

Study of Pectin Extraction Methods: From Traditional Approaches to Advanced Technologies

Pages
05-30

F. Khodaiyan¹ and S. S. Hosseini^{2*}

1 & 2) Department of Bioengineering, College of Interdisciplinary Science and Technologies,
University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author : Saeid_hosseini@ut.ac.ir

Received date: 2025.04.16

Accepted date: 2025.07.21

Abstract

Pectin is a widely used plant polysaccharide predominantly found in the plant cell wall, exhibiting varying structural and functional properties depending on its source and extraction method. This article provides a comprehensive review of different approaches for extracting pectin from commercial and non-commercial sources, with a focus on the importance of the source type and extraction method. Initially, conventional extraction methods such as acidic, alkaline, and aqueous extraction are examined. Although these methods are simple and common, they face limitations due to high energy consumption, use of corrosive materials, and the potential degradation of pectin structure. Subsequently, novel methods including microwave-assisted extraction, ultrasound, enzymes, pulsed electric fields, ohmic heating, high pressure, plasma, and subcritical water extraction are reviewed. Each of these techniques has been developed with the aim of improving yield, reducing processing time, preserving pectin structure, and minimizing chemical usage, while requiring specialized equipment and precise optimization conditions. This article, through an analysis of the advantages and disadvantages of each method, demonstrates that the selection of the extraction technique depends on factors such as the type of plant source, intended application, sensitivity of the extracted composition, cost, environmental considerations, and available infrastructure. This article can serve as a suitable guide for choosing the optimal pectin extraction method in various industrial and research applications.

Keywords: Microwave, Ultrasound, Electric field and Subcritical water.

بررسی روش‌های استخراج پکتین: از شیوه‌های سنتی تا فناوری‌های نوین

شماره صفحات

۰۵-۳۰

مقاله مروری

فرامرز خدائیان^۱ و سیدسعید حسینی^{۲*}

۱ و ۲) گروه مهندسی زیستی، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Saeid_hosseini@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

چکیده

پکتین یک پلی‌ساکارید گیاهی پرکاربرد است که به‌طور عمده در دیواره سلولی گیاهان یافت می‌شود و بسته به منبع و روش استخراج، دارای خصوصیات ساختاری و عملکردی متفاوتی است. در این مقاله، با تمرکز بر اهمیت نوع منبع و روش استخراج، مروری جامع بر رویکردهای مختلف استخراج پکتین از منابع تجاری و غیرتجاری ارائه شده است. ابتدا روش‌های استخراج متداول مانند استخراج اسیدی، قلیایی و آبی بررسی شده‌اند که اگرچه ساده و رایج هستند، اما به دلیل مصرف انرژی بالا، استفاده از مواد خورنده و احتمال تخریب ساختار پکتین، با محدودیت‌هایی همراهند. در ادامه، روش‌های نوین شامل استخراج به کمک امواج مایکروویو، امواج فراصوت، آنزیم‌ها، میدان‌های الکتریکی پالسی، گرمایش اهمی، فشار بالا، پلاسما و آب زیر بحرانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هر یک از این روش‌ها با هدف افزایش بازده، کاهش زمان، حفظ ساختار پکتین و کاهش مصرف مواد شیمیایی توسعه یافته‌اند، اما در عین حال به تجهیزات تخصصی و شرایط بهینه‌سازی دقیق نیاز دارند. مقاله حاضر با تحلیل مزایا و معایب هر روش، نشان می‌دهد که انتخاب روش استخراج به عواملی همچون نوع منبع گیاهی، هدف کاربردی، حساسیت ترکیب استخراجی، هزینه، ملاحظات زیست‌محیطی و زیرساخت‌های موجود وابسته است. این مقاله می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب روش بهینه استخراج پکتین در کاربردهای مختلف صنعتی و تحقیقاتی باشد.

واژه‌های کلیدی: مایکروویو، فراصوت، میدان الکتریکی و آب زیر بحرانی.

مقدمه

پکتین به عنوان یکی از مهمترین و پرکاربردترین فیبرهای طبیعی، مخلوطی از پلی‌ساکاریدهای گیاهی است که در دیواره سلولی و میدل لاملا بافت اکثر گیاهان یافت شده و حدود یک سوم وزن خشک این بخش را تشکیل می‌دهد. ترکیب اصلی پکتین ستونی از گالاکتورونیک اسید با پیوندهای گلیکوزیدی داخلی ۱ به ۴ بوده که زنجیره‌های متنوع از فندهای طبیعی به صورت زنجیره‌های جانبی به آن متصل هستند (Salimi et al., 2024; Najari et al., 2022). به طور کلی، دو خصوصیت پکتین شامل محتوای گالاکتورونیک اسید و درجه استریفیکاسیون در کاربرد و شناسایی آن بسیار حائز اهمیت هستند. همه انواع پکتین با محتوای بالای گالاکتورونیک اسید شناخته می‌شوند و با توجه به قوانین سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد موسوم به FAO و اتحادیه اروپا (EU)، در صورتی که سوپرناتانت استخراجی از گیاه پکتین گفته می‌شود که حداقل حاوی ۶۵ درصد گالاکتورونیک اسید باشد (Hosseini et al., 2016a). همچنین گزارش شده است که برای استفاده در صنایع دارویی، پکتین بعد از هیدرولیز باید حداقل حاوی ۷۴ درصد گالاکتورونیک اسید باشد. در خصوص درجه استریفیکاسیون، پکتین‌ها به دو دسته کلی پکتین با درجه استری بالا (HMP) و پکتین با درجه استری پایین (LMP) تقسیم بندی می‌شوند. پکتین با درجه استری بالا به پکتین با درجه متوکسیلاسیون بالای ۵۰ درصد گفته می‌شود که این نوع پکتین در حضور غلظت بالای شکر (۵۵ تا ۷۵ درصد) و در شرایط اسیدی (pH بین ۲ الی ۳/۵) تشکیل ژل می‌دهد. در مقابل، پکتین با درجه استری پایین به پکتین با درجه استری کمتر از ۵۰ درصد گفته می‌شود که برای تشکیل ژل به شکر وابسته نبوده و در حضور یون‌های دو ظرفیتی مثل یون کلسیم در دامنه وسیعی از pH ژل تشکیل می‌دهند و بنابراین کاربرد گسترده‌ای در تولید محصولات رژیمی دارند (Hosseini et al., 2016b). پکتین کاربرد گسترده‌ای در صنایع غذایی و دارویی بعنوان پایدارکننده، قوام دهنده، امولسیفایر و ژل کننده دارد. همچنین از این پلی‌ساکارید می‌توان برای کاهش چربی خون، کاهش درد، کاهش بیماری‌های قلبی و بعنوان مواد پایه برای انکپسولاسیون انواع داروها و غذاها استفاده نمود. البته کاربرد پکتین در صنایع مختلف بسیار گسترده بوده که بررسی جزئیات آن خارج از اهداف اصلی این مقاله می‌باشد (Kazemi et al., 2019a). منابع پکتین را می‌توان به دو دسته تجاری و غیر تجاری تقسیم‌بندی کرد. منابع تجاری پکتین شامل پوست مرکبات، تفاله سیب و چغندر قند می‌باشد. به هر حال، درخواست بالا برای پکتین با خصوصیات مختلف در بازار جهانی سبب معرفی منابع دیگر برای تولید پکتین شده است که از آن می‌توان به پوست نارنج، تفاله هویج، پوست پسته، پوست بادام، پوست بادمجان و غیره اشاره کرد (Kazemi et al., 2019b). تحقیقات نشان داده است که نوع منبع در خصوصیات پایه‌ای پکتین بسیار موثر بوده و پکتین منابع مختلف خصوصیات متفاوت و در نتیجه کاربردهای متفاوتی نیز خواهند داشت. برای مثال پکتین بدست آمده از پوست پرتقال محتوای گالاکتورونیک اسید، درجه استریفیکاسیون و خصوصیات عملکردی متفاوت از پکتین بدست آمده از پوست بادمجان دارد که همین می‌تواند سبب کاربرد متفاوت آنها باشد. به هر حال، در کنار منبع، روش استخراج نیز روی کیفیت ترکیبات استخراجی و همچنین هزینه نهایی

تولید بسیار موثر است (Pourramezan *et al.*, 2022; Raji *et al.*, 2017). روش‌های استخراج پکتین را می‌توان به شکل‌های مختلف دسته‌بندی نمود که یکی از جامع‌ترین آن دسته‌بندی به دو گروه کلی روش‌های سنتی یا متداول و روش‌های نوین است. تحقیقات فراوانی روی انواع روش‌های استخراج پکتین صورت گرفته است که نتایج نشان می‌دهد انتخاب روش استخراج هم روی کیفیت محصول و هم روی هزینه تولید بسیار موثر است تا جایی که گزارش شده است که استفاده از روش‌های مختلف استخراج حتی برای یک منبع، سبب تولید پکتین با خصوصیات متفاوت شده است. روش‌های سنتی استخراج شامل حرارت محلول اسیدی یا قلیایی حاوی منبع پکتین برای مدت طولانی بوده که علاوه بر مصرف انرژی زیاد، مدت زمان فرایند هم بسیار طولانی بوده و تخریب ساختار پکتین نیز در اینگونه روش‌ها محتمل می‌باشد. به همین دلیل، محققین به دنبال روش‌های جایگزین بوده و هستند که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش استخراج به کمک امواج میکروویو، استخراج به کمک امواج اولتراسوند، استخراج با آب زیر بحرانی و غیره اشاره کرد (Asgari *et al.*, 2020; Kazemi *et al.*, 2021; Hosseini *et al.*, 2019). تحقیقات ما در چندین سال اخیر نشان داده که در یک مقاله نمی‌توان گزارش جامعی از ساختار و خصوصیات، منابع، روش‌های استخراج و کاربردهای پکتین در صنایع مختلف ارائه نمود و گزارش هر کدام از موارد فوق حداقل نیاز به تدوین یک مقاله مجزا دارد. بنابراین، در این تحقیق قصد داریم رویکردهای مختلف استخراج پکتین از روش‌های متداول گرفته تا نوین را بررسی کرده و تاثیر هر یک در راندمان و خصوصیات محصول نهایی را شرح دهیم.

