expressed as mean ± standard deviation.

محدوده‌های مربوطه نشان دادند که حاکی از حفظ ساختار اصلی پکتین در هر دو روش استخراج می‌باشد [۶]. در تمامی طیف‌ها، یک باند پهن و قوی در محدوده ۳۲۰۰-۳۵۰۰ سانتی‌متر^{-۱} مشاهده می‌شود که مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (O-H) است. این باند نشان‌دهنده وجود پیوندهای هیدروژنی بین‌مولکولی و درون‌مولکولی در ساختار پکتین می‌باشد [۱۷]. شدت این باند در پکتین استخراج‌شده با روش گرمایش معمولی کمی

۳-۵ طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) یکی از روش‌های مؤثر برای شناسایی گروه‌های عاملی و بررسی تغییرات ساختاری پلی‌ساکاریدها از جمله پکتین می‌باشد. در این پژوهش، طیف‌های FTIR پکتین استخراج‌شده با روش‌های گرمایش اهمی و گرمایش معمولی با طیف پکتین تجاری مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها باندهای مشخصه پکتین را در

پلی ساکاریدها مشاهده می شود که در هر سه نمونه تقریباً مشابه است و نشان دهنده حفظ ساختار اصلی زنجیره پلی گالاکتورونیک در فرآیند استخراج می باشد [۷]. مقایسه کلی طیف ها نشان می دهد که پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی بیشترین شباهت را به پکتین تجاری دارد، در حالی که پکتین استخراج شده با روش معمولی تغییرات جزئی تری را نشان می دهد. این یافته با نتایج Wang و همکاران (۲۰۲۵) که گزارش کردند روش گرمایش اهمی به دلیل زمان استخراج کوتاه تر و گرمایش یکنواخت، ساختار پکتین را بهتر حفظ می کند، همخوانی کامل دارد [۶]. همچنین، Razak و همکاران (۲۰۲۵) نیز در مطالعه خود بر روی استخراج پکتین از پوست پرتقال بیتانگور با روش گرمایش اهمی، تأیید کردند که طیف FTIR پکتین استخراج شده با این روش شباهت بیشتری به پکتین تجاری دارد [۷]. در مجموع، نتایج آنالیز FTIR تأیید می کند که روش گرمایش اهمی در مقایسه با روش معمولی، ساختار شیمیایی پکتین را بهتر حفظ کرده و محصولی با کیفیت بالاتر و شباهت بیشتر به پکتین تجاری تولید می کند [۶].

کاهش یافته است که می تواند ناشی از تخریب جزئی برخی از پیوندهای هیدروژنی در اثر زمان استخراج طولانی تر باشد [۱]. باند در محدوده ۲۹۳۰-۲۹۲۰ سانتی متر^{-۱} مربوط به ارتعاش کششی گروه های متیلن (C-H) است که در تمامی نمونه ها با شدت مشابهی مشاهده می شود [۶]. پیک شاخص در محدوده ۱۷۵۰-۱۷۳۰ سانتی متر^{-۱} مربوط به ارتعاش کششی گروه کربونیل (C=O) استرها می باشد. شدت این باند در پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی به طور قابل توجهی بیشتر از روش معمولی است که نشان دهنده حفظ بهتر گروه های متیل استری و در نتیجه درجه استریفیکاسیون بالاتر در این روش می باشد [۶]. این یافته با نتایج حاصل از آنالیز درجه استریفیکاسیون (۶۲/۴۰ درصد برای روش اهمی در مقابل ۵۱/۴۵ درصد برای روش معمولی) همخوانی کامل دارد [۱]. باند در محدوده ۱۶۰۰-۱۶۵۰ سانتی متر^{-۱} مربوط به ارتعاش کششی نامتقارن گروه کربوکسیلات (COO-) است که نشان دهنده حضور گروه های کربوکسیل آزاد در ساختار پکتین می باشد [۱۷]. در محدوده ۱۲۰۰-۱۰۰۰ سانتی متر^{-۱} نیز باندهای مربوط به ارتعاشات C-O و C-O-C و پیوندهای گلیکوزیدی