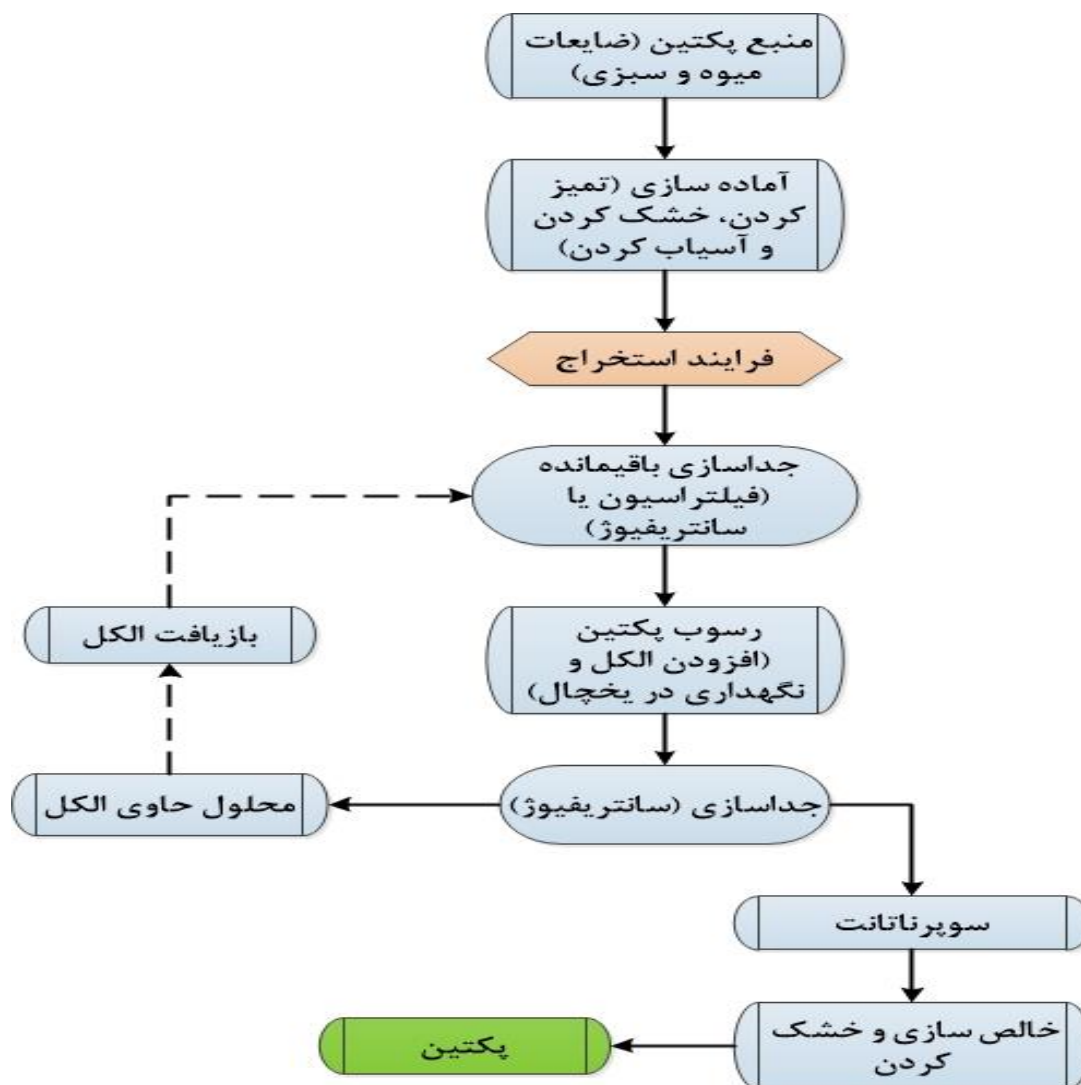
روش‌های استخراج پکتین

اگرچه روش‌های استخراج می‌تواند کاملاً متفاوت و منحصر به فرد باشد که مفصلاً در ادامه به آن پرداخته خواهد شد، اما مراحل آماده‌سازی و جداسازی پکتین استخراجی معمولاً در تمام روش‌ها به یک شکل انجام می‌شود. شکل ۱ فرایند کلی استخراج پکتین را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود اولین مرحله آماده‌سازی منبع پکتین بوده که شامل خشک کردن، آسیاب و الک نمودن می‌باشد. در مرحله بعد منبع تحت تاثیر روش‌های مختلف استخراج قرار می‌گیرد و پکتین از سایر بخش‌های بافت گیاه جدا و وارد محلول استخراج شود (این محلول می‌تواند اسیدی، قلیایی، آبی و غیره باشد). سپس، مواد جامد باقیمانده با استفاده از سانتریفیوژ جداسازی شده و الک‌ها به نسبت‌های مختلف معمولاً یک به یک یا دو به یک به محلول باقیمانده اضافه می‌گردد. پس از ۱۲ الی ۲۴ ساعت نگهداری در یخچال، سوپرناتانت ایجاد شده با استفاده از سانتریفیوژ از مخلوط الک‌ها و محیط استخراج جدا شده و خشک می‌گردد. سپس حسب نیاز، آزمون‌های مختلفی روی ماده خشک بدست آمده برای بررسی خصوصیات کیفی و عملکردی انجام می‌شود (Pasandide *et al.*, 2017; Chaharbaghi *et al.*, 2017).

روش‌های استخراج سنتی

در بسیار از منابع علمی از روش استخراج اسیدی، قلیایی و آبی بعنوان روش‌های استخراج متداول یاد شده است که در این تحقیق نیز به آن پرداخته خواهد شد. به هر حال، ذکر جزئیات تمام مقالات و منابع علمی که از این رویکرد استفاده کرده‌اند

کاری زمان‌بر و خارج از هدف اصلی این مقاله می‌باشد، بنابراین در جدول ۱ سعی شده است که به برخی از مطالعات انجام شده برای استخراج پکتین با روشهای متداول که برگرفته از گزارش Ripoll and Hincapie-Llanos (2023) با تغییرات می‌باشد، اشاره شود.



شکل ۱- فرایند کلی استخراج پکتین با روش‌های مختلف. به مراحل پس از فرایند استخراج فرایندهای جداسازی و خالص‌سازی گفته می‌شود.

Figure 1. General process of pectin extraction by different methods. The steps after the extraction process are called separation and purification processes.

استخراج اسیدی و قلیایی

اگرچه در تحقیقات مختلف از شرایط استخراج متفاوتی استفاده شده است، اما این روش معمولاً شامل استفاده از pH پایین (بین ۱/۵ تا ۳) و دمای بالا (۷۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس) برای مدت حداکثر ۳ ساعت می‌باشد. علاوه بر pH، دما و زمان استخراج، نسبت جامد به مایع و اندازه ذرات نیز بر کیفیت پکتین استخراج شده موثر است (Pasandide *et al.*, 2018). اسیدی با استفاده از اسیدهای معدنی قوی و بسیار خورنده مانند اسید سولفوریک، اسید کلریدریک و اسید نیتریک تنظیم

می‌شود. با این حال، استفاده از این اسیدها باعث افزایش هزینه استخراج و بروز مسائل زیست‌محیطی متعددی می‌شود. اسیدهای آلی ملایم‌تر و با درجه خلوص غذایی مانند اسید استیک و اسید سیتریک نیز به عنوان جایگزین این مشکل را کاهش داده‌اند. اگرچه این اسیدهای ملایم توان هیدرولیز کمتری دارند، استفاده از آن‌ها همسو با توسعه ترکیبات دارای برچسب پاک (Clean product) برای کاربردهای غذایی است (Hosseini et al., 2016a; Pasandide et al., 2017). در تحقیقی در مورد تاثیر نوع اسید روی استخراج پکتین گزارش شده است که راندمان تولید از پوست سیب با استفاده از اسید تارتاریک، اسید مالیک و اسید سیتریک به ترتیب در حدود ۶/۲، ۵/۴ و ۵/۳ درصد بر حسب وزن خشک بوده، که این مقادیر نسبت به بازده ۶/۴ درصدی حاصل از استخراج با اسید کلریدریک ۰/۱ مولار تفاوت قابل توجهی ندارد (Cho et al., 2019). این نتایج نشان می‌دهد که اسیدهای آلی با درجه خلوص غذایی جایگزینی سازگار با محیط زیست برای اسیدهای معدنی خورنده در استخراج پکتین محسوب می‌شوند، چرا که اختلاف بازده پکتین حاصل از استفاده از اسیدهای آلی نسبت به اسید کلریدریک قابل توجه نیست. علاوه بر این، گزارش مذکور نشان داد که استفاده از اسیدهای آلی می‌تواند منجر به پکتینی با وزن مولکولی، ویسکوزیته و درجه استری بالاتر شود. به طور کلی می‌توان بیان داشت که اسیدهای آلی به دلیل ثابت تفکیک پایین‌تر، کمتر باعث تخریب پکتین می‌شوند، زیرا تولید یون‌های هیدروژن کمتری دارند (یون هیدروژن عامل هیدرولیز و تولید پلیمرها با وزن مولکولی پایین‌تر است) (Woo et al., 2010). عامل دیگری که کیفیت پکتین استخراج شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد، دمای استخراج است. دمای بالاتر اگر چه سبب افزایش استخراج پکتین می‌شود، اما تجزیه پکتین و تولید پکتین با DE پایین‌تر و قطعات پلی‌گالاکتورونیک اسید را به دنبال دارد (Kazemi et al., 2021). دمای بالا همچنین به تخریب دیواره سلولی کمک کرده و نفوذ حلال به ساختار گیاهی را آسان‌تر می‌کند، که در نهایت استخراج پکتین را ساده‌تر می‌سازد. با وجود تاثیرات مثبت دما، گزارش شده است که افزایش بیش از حد دما باعث کاهش بازده می‌شود، زیرا تخریب بیشتر پکتین منجر به تشکیل مولکول‌های زنجیره کوتاه می‌شود که توسط اتانول رسوب نمی‌کنند (Pourramezan et al., 2022). از سوی دیگر، استخراج در دمای اتاق فقط پکتین‌های ضعیف متصل به دیواره سلولی را حل کرده و در نتیجه سبب ایجاد راندمان بسیار پایینی می‌شود. به هر حال، مسلم است که دمای بهینه استخراج بسته به منبع پکتین متفاوت است، اما بیشتر تحقیقات دمای ۸۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس را به عنوان بهترین دما برای استخراج با بازده بالا معرفی کرده‌اند. در خصوص استفاده از محیط قلیایی برای استخراج پکتین می‌توان بیان داشت که رویکرد استخراج کاملاً مشابه با روش اسیدی است با این تفاوت که در این روش‌ها به جای اسید از بازهایی مانند سدیم هیدروکسید استفاده می‌شود. به هر حال این روش سنتی و متداول معایبی نیز دارد که تولیدکنندگان سازمان‌های ناظر را با چالش جدی رو به رو کرده است که از آن می‌توان به مصرف بالای انرژی به دلیل دمای بالا، استفاده از اسیدهای خورنده که هزینه و خطرات زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند و همچنین امکان آسیب به کیفیت پکتین به‌خاطر شرایط سخت استخراج اشاره کرد. در شکل ۲ نمایی از فرایند استخراج پکتین بر اساس این روش نشان داده شده است.

استخراج آبی

این روش اگر چه رویکردی مشابه با روش اسیدی/قلیایی دارد، اما اسید یا قلیا از آن حذف شده و محیط استخراج فقط حاوی آب می‌باشد (شکل ۲). بدیهی است که حذف اسید/قلیا سبب کاهش راندمان تولید خواهد شد اما کیفیت پکتین استخراجی معمولاً بهتر از روش قبلی است. در برخی تحقیقات به منظور افزایش راندمان تولید از دمای بالاتر، زمان طولانی‌تر و نسبت مایع به جامد کمتر استفاده شده است که این رویکرد اگر چه منجر به تولید پکتین با راندمان بالاتر شده است، اما کیفیت پکتین نهایی به طور معنی‌داری کاهش یافته است (Hosseini *et al.*, 2016a; Pasandide *et al.*, 2017). به هر حال، در این روش اگر چه ماده آسیب‌زننده مستقیم به محیط‌زیست حذف شده است اما همچنان مصرف بالای انرژی به عنوان یک چالش مهم مطرح بوده که نهایتاً سبب افزایش قیمت محصول نهایی می‌شود.

روش‌های استخراج نوین

مجموع معایب بیان شده برای استخراج پکتین به روش‌های سنتی و متداول سبب تمایل محققین و تولیدکنندگان به سمت روش‌های نوین شده است که در ادامه به مهمترین آنها اشاره خواهد شد. همچنین خلاصه‌ای از برخی تحقیقات انجام شده روی استخراج پکتین با روش‌های نوین در جدول ۱ که بر گرفته از گزارش Ripoll and Hincapie-Llanos (2023) با تغییرات می‌باشد، آورده شده است.

استخراج به کمک امواج مایکروویو

استخراج به کمک مایکروویو (Microwave-assisted extraction یا MAE) (شکل ۳) تکنیکی است که از تابش مایکروویو برای افزایش بهره‌وری استخراج ترکیبات زیست‌فعال از مواد جامد، از جمله بافت‌های گیاهی، استفاده می‌کند. این روش شامل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نوسانی است که به صورت عمود بر یکدیگر عمل می‌کنند. تابش مایکروویو با تخریب ساختار دیواره سلولی و سلول‌های پاراننشیمی سبب تعامل بیشتر عامل استخراج (حلال) و ماده اولیه (منبع گیاهی) شده و در نتیجه حلال می‌تواند به نواحی پکتین‌دار بیشتری نفوذ کند (Calce *et al.*, 2012; Putra *et al.*, 2022). به طور کلی، روش MAE مبتنی بر تولید حرارت هنگام قرارگیری ماده دی‌الکتریک در میدان مایکروویو می‌باشد. این اثر گرمایی یا از طریق هدایت یونی ایجاد می‌شود که شامل جابجایی یون‌های باردار در جهت میدان‌های با بار مخالف است، یا از طریق چرخش دوقطبی‌ها که جابجایی متناوب مولکول‌های قطبی باعث چرخش دوقطبی‌ها می‌شود (Hu *et al.*, 2019). در یکی از مطالعات، پکتین از پوست لیمو با استفاده از فرآیند گرمادهی مایکروویویی استخراج شد و نتایج آن با روش گرمادهی سنتی مقایسه گردید و نتایج نشان داد که روش گرمادهی مایکروویویی کارآمدتر است، زیرا پکتین استخراج شده دارای وزن مولکولی و درجه استریفیکاسیون بالاتری نسبت به روش سنتی بود (Rodsamran and Sothornvit, 2019). آب به عنوان بخشی از محیط استخراج یک مولکول قطبی بسیار متقارن است که در پاسخ به تابش مایکروویو حرارت تولید می‌کند.

جدول ۱: روش‌های استخراج و برخی خصوصیات پکتین منابع مختلف

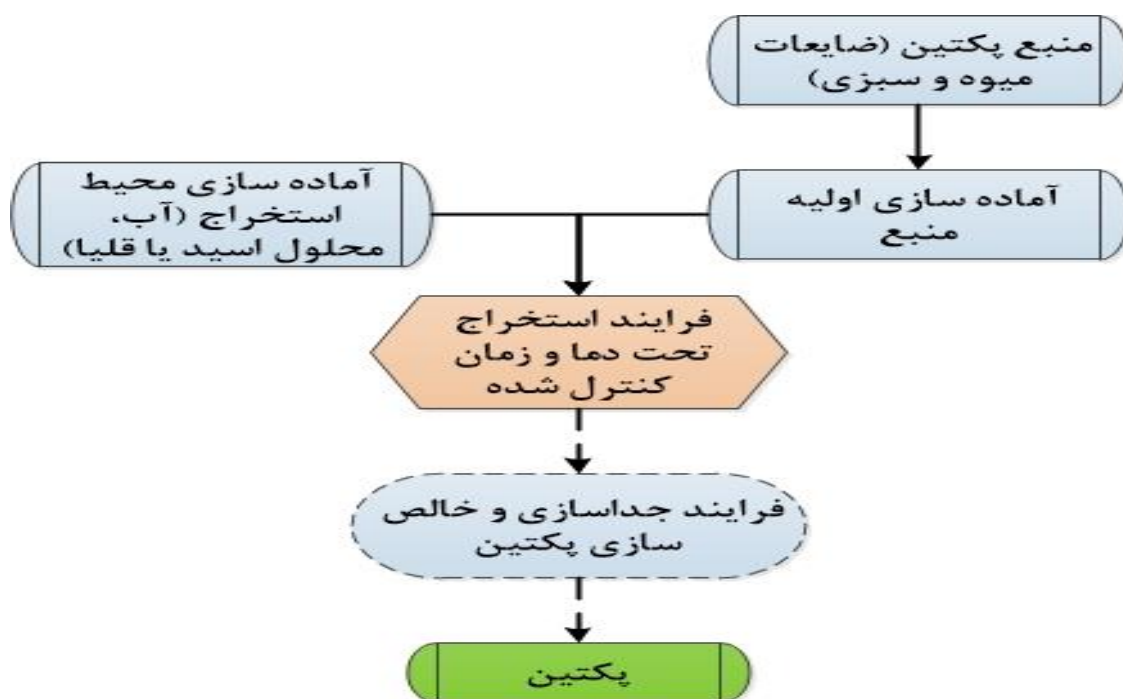
Table 1: Extraction methods and some properties of pectin from different sources.