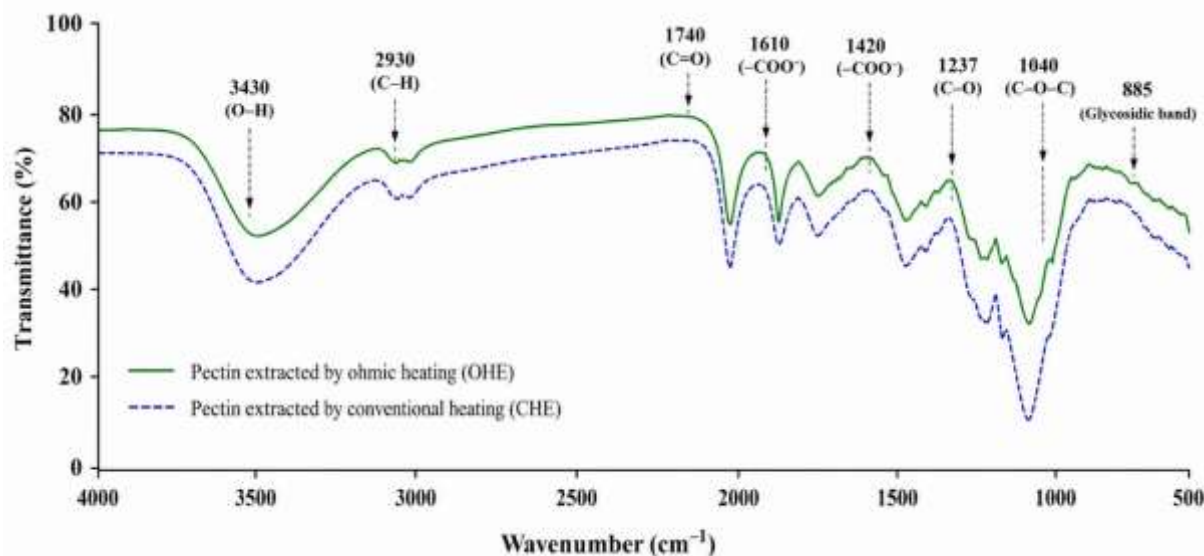


Figure 1. FTIR spectra of pectin extracted by ohmic heating and conventional heating methods

۳-۶ مورفولوژی سطح (SEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy, SEM) اطلاعات ارزشمندی در مورد مورفولوژی سطح، ساختار و توزیع اندازه ذرات پکتین استخراج شده ارائه می‌دهد. در این پژوهش (شکل ۲)، مورفولوژی سطح پکتین استخراج شده با روش‌های گرمایش اهمی و گرمایش معمولی با یکدیگر مقایسه شد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تفاوت‌های قابل توجهی در ساختار سطحی پکتین استخراج شده با دو روش مشاهده گردید. پکتین استخراج شده با روش گرمایش معمولی سطحی نسبتاً ناهموار، با توده‌های نامنظم و ذراتی با اشکال گوناگون نشان داد. این ساختار ناهمگن می‌تواند ناشی از زمان استخراج طولانی‌تر (۹۰ دقیقه) و حرارت تدریجی باشد که منجر به تخریب جزئی زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی و تجمع ذرات می‌گردد [۱۲]. در مقابل، پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی دارای ساختاری یکنواخت‌تر، با ذرات ریزتر و سطحی نسبتاً صاف‌تر بود. این تفاوت را می‌توان به زمان استخراج کوتاه‌تر (۳۰ دقیقه) و گرمایش سریع و یکنواخت در روش اهمی نسبت داد که از تجمع بیش از حد ذرات و تخریب ساختار جلوگیری می‌کند [۷]. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج سایر محققین در این زمینه همخوانی کامل دارد. در مطالعه استخراج پکتین از پوست پرتقال تلخ با استفاده از پیش تیمار الکترومغناطیسی، تصاویر SEM نشان داد که اعمال میدان الکترومغناطیسی منجر به تخریب سلول‌های پارانشیمی و افزایش سطح تماس برای استخراج می‌گردد [۲۰]. همچنین، در مطالعه استخراج پکتین از پوست پرتقال بیتانگور با روش گرمایش اهمی، Razak و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که پکتین استخراج شده با روش اهمی دارای ساختاری یکنواخت‌تر و ذرات ریزتر در مقایسه با روش معمولی است که نشان‌دهنده حفظ بهتر ساختار پلیمری