منبع پکتین Pectin source	روش استخراج Extraction method	درجه استریفیکاسیون (درصد) Degree of esterification (%)	محتوای گالاکتورونیک اسید (درصد) Galacturonic acid content (%)	راندمان استخراج (درصد) Extraction yield (%)
سیب Apple	اسید Acid	56-69	55.5-80	3.2-16.2
	مایکروویو Microwave	53.8	40.7	10.58
	آنزیم Enzyme	56.98	55.9-56.56	1.58-7.39
موز Banana	مایکروویو Microwave	63.58	-	14.34
میوه ازدها Dragon fruit	آب Water	26	-	20
	اسید Acid	64	39	5-26
خارگیل Durian	اسید Acid	53.15	-	9.62
انجیر Fig	آب Water	38.75	52.47	6.05
	اولتراسوند Ultrasound	39.42	66.12	8.74
	مایکروویو Microwave	38.51	68.51	9.26
گابیروبا Gabiroba	اسید Acid	53.6	-	5.89
کیوی طلایی Gold kiwi	اسید Acid	88	48-82	1.4-3.8
	آنزیم Enzyme	82	58-84	3.2-4.4
گریپ فروت Grapefruit	اسید Acid	26.68-80.32	35.1-80.94	8.38-21.28
	اولتراسوند Ultrasound	29.7-65.37	54.73-84.4	6.5-23.49
	قلیا Alkaline	7.13-25.19	44.15-60.63	17.93-24.52
	مایکروویو Microwave	37.25	35.63	27.10
	آنزیم Enzyme	56.98	11.20	1.58
	آب زیر بحرانی Subcritical water	83.41	44.37	13.33
زالزالک Hawthorn fruit	مایکروویو Microwave	-	68.94	-
	اسید Acid	54.16	-	16.75
جک فروت Jackfruit	اولتراسوند Ultrasound	-	-	14.47
کیوی Kiwi	اولتراسوند Ultrasound	50.73	-	12.60
	مایکروویو Microwave	50.67	-	9.18
انبه Mango	مایکروویو Microwave	52-79	75	10.5-12.5
	اولتراسوند Ultrasound	58	70	8.6
	اسید Acid	56.5	-	8.7

ادامه جدول ۱: روش‌های استخراج و برخی خصوصیات پکتین منابع مختلف

Table 1: Extraction methods and some properties of pectin from different sources.

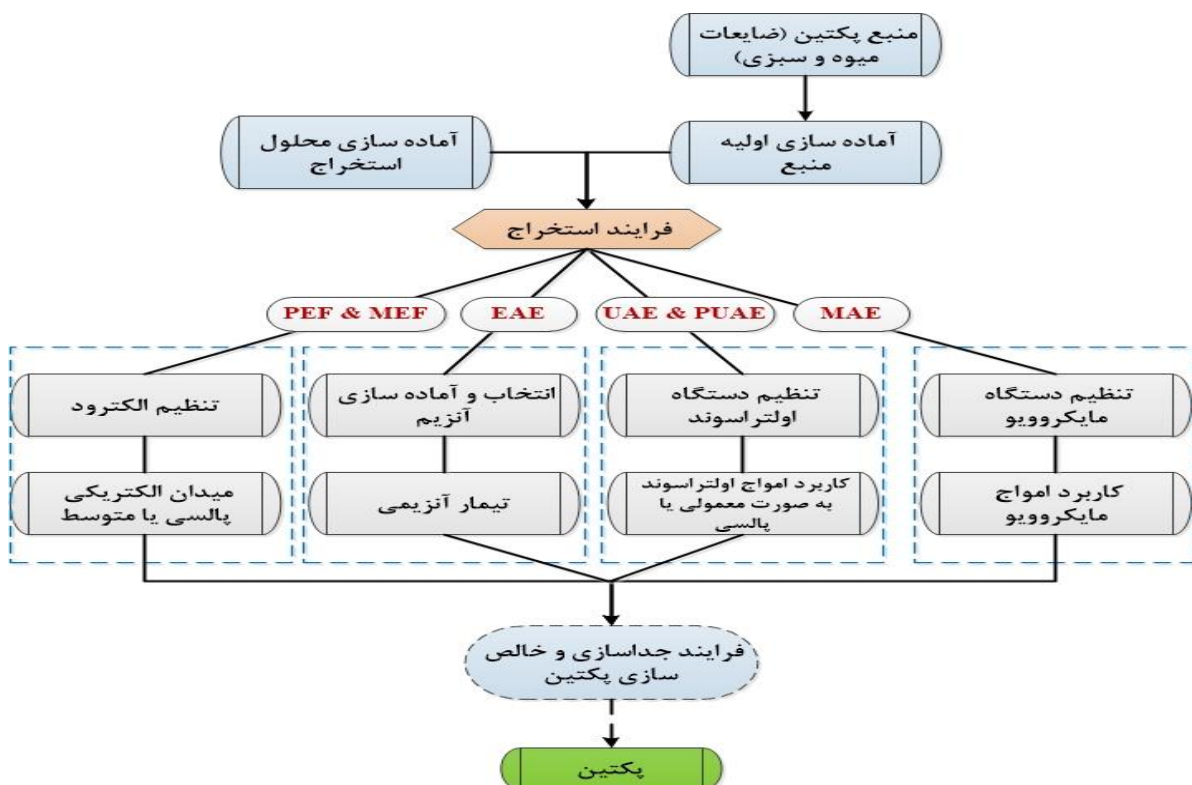
منبع پکتین Pectin source	روش استخراج Extraction method	درجه استریفیکاسیون (درصد) Degree of esterification (%)	محتوای گالاکتورونیک اسید (درصد) Galacturonic acid content (%)	راندمان استخراج (درصد) Extraction yield (%)
پیاز Onion	آنزیم Enzyme	-	19.3	2.30
	اسید Acid	35-70	35	8.48-32.6
پرتقال Orange	مایکروویو Microwave	42.85	-	15.79
	آنزیم Enzyme	56-58	11.2	1.5-14
پاپایا Papaya	اسید Acid	46-51	-	2.23-5.85
	آب Water	74.67	68.1-98.3	70.92
	اسید Acid	70.3-90.7	85.3	7.7-30.7
گل ساعتی Passion fruit	آنزیم Enzyme	67.5-80	69.2	9.1-17
	میدان الکتریکی متوسط Moderate electric field	90.6	-	5.2
آناناس Pineapple	اسید Acid	-	-	13.77
	اولتراسوند Ultrasound	66.4-76.9	82.5	15-33
	مایکروویو Microwave	59.7	91.1	25.4
گوجه Tomato	گرمایش اهمی Ohmic heating	74.3	67.5	10.65
	فرایند فشار بالا High-pressure processing	-	-	6.6-9.2



شکل ۲- فرایند استخراج پکتین به روش‌های سنتی با استفاده از اسید، قلیا و آب. فرایند جداسازی و خالص سازی مطابق شکل ۱ می-باشد.

Figure 2. Pectin extraction process by traditional methods using acid, alkali and water. The separation and purification process is as shown in Figure 1.

گرم کردن مخلوط نمونه و حلال فرآیند استخراج را با تسهیل انتشار مواد بین نمونه و حلال بهبود می‌بخشد و بنابراین نقش بسیار مهمی در استخراج با مایکروویو ایفا می‌کند. نرخ گرمایش به طور مستقیم با توان مایکروویو، که معمولاً بر حسب وات (W) اندازه‌گیری می‌شود، نسبت دارد و این پارامتر یکی از عوامل تعیین‌کننده در فرآیند استخراج است (Hosseini *et al.*, 2016b). از آنجایی که تولید حرارت به خواص دی‌الکتریک نمونه و حلال نیز بستگی دارد، این خواص بر نرخ استخراج و کیفیت مواد استخراج شده تاثیرگذار هستند. بنابراین، مخلوط‌های نمونه-حلال با خواص دی‌الکتریک مناسب می‌توانند به خوبی روند استخراج را بهبود دهند. استخراج با روش MAE را می‌توان در چهار مرحله خلاصه کرد: (۱) زمانی که نمونه در معرض تابش الکترومغناطیسی مایکروویو قرار می‌گیرد، مولکول‌های قطبی مانند آب به سرعت نوسان کرده و موجب تولید گرما درون نمونه می‌شوند. (۲) فشار ناشی از گرم شدن سریع و تبخیر آب درون سلولی باعث پارگی سلول‌ها و آزادسازی بیشتر مولکول‌های هدف می‌شود. (۳) برهم‌کنش حرارت و حلال موجب افزایش انحلال‌پذیری و نفوذپذیری ترکیبات استخراج‌شده می‌شود، که در نتیجه کارایی استخراج افزایش می‌یابد. (۴) گرم شدن سریع و انتقال موثر انرژی منجر به کاهش قابل توجه زمان استخراج می‌شود.



شکل ۳- فرایند استخراج پکتین به روش‌های مایکروویو، فراصوت، آنزیمی و میدان الکتریکی. فرایند جداسازی و خالص سازی مطابق شکل ۱ می‌باشد. MAE, UAE, PUAE, EAE, PEF و MEF به ترتیب مخفف استخراج به کمک امواج مایکروویو، فراصوت، فراصوت پالسی، آنزیم، میدان الکتریکی پالسی و میدان الکتریکی متوسط می‌باشند.

Figure 3. Pectin extraction process by microwave, ultrasound, enzyme and electric field. The separation and purification process is as shown in Figure 1. MAE, UAE, PUAE, EAE, PEF and MEF stand for microwave-, ultrasound-, pulsed ultrasound-, enzyme-, pulsed electric field-, and moderate electric field-assisted extractions, respectively.

استخراج به کمک امواج فراصوت

در روش استخراج به کمک فراصوت (Ultrasound-assisted extraction یا UAE) (شکل ۳)، امواج فراصوت یا ارتعاشات صوتی در بازه‌ی فرکانسی ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز، با ایجاد نوسانات فشاری در حلال، منجر به تشکیل میکروحباب‌هایی می‌شوند که همانند ریزجت‌ها عمل می‌کنند (Pico, 2013). این ریزجت‌ها با تخریب دیواره سلولی، نفوذ حلال به درون ساختار گیاه و همچنین انتقال جرم را به‌طور موثری بهبود می‌بخشند که نتیجه آن نیاز کمتر به حلال و انرژی و افزایش بازده استخراج در زمان کوتاه‌تر می‌باشد (Hosseini *et al.*, 2019). این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که این روش به‌عنوان جایگزینی دوستدار محیط‌زیست برای روش‌های سنتی استخراج مطرح شود. از این تکنیک برای استخراج پکتین از ضایعات و محصولات جانبی مختلف میوه‌ها استفاده شده است. برای مثال، در تحقیقی گزارش شد که فرایند استخراج سنتی در ۳۰ دقیقه منجر به تولید ۵/۴ درصدی پکتین از پوست انبه شد، در حالی که استفاده از روش فراصوت سبب تولید ۸/۱ درصدی پکتین آن هم در مدت ۱۰ دقیقه شده است (Guandalini *et al.*, 2019). (Abou-Elseoud *et al.*, 2021) از پیش‌تیمار فراصوت قبل از استخراج آنزیمی استفاده کردند که نتایج نشان داد که پیش‌تیمار به وسیله این ارتعاشات به طور معنی‌داری سبب افزایش راندمان تولید پکتین از تفاله چغندر قند می‌شود. شدت امواج فراصوت نقش کلیدی در فرایند استخراج ایفا می‌کند. امواج با شدت بالاتر، عملکرد بهتری در تخریب سلول‌های گیاهی دارند و در نتیجه بازده استخراج پکتین را افزایش می‌دهند. مکانیزم این عملکرد به ایجاد فروریختگی شدیدتر حباب‌های کاویتاسیون در شدت‌های بالاتر مربوط می‌شود (Wang *et al.*, 2015). با این حال، برخی گزارش‌ها نیز به کاهش فعالیت کاویتاسیون در اثر تشکیل بیش از حد حباب‌ها اشاره کرده‌اند که می‌تواند اثر معکوس داشته و بازده را کاهش دهد (Xu *et al.*, 2014). به طور کلی، مکانیسم UAE با به حداکثر رساندن انتقال جرم، کاویتاسیون و تخریب سلولی، بازده و کارایی استخراج را بهبود می‌بخشد. این مکانیسم را می‌توان بدین شکل خلاصه نمود (Haque *et al.*, 2025):

- (۱) هنگامی که امواج فراصوت از مایع عبور می‌کنند، چرخه‌های متناوب فشار بالا و پایین ایجاد می‌کنند. در فاز کم‌فشار مایع، حباب‌های کوچکی پر از بخار تشکیل می‌شوند که این حباب‌ها در فاز فشار بالا ترکیده و امواج ضربه‌ای ناشی از آن منجر به تخریب دیواره‌های سلولی و بافت‌ها می‌شود. (۲) انرژی تولید شده در طول کاویتاسیون باعث پارگی دیواره سلول‌های گیاهی شده که این به حلال اجازه می‌دهد وارد شده و مواد مورد نیاز را حل کند. هنگامی که دیواره سلولی تجزیه می‌شود، حلال راحت‌تر به ماده نفوذ کرده و تماس و تعامل آن با ترکیب هدف بیشتر می‌شود. علاوه بر این، حرکت مکانیکی می‌تواند سبب کاهش ویسکوزیته حلال شده و استخراج را آسان‌تر کند. (۳) اگرچه UAE معمولاً در دماهای ملایم برای حفظ ترکیبات حساس انجام می‌شود، اما این روش می‌تواند با گرمایش موضعی سبب افزایش حلالیت برخی ترکیبات شود. نوع ماده استخراج شده، و فرکانس، قدرت و مدت زمان فراصوت همگی می‌توانند بر عملکرد UAE تاثیر بگذارند. نکته مهمی که باید در نظر داشت این است که شدت و توان امواج اولتراسوند دو پارامتر متفاوت هستند. شدت به‌عنوان مقدار توان توزیع‌شده در هر سانتی‌متر مربع از

سطح فرستنده تعریف می‌شود و با واحد وات بر سانتی‌متر مربع گزارش می‌گردد. در حالی که چگالی توان اولتراسونیک عبارت است از مقدار توان توزیع شده در هر میلی‌لیتر از محلول مورد نظر و با واحد وات بر لیتر بیان می‌شود. به هر حال، برای دستیابی به بهترین نتایج، بهینه‌سازی هر دو پارامتر ضروری است (Sivakumar and Pandit, 2001). یکی از زیر مجموعه‌های جذاب روش فراصوت، استخراج به کمک فراصوت پالسی (Pulsed ultrasound-assisted extraction یا PUAE) (شکل ۳) است که بعنوان روشی پیشرفته، از پالس‌های متناوب فراصوتی برای جداسازی پکتین از مواد گیاهی استفاده می‌کند. این تکنیک با بهره‌گیری از امواج فراصوت، بازده استخراج را به حداکثر رسانده و از تخریب ناشی از حرارت جلوگیری می‌نماید. مکانیسم این روش را می‌توان بدین شرح توضیح داد (Mehta *et al.*, 2022; Wani and Uppaluri, 2023): (۱) در PUAE از پالس‌های کوتاه انرژی فراصوتی به صورت متناوب استفاده می‌شود که بین دوره‌های فعال و استراحت در گردش است. این روش پالسی امکان ایجاد دوره‌های خنک‌کننده را فراهم می‌آورد که به تنظیم دما کمک کرده و خطر آسیب حرارتی به مولکول‌های حساس را کاهش می‌دهد. (۲) پدیده کواپتاسیون در طول پالس‌های فراصوتی باعث انبساط و ترکیدن حباب‌های ریز می‌شود. این فرآیند دیواره سلولی مواد گیاهی را تخریب کرده و رهاسازی پکتین را تسهیل می‌نماید. (۳) با استفاده از تابش فراصوتی و اعمال پالسی، نفوذ حلال به ماتریکس گیاهی بهبود یافته و استخراج پکتین با کارایی بیشتری انجام می‌پذیرد. (۴) این تکنیک با اعمال پالسی امواج فراصوت، از افزایش بیش از حد دما جلوگیری می‌کند که برای حفظ یکپارچگی پکتین و سایر ترکیبات حساس فعال زیستی بسیار حائز اهمیت است.