در اثر زمان استخراج کوتاه‌تر می‌باشد [۷]. در مطالعه دیگری که بر روی استخراج سبز پکتین از پوست پرتقال و لیمو با استفاده از مایکروویو انجام شد، تصاویر SEM نشان داد که پکتین استخراج شده دارای ساختاری متخلخل و ذراتی با اشکال نامنظم است [۲۰]. ساختار یکنواخت‌تر و ذرات ریزتر پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی (OHE) را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد. گرمایش سریع و یکنواخت در روش اهمی باعث می‌شود که دیواره سلولی به طور مؤثرتری تخریب شده و پکتین به صورت یکنواخت‌تری در حلال آزاد شود [۱]. علاوه بر این، اثر غیرحرارتی میدان الکتریکی ممکن است با ایجاد حفره‌های ریز در ساختار سلولی، استخراج پکتین را تسهیل کرده و از تشکیل تجمعات بزرگ ذرات جلوگیری کند [۱۰]. در مقابل، روش گرمایش معمولی به دلیل زمان استخراج طولانی‌تر و گرمایش تدریجی، ممکن است منجر به دناتوره شدن جزئی پکتین و تشکیل توده‌های بزرگ‌تر و نامنظم‌تر شود [۱۲]. از نظر کاربردی، ساختار یکنواخت‌تر و ذرات ریزتر پکتین استخراج شده با روش گرمایش اهمی می‌تواند تأثیر مثبتی بر خواص عملکردی آن مانند حلالیت، سرعت هیدراتاسیون و توانایی ژل شدن داشته باشد [۱۸]. ذرات ریزتر سطح تماس بیشتری با حلال فراهم کرده و در نتیجه حلالیت و پراکندگی پکتین در سیستم‌های آبی را بهبود می‌بخشد [۱۶]. این ویژگی برای کاربرد پکتین در صنایع غذایی به عنوان عامل ژل‌کننده، پایدارکننده و امولسیفایر بسیار حائز اهمیت است. در مجموع، نتایج آنالیز SEM نشان می‌دهد که روش گرمایش اهمی در مقایسه با روش معمولی، پکتینی با ساختار یکنواخت‌تر، ذرات ریزتر و مورفولوژی سطح مطلوب‌تر تولید می‌کند. این مزیت ساختاری را می‌توان به زمان استخراج کوتاه‌تر، گرمایش یکنواخت و اثر غیرحرارتی میدان الکتریکی در روش اهمی نسبت داد [۷، ۱].

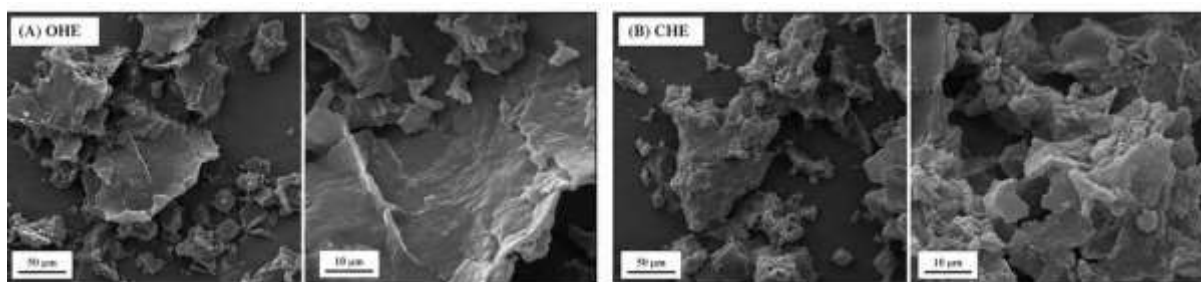


Figure 2. SEM images of pectin extracted by ohmic heating (OHE) (A) and conventional heating (CHE) (B)

۴- نتیجه گیری نهایی

استخراج شده در فرمولاسیون محصولات غذایی کم چرب و همچنین به عنوان جایگزین چربی در فرآورده های گوشتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

دسترسی به داده ها

داده های پژوهش بنا به درخواست در دسترس قرار خواهند گرفت.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه منافع مالی یا روابط شخصی که بر نتایج گزارش شده در این مقاله تاثیرگذار باشد ندارند.