استخراج به کمک آنزیم

فرآیند استخراج به کمک آنزیم (Enzyme-assisted extraction یا EAE) (شکل ۳) در سال‌های اخیر به دلیل سازگاری با محیط زیست، گزینش پذیری بالا و ویژگی هدف‌مندی آن، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، از آنزیم‌هایی استفاده می‌شود که دیواره سلولی گیاهان را تجزیه کرده و با تسهیل آزادسازی پکتین، زمان استخراج را کاهش می‌دهند (Yang *et al.*, 2018). برای استخراج پکتین از آنزیم‌های مختلفی شامل پروتوپکتینازها، سلولازها، پروتئازها، همی‌سلولازها و زایلانازها استفاده می‌شود که هرکدام سازوکار خاص خود را دارند. به طور کلی، مکانیسم عمل آنزیم برای استخراج بدین شکل است که: (۱) نوع منبع و ماده هدف در انتخاب آنزیم بسیار موثر است و انتخاب‌های نادرست ممکن است به شکل معنی‌داری سبب کاهش راندمان تولید شود. (۲) منبع انتخابی تحت شرایط خاصی از pH، دما و زمان با آنزیم‌های انتخابی تیمار می‌شود تا بیشینه فعالیت آنزیم‌ها حاصل شود. (۳) آنزیم‌ها پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی را هیدرولیز می‌کنند و این امر باعث نفوذ بهتر حلال‌ها و استخراج مؤثر ترکیبات موردنظر می‌گردد. در مطالعه‌ای، تاثیر غلظت‌های مختلف آنزیم Celluclast 1.5 L بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پکتین کیوی بررسی شد و نتایج نشان داد که بیشترین بازده زمانی حاصل شد که از غلظت ۱/۰۵ میلی‌لیتر بر کیلوگرم استفاده شد (Yuliarti *et al.*, 2012). در مطالعه دیگر، راندمان استخراج

۶۵/۹ میلی‌گرم پکتین در ۱۰۰ میلی‌گرم ماده اولیه بوسیله آنزیم Viscozyme® L (محصول شرکت Novozymes) گزارش گردید (Sabater *et al.*, 2021). یکی از مزایای چشمگیر این روش، امکان انجام استخراج در دماهای پایین است که منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود. همچنین، این فرآیند نیاز به استفاده از مواد شیمیایی مضر و خورنده مانند اسیدها ندارد و در عین حال، ویژگی اختصاصی بودن آن باعث افزایش بازده و بهبود کیفیت محصول نهایی می‌شود (Marić *et al.*, 2018). با این حال، کارایی این روش به شدت وابسته به شرایط خاص دما و pH است که باید به‌دقت کنترل شوند تا عملکرد بهینه آنزیم‌ها حفظ گردد. برای ثابت نگه‌داشتن pH در حین استخراج، از محلول‌های بافر استفاده می‌شود. از سوی دیگر، هزینه بالای آنزیم‌ها همچنان یکی از محدودیت‌های اصلی این روش به شمار می‌رود. یکی دیگر از چالش‌های مهم، وجود ترکیبات ثانویه مانند ترکیبات فنولی، فلاونوئیدها و آلکالوئیدها در مواد گیاهی است که ممکن است با آنزیم‌ها تداخل کرده و فعالیت آن‌ها را در فرآیند استخراج پکتین کاهش دهند (Ximenes *et al.*, 2011).

استخراج به کمک میدان الکتریکی پالسی و میدان الکتریکی متوسط

استخراج به کمک میدان‌های الکتریکی یکی از روش‌های نوین و غیرحرارتی در فناوری‌های فرآوری مواد غذایی و دارویی به شمار می‌آید که در استخراج ترکیبات زیست‌فعال از ماتریس‌های گیاهی نقش قابل توجهی دارد (شکل ۳). دو روش برجسته در این حوزه شامل میدان الکتریکی پالسی (Pulsed Electric Field یا PEF) و میدان الکتریکی متوسط (Moderate Electric Field یا MEF) می‌باشند. هر دو روش از اثرات برهم‌کنشی میدان الکتریکی با ساختارهای سلولی بهره می‌برند، اما در شدت میدان، ماهیت اعمال پالس و اثرات سلولی تفاوت‌هایی اساسی دارند (Basak and Annapure, 2022). در روش PEF، نمونه‌های زیستی (مانند بافت‌های گیاهی) در معرض پالس‌های کوتاه‌مدت (μs تا ms) و با شدت بالا (بین ۱۰ تا ۸۰ کیلوولت بر سانتی‌متر) از میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. پالس‌های میدان الکتریکی به صورت تک‌قطبی یا دوقطبی اعمال می‌شوند و منجر به ایجاد پدیده‌ای به نام الکتروپوراسیون (Electroporation) در غشاهای سلولی می‌گردند. الکتروپوراسیون به دو صورت ممکن است رخ دهد: (الف) الکتروپوراسیون برگشت‌پذیر (Reversible): در شدت‌های پایین‌تر، که منجر به ایجاد منافذ موقتی در غشای سلولی شده و غشا پس از مدتی به حالت اولیه بازمی‌گردد. (ب) الکتروپوراسیون برگشت‌ناپذیر (Irreversible): در شدت‌های بالاتر، منافذ غشایی به حدی گسترش می‌یابند که موجب لیز سلولی و آزادسازی کامل محتویات سلول می‌شود. این منافذ موجب افزایش نفوذپذیری غشای سلولی به حلال‌ها و در نتیجه تسهیل خروج ترکیبات درون سلولی مانند ترکیبات فنولی، فلاونوئیدها، پکتین‌ها و روغن‌های فرار به محیط بیرونی می‌گردند. همچنین، افزایش تخلخل دیواره سلولی موجب افزایش انتقال جرم بین ماتریس گیاهی و حلال می‌شود، که در نهایت موجب بهبود بازده و سرعت استخراج می‌گردد. کارایی PEF به عواملی چون شدت میدان الکتریکی، مدت و تعداد پالس‌ها، رسانایی الکتریکی نمونه و ویژگی‌های ساختاری بافت بستگی دارد (Luo *et al.*, 2010; Ma and Wang, 2013). در مقابل، روش MEF از میدان‌های الکتریکی پیوسته یا

شبه پیوسته با شدت متوسط (در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ کیلوولت بر سانتی‌متر) و با اعمال ولتاژ به صورت سینوسی یا مربعی استفاده می‌کند. برخلاف PEF، در این روش الکتروپوراسیون در مقیاس شدید رخ نمی‌دهد، بلکه تمرکز اصلی بر افزایش حرکت یونی و دی‌پل‌ها در محیط سلولی است که موجب بهبود انتقال جرم و در برخی موارد تخریب تدریجی دیواره سلولی می‌شود. بر اثر اعمال MEF، نیروهای الکتروموتیو باعث تسهیل جابجایی مولکول‌های باردار و قطبی (مانند یون‌ها، اسیدهای فنولی، و سایر متابولیت‌ها) درون سلول و بین سلول و محیط اطراف می‌شوند. این حرکت یونی علاوه بر بهبود حل‌شدگی ترکیبات هدف، می‌تواند موجب آسیب ساختاری تدریجی به دیواره سلولی شود، به ویژه در فرآیندهای بلندمدت. MEF معمولاً در دماهای نسبتاً پایین و بدون نیاز به فشارهای بالا انجام می‌شود و به همین دلیل، گزینه‌ای مناسب برای استخراج ترکیبات حساس به حرارت محسوب می‌شود. علاوه بر این، به دلیل شدت کمتر میدان، مصرف انرژی آن نسبت به PEF پایین‌تر است (Abou-Shady, 2018; El-Araby, 2025; Gavahian *et al.*, 2018).

استخراج به کمک آب زیر بحرانی

آب زیر دمای بحرانی عامل اصلی استخراج در روش استخراج به کمک آب زیر بحرانی (Subcritical Water Extraction) یا SWE (شکل ۴) است. آب زیر بحرانی به آب داغی گفته می‌شود که دمای آن در بازه‌ای میان نقطه جوش در فشار یک اتمسفر (۱۰۰ درجه سلسیوس) تا نقطه بحرانی (۳۷۴ درجه سلسیوس) قرار دارد، اما به واسطه اعمال فشار کافی، همچنان در حالت مایع باقی می‌ماند. این ویژگی، آب زیر بحرانی را به محیط واکنش منحصربه‌فردی برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال تبدیل کرده است. در سال‌های اخیر، استفاده از این نوع آب به عنوان حلال سبز در فرآیند استخراج پکتین از منابع گیاهی، به‌ویژه ضایعات کشاورزی مانند پوست مرکبات، افزایش یافته است (Zoghi *et al.*, 2023). مزیت عمده این روش در مقایسه با استخراج‌های سنتی مبتنی بر اسیدهای معدنی (مانند اسید کلریدریک یا اسید نیتریک)، سازگاری بالاتر با محیط زیست، حذف نیاز به حلال‌های آلی یا اسیدهای خورنده، و کاهش خطرات ایمنی در فرآیند صنعتی است. در شرایط زیر بحرانی، ساختار مولکولی آب دچار تغییراتی قابل توجه می‌شود. کاهش پیوندهای هیدروژنی میان مولکول‌های آب در دماهای بالا، منجر به کاهش قطبیت آن می‌گردد. این ویژگی سبب می‌شود که آب زیر بحرانی رفتاری مشابه حلال‌های آلی با قطبیت پایین از خود نشان دهد و قابلیت انحلال ترکیباتی با طیف وسیعی از قطبیت، از جمله ترکیبات نسبتاً غیرقطبی، را به دست آورد. از سوی دیگر، در دماهای بالاتر از ۲۷۰ درجه سلسیوس، ثابت یونش آب (Kw) به شدت افزایش می‌یابد، که این امر منجر به تولید بیشتر یون‌های هیدروژن و هیدروکسید در محیط می‌شود. حضور این یون‌ها به‌عنوان کاتالیزورهای درون‌زای اسیدی و بازی، می‌تواند فرآیندهای هیدرولیز مانند تخریب دیواره سلولی و آزادسازی پلی‌ساکاریدهایی چون پکتین را تسهیل کند (Mao *et al.*, 2019). یکی دیگر از مزایای کلیدی استفاده از آب زیر بحرانی، سادگی و اقتصادی بودن تجهیزات مورد نیاز آن نسبت به روش‌های استخراج کمکی مانند اولتراسونیک یا میکروویو است. این روش نه تنها به تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت نیاز ندارد،

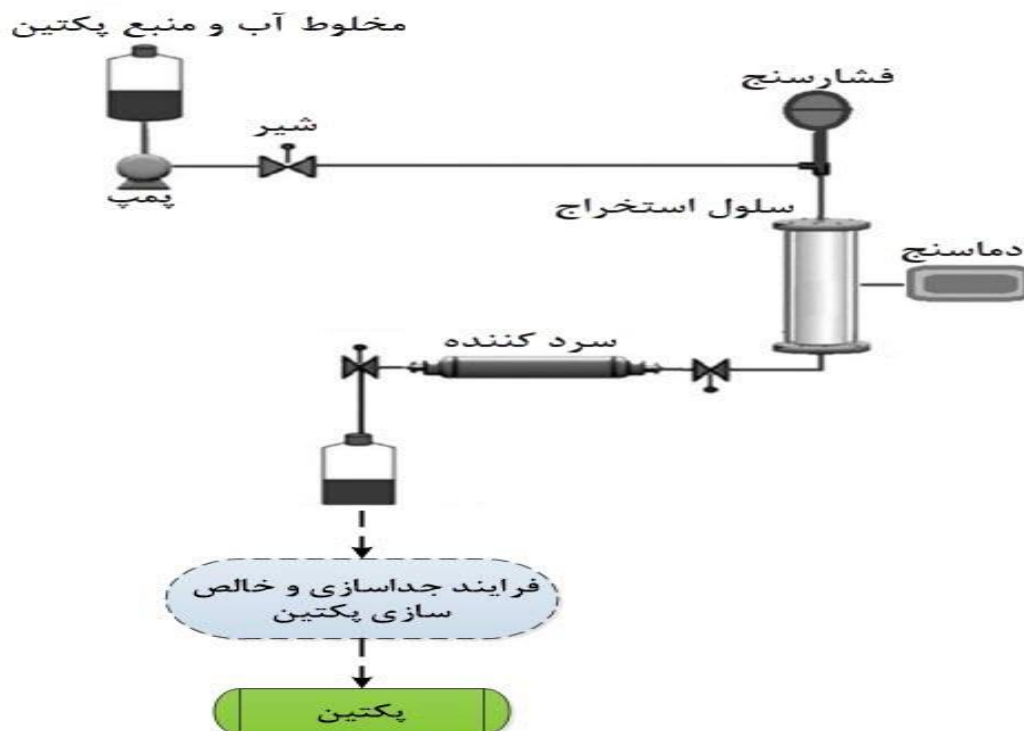
بلکه مصرف انرژی پایین‌تری نیز دارد، که از دیدگاه صنعتی و اقتصادی، مزیت محسوسی برای تولید پکتین در مقیاس بزرگ به شمار می‌رود (Nova et al., 2019). با این حال، دمای بالای به‌کار رفته در این فرآیند می‌تواند چالش‌هایی نیز ایجاد کند. برخی ترکیبات زیست‌فعال و حساس به حرارت، مانند آنزیم‌ها یا ساختارهای پیچیده پلی‌ساکاریدی، ممکن است در معرض تخریب گرمایی قرار گیرند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پکتین استخراج‌شده با این روش، به‌ویژه از پوست مرکبات، دارای وزن مولکولی کمتری نسبت به پکتین‌های حاصل از روش‌های معمول است. این کاهش وزن مولکولی ممکن است بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی پکتین اثر بگذارد (Chen et al., 2020). با این حال، از منظر ترکیب شیمیایی، میزان اسید گالاکتورونیک که نشانگر خلوص پکتین است، در نمونه‌های استخراج‌شده با آب زیر بحرانی بیشتر گزارش شده است. همچنین، بررسی‌های بیولوژیکی حاکی از آن است که این پکتین‌ها دارای فعالیت‌های زیستی و عملکردی بالاتری، از جمله خاصیت آنتی‌اکسیدانی، هستند. این یافته‌ها پتانسیل بالای این روش را برای تولید پکتین‌های عملکردی جهت کاربرد در صنایع غذایی، دارویی و بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر نشان می‌دهد.

استخراج به کمک گرمایش اهمی

استخراج به کمک گرمایش اهمی (Ohmic Heating-Assisted Extraction یا OHAE) یکی از فناوری‌های نوین و پیشرفته در حوزه استخراج ترکیبات زیست‌فعال، از جمله پکتین، از منابع گیاهی است. این روش بر پایه پدیده مقاومت الکتریکی درون بافت گیاه عمل می‌کند، به طوری که با عبور جریان الکتریکی از میان نمونه، گرما به صورت درجا (in situ) و یکنواخت در سراسر ماتریس گیاهی تولید می‌شود. این نوع گرمایش باعث شکسته شدن دیواره‌های سلولی و آزادسازی آسان‌تر مواد داخل سلول مانند پکتین می‌شود. از سوی دیگر، این فرآیند موجب افزایش حلالیت ترکیبات زیست‌فعال و تسهیل فرآیند استخراج آن‌ها می‌گردد (Talha et al., 2024). یکی از مزایای برجسته OHAE، گرمایش یکنواخت و سریع است که از بروز نقاط داغ (Hot Spots) جلوگیری کرده و در نتیجه تخریب حرارتی پکتین به حداقل می‌رسد. این ویژگی نه تنها باعث حفظ کیفیت ساختاری و شیمیایی پکتین استخراج‌شده می‌شود، بلکه در کاهش مصرف انرژی و زمان فرآیند نیز نقش مؤثری دارد. به همین دلیل، این روش به عنوان گزینه‌ای کارآمد و پایدار برای کاربردهای صنعتی در حوزه صنایع غذایی و دارویی مطرح شده است. با این حال، اجرای صنعتی این فناوری با چالش‌هایی همراه است. هزینه بالای تجهیزات تخصصی یکی از موانع اصلی در مسیر توسعه و استفاده گسترده این روش، به‌ویژه برای واحدهای تولیدی کوچک یا متوسط محسوب می‌شود. از سوی دیگر، تنظیم دقیق پارامترهای الکتریکی نظیر ولتاژ، شدت جریان و زمان اعمال جریان برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد و تخریب ساختار پکتین ضروری است. علاوه بر این، مقیاس‌پذیری فرآیند به سطح صنعتی به دلیل نیاز به کنترل دقیق دما و توزیع یکنواخت گرما در حجم‌های زیاد، نیازمند طراحی‌های مهندسی پیچیده و پیشرفته می‌باشد (Sarkis et al., 2013). با وجود

این محدودیت‌ها، مطالعات اخیر نشان‌دهنده پتانسیل بالای این روش در کاربردهای عملی هستند. به‌عنوان نمونه، گواهیان و چو توانستند با موفقیت از فناوری OHAE برای افزایش ارزش افزوده هسته آناناس استفاده کنند، Gavahian and Chu (2022). همچنین، در مطالعه‌ای توسط شریفی و همکاران، شرایط بهینه‌ای برای استخراج پکتین از پوست انار با استفاده از گرمایش اهمی تعیین شد. در این پژوهش، بازده استخراج پکتین ۸/۱۶ درصد و محتوای گالاکتورونیک اسید ۸۲/۸۶ درصد گزارش شد (Sharifi *et al.*, 2022). به‌طور کلی، استخراج به کمک گرمایش اهمی را می‌توان روشی نویدبخش با بازده بالا، کیفیت مناسب و سازگار با محیط‌زیست دانست که با

بهینه‌سازی بیشتر می‌تواند جایگاه قابل توجهی در صنایع فرآوری مواد غذایی و دارویی پیدا کند.



شکل ۴- فرایند استخراج پکتین به کمک آب زیر بحرانی. فرایند جداسازی و خالص سازی مطابق شکل ۱ می‌باشد.

Figure 4. Pectin extraction process by subcritical water. The separation and purification process is as shown in Figure 1.