بیانیه تامین مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

سید رسول شاه حسینی: جمع آوری داده ها، تحلیل رسمی، منابع، نرم افزار، نگارش - پیشنهاد اصلی.

سارا جعفریان: مفهوم سازی، مدیریت پروژه، تحقیق، مصورسازی، روش شناسی، اعتبارسنجی، نگارش - بررسی و ویرایش.

سید روح الله جوادیان و سمیه بهرام: مفهوم سازی، مدیریت پروژه، تحقیق، مصورسازی و اعتبارسنجی.

۵- منابع

- [1] Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., Gavlighi, H. A., & Barzegar, M. (2017). Optimization of pectin extraction from orange juice waste assisted by ohmic heating. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 117, 154-161.
- [2] Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., & Ahmadi Gavlighi, H. (2021). Semi-pilot scale extraction of pectin from orange peel waste and evaluating its quantitative and qualitative features. *Food Processing and Preservation Journal*, 12(2), 53-66.
- [3] Zhang, L., Cui, J., Zhao, S., Liu, D., Zhao, C., & Zheng, J. (2023). The structure-function relationships of pectins separated from three citrus parts: Flavedo, albedo, and pomace. *Food Hydrocolloids*, 136(Part A), 108308. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108308>
- [4] Adetunji, L. R., Adekunle, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2017). Advances in the pectin production process using novel extraction <https://doi.org/10.22069/ejfp.2021.15709.1510>

- techniques: A review. *Food Hydrocolloids*, 62, 239–250.
- [5] Belkheiri, A., Forouhar, A., & Ursu, A. V. (2021). Extraction, characterization, and applications of pectins from plant by-products. *Applied Sciences*, 11(14), 6596. <https://doi.org/10.3390/app11146596>
- [6] Wang, R., Xu, Z., Jiang, D., Xiong, X., Li, Y., & Li, X. (2025). Optimization of ohmic heating extraction of pectin from apple pomace and comparison with conventional method. *Food and Bioproducts Processing*, 151, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.03.010>
- [7] Razak, A. A., Ern, C. Y. W., Abidin, M. Z., Mohamad, M. E., Abdullah, M. S., Ab Razak, A. F., Salleh, M. H., Sulaiman, M. S., Maherawati, & Nurhayati. (2025). Pectin extraction and characterization using ohmic heating-assisted heat treatment process from Bintangor orange fruit peels. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 133(2), 195–206.
- [8] Guo, X., Han, D., Xi, H., Rao, L., Liao, X., Hu, X., & Wu, J. (2012). Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure, microwave or traditional heating: A comparison. *Carbohydrate Polymers*, 88(2), 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.12.026>
- [9] de Oliveira, C. F., Giordani, D., Gurak, P. D., Cladera-Olivera, F., & Marczak, L. D. F. (2015). Extraction of pectin from passion fruit peel using moderate electric field and conventional heating extraction methods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.02.005>
- [10] Gavahian, M., & Chu, Y. H. (2022). Ohmic heating extraction at different times, temperatures, voltages, and frequencies: A new energy-saving technique for pineapple core valorization. *Foods*, 11(14), 2015. <https://doi.org/10.3390/foods11142015>
- [11] Ferreira-Santos, P., Nobre, C., Rodrigues, R. M., Genisheva, Z., Botelho, C., & Teixeira, J. A. (2024). Extraction of phenolic compounds from grape pomace using ohmic heating: Chemical composition, bioactivity and bioaccessibility. *Food Chemistry*, 436, 137780. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137780>
- [12] Wang, W., Ma, X., Jiang, P., Hu, L., Zhi, Z., Chen, J., Ding, T., Ye, X., & Liu, D. (2016). Characterization of pectin from grapefruit peel: A comparison of ultrasound-assisted and conventional heating extractions. *Food Hydrocolloids*, 61, 730–739.
- [13] Jamshidian, H., Rafe, A., & Mirzababaei, S. M. (2021). Optimization of pectin extract from pomace waste using response-surface methodology. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 18(117), 207–216. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.117.207>
- [14] Loypimai, P., Moongngarm, A., Chottanom, P., & Moontree, T. (2015). Ohmic heating-assisted extraction of anthocyanins from black rice bran to prepare a natural food colourant. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 27, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.12.009>
- [15] Kulshrestha, S. A., & Sastry, S. K. (2006). Low-frequency dielectric changes in cellular food material from ohmic heating: Effect of end point temperature. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(4), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2006.03.004>
- [16] Tsirigotis-Maniecka, M., Górska, E., Mazurek-Hołos, A., & Pawlaczyk-Graja, I. (2024). Unlocking the potential of food waste: A review of multifunctional pectins. *Polymers*, 16(18), 2670. <https://doi.org/10.3390/polym16182670>
- [17] Wang, T., Tao, Y., Lai, C., Huang, C., Ling, Z., & Yong, Q. (2023). Influence of extraction methods on navel orange peel pectin: Structural characteristics, antioxidant activity and cytoprotective capacity. *International Journal of Food Science and Technology*, 58, 1382–1393. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16300>
- [18] Jia, Y., Wang, C., Khalifa, I., Zhu, Y., Wang, Z., Chen, H., Liang, X., Zhang, H., Hu, L., & Yang, W. (2024). Pectin: A review with recent advances in the emerging revolution and multiscale evaluation approaches of its emulsifying characteristics. *Food Hydrocolloids*, 157, 110428. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110428>
- [19] Vilas-Boas, A. A., Magalhães, D., Gómez-García, R., Campos, D. A., Correia, M., & Pintado, M. (2025). Upcycled orange peel ingredients: A scoping review on phytochemical composition, extraction techniques, and biorefinery strategies. *Foods*, 14(21), 3766. <https://doi.org/10.3390/foods14213766>
- [20] Fidalgo, A., Ciriminna, R., Carnaroglio, D., Tamburino, A., Cravotto, G., Grillo, G., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2016). Eco-friendly extraction of pectin and essential oils from orange and lemon peels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(4), 2243–2251. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01716>



Scientific Research

Green Extraction of Pectin from Orange Peel Waste: A Comparative Study of Ohmic Heating and Conventional Heating Methods

Seyed Rasoul Shahosseini¹, Sara Jafarian^{1*}, Seyed Rohollah Javadian², Somayeh Bahram²

1-Department of Food Science and Technology, No.C., Islamic Azad University, Nour, Iran.

2-Department of Fisheries, QaS.C., Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/06/06

Review: 2026/06/14

Accepted: 2026/06/20

Keywords:

Pectin, Ohmic heating,

Degree of esterification,

FTIR spectroscopy,

Scanning electron microscopy (SEM)

DOI: 10.48311/fsct.2026.121074.83189

*Corresponding Author E-

drsjafrican2024@iau.ac.ir

Conventional methods for pectin extraction from citrus waste are associated with several drawbacks, including long extraction times, high energy consumption, and partial degradation of pectin structure. In the present study, pectin extraction from orange peel waste using ohmic heating as a green and efficient technology was investigated and compared with conventional heating extraction. Pectin extraction was carried out under optimal ohmic heating conditions (voltage gradient of 15 V/cm, temperature of 90 °C, time of 30 min) and conventional heating (temperature of 90 °C, time of 90 min). The extracted pectin was evaluated in terms of extraction yield, degree of esterification, water holding capacity, oil holding capacity, color parameters, chemical structure (FTIR), and surface morphology (SEM). The results showed that ohmic heating significantly increased the extraction yield (15.27% vs. 12.54%). The degree of esterification of pectin extracted by ohmic heating (62.40%) was significantly higher than that obtained by conventional heating (51.45%), placing it in the high methoxyl pectin group. Water holding capacity (7.11 g/g) and oil holding capacity (6.23 g/g) were approximately 18% and 26% higher in the ohmic heating method compared to the conventional method, respectively. Pectin extracted by ohmic heating exhibited higher lightness and lower redness and yellowness values. FTIR analysis confirmed better preservation of the pectin chemical structure in the ohmic heating method, and SEM images revealed a more uniform structure, finer particles, and a smoother surface. In conclusion, ohmic heating, as a green, efficient, and energy-saving technology, exhibits great potential to replace conventional methods for pectin extraction from citrus waste, offering a sustainable and value-added approach for the management of citrus processing waste.