استخراج به کمک فرآیند فشار بالا

استخراج به کمک فرآیند فشار بالا (High-Pressure Processing Extraction یا HPPE) یک روش نوین و غیرحرارتی برای استخراج پکتین است که با تمرکز بر فشار به جای دما، امکان انجام فرآیند در دماهای پایین را فراهم می‌کند و در نتیجه ساختار حساس به حرارت پکتین حفظ می‌شود. در این فناوری، از فشارهای بالا در بازه ۱۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال برای تخریب دیواره‌های سلولی گیاه و تسهیل آزادسازی پکتین استفاده می‌شود. برخلاف روش‌های حرارتی سنتی، HPPE اجازه می‌دهد

استخراج در شرایط دمایی ملایم انجام شود که این امر موجب حفظ کیفیت، خلوص و ساختار مولکولی پکتین شده و آن را برای کاربردهای غذایی، به‌ویژه محصولات حساس به حرارت، بسیار مناسب می‌سازد (Pinkowska *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2017). از مزایای این روش می‌توان به افزایش بازده استخراج، کاهش زمان فرآیند، و کاهش یا حذف نیاز به استفاده از حلال‌های شیمیایی اشاره کرد. با این حال، استفاده از این فناوری در مقیاس صنعتی با چالش‌هایی همچون هزینه بالای تجهیزات، نیاز به اپراتورهای متخصص برای تنظیم دقیق شرایط فشار، و پیچیدگی در حفظ یکنواختی فشار در حجم‌های بزرگ همراه است (Huang *et al.*, 2017). در مجموع، HPPE به عنوان روشی پیشرفته و کارآمد برای تولید پکتین با کیفیت بالا مطرح است، اما اجرای گسترده آن نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه و زیرساخت‌های فنی پیشرفته می‌باشد.

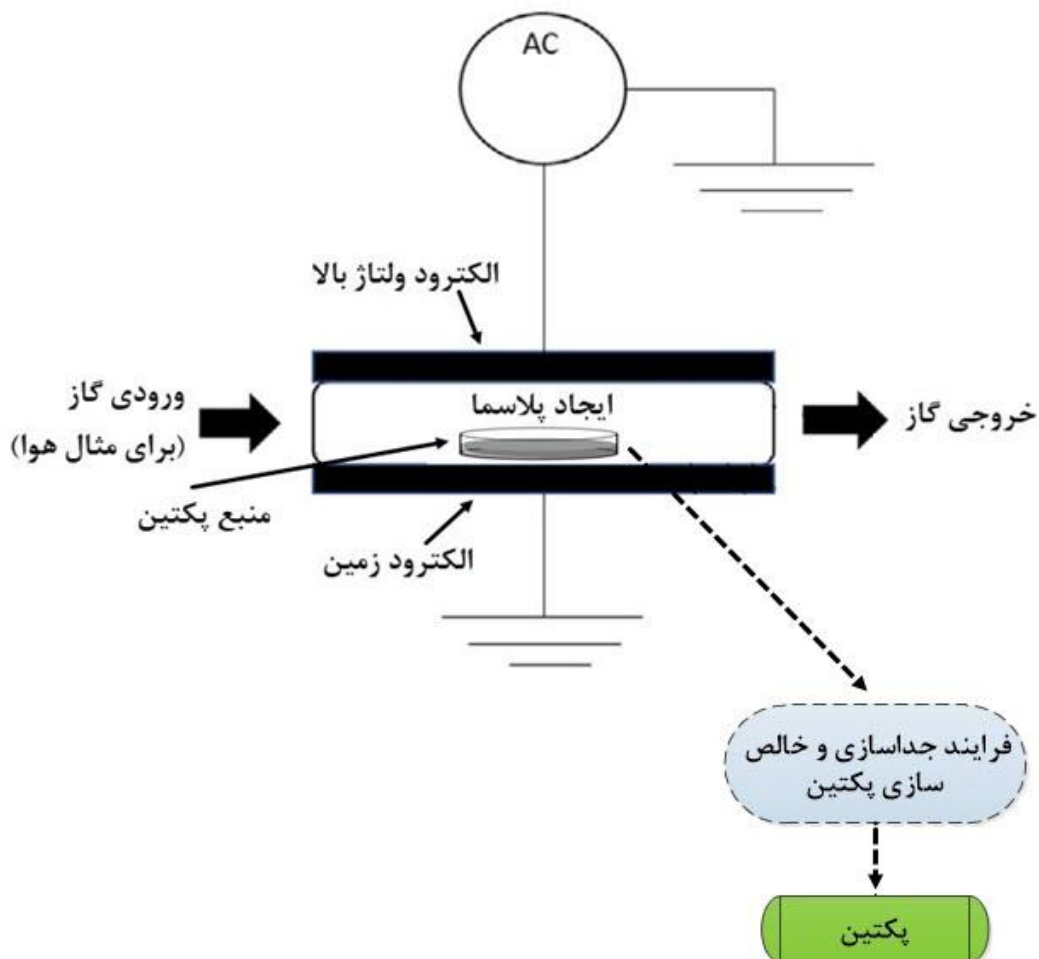
استخراج به کمک تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک

استخراج به کمک تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک (Dielectric Barrier Discharge Extraction یا DBDE) یکی از فناوری‌های نوین استخراج غیرحرارتی محسوب می‌شود که با بهره‌گیری از فناوری پلاسما و بدون استفاده از حلال، امکان استخراج پکتین به صورت سازگار با محیط زیست و از نظر انرژی مقرون‌به‌صرفه را فراهم می‌سازد (شکل ۵). در این روش، پلاسما از طریق اعمال ولتاژ بالا بین الکترودها و استفاده از مواع دی‌الکتریک تولید می‌شود و گونه‌های واکنشی فعال (Reactive Species) حاصل از آن موجب تخریب ساختار دیواره سلولی گیاه و تسهیل آزادسازی پکتین می‌گردند. DBDE در فشار اتمسفریک و بدون نیاز به گرمایش یا حلال‌های شیمیایی عمل می‌کند، که همین ویژگی‌ها آن را به گزینه‌ای سبز، ایمن و مناسب برای حفظ ترکیبات زیست‌فعال حساس به حرارت تبدیل کرده است (Misra *et al.*, 2014; Forouhar *et al.*, 2024). این روش با تسریع در فرایند تخریب دیواره سلولی موجب افزایش بازده استخراج و کاهش زمان فرآوری می‌شود، اما با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی فنی تجهیزات پلاسما، هزینه بالا، و نیاز به کنترل دقیق پارامترهایی مانند نوع و غلظت گونه‌های فعال مواجه است، چرا که عدم کنترل صحیح می‌تواند به تخریب ساختار پکتین منجر شود. همچنین، مقیاس‌پذیری صنعتی DBDE به دلیل نیاز به تجهیزات تخصصی و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، همچنان دشوار باقی مانده است. این فناوری بیشتر برای اصلاح ساختار پکتین استخراج‌شده یا پیش‌تیمار مواد خام قبل از استخراج اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ای جدید، Forouhar *et al.* (2024) از تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک با ولتاژ بالا برای استخراج پکتین از پوست هندوانه استفاده کردند که نتایج نشان داد بازده استخراج به ۱۸/۵ درصد رسید و پکتین به‌دست‌آمده دارای محتوای بالای اسید گالاکتورونیک (در حدود ۷۹ تا ۸۰ درصد) بود.

مقایسه روش‌های استخراج

همانطور که بیان شد به منظور استخراج پکتین روش‌های گوناگونی اعم از روش‌های سنتی و روش‌های مدرن به کار گرفته می‌شوند که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. روش‌های سنتی معمولاً ساده، کم‌هزینه و قابل اجرا در مقیاس

صنعتی‌اند اما ممکن است زمان‌بر باشند و موجب تخریب ترکیبات حساس شوند، در حالی که روش‌های نوین با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، بازده استخراج را افزایش داده، مصرف انرژی و زمان را کاهش می‌دهند و ساختار ماده را بهتر حفظ می‌کنند، اما نیازمند تجهیزات تخصصی، سرمایه‌گذاری اولیه بالا و دانش فنی دقیق‌اند. از این رو، انتخاب روش بهینه استخراج به مجموعه‌ای از عوامل وابسته است، از جمله ویژگی‌های ماده خام (نوع منبع گیاهی، بافت سلولی، میزان رطوبت)، خصوصیات ترکیب هدف (مانند حساسیت به حرارت یا نیاز به خلوص بالا)، هدف نهایی کاربرد (در صنایع غذایی، دارویی یا صنعتی)، محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی (هزینه، مصرف انرژی، تولید پسماند)، و زیرساخت‌ها و امکانات فنی موجود؛ بنابراین، انتخاب روش مناسب باید بر پایه ارزیابی جامع شرایط فرآیند و نیاز نهایی صورت گیرد تا ضمن دستیابی به محصولی با کیفیت مطلوب، بهره‌وری، پایداری و صرفه اقتصادی نیز تامین گردد. در جدول ۲ که برگرفته از گزارش Haque *et al.* (2025) با تغییرات می‌باشد، مزایا و معایب روش‌های مختلف استخراج پکتین مقایسه شده است.



شکل ۵- فرایند استخراج پکتین به کمک تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک. فرایند جداسازی و خالص‌سازی مطابق شکل ۱ می‌باشد.

Figure 5. Pectin extraction process by dielectric barrier discharge. The separation and purification process is as shown in Figure 1.

جدول ۲: مقایسه روش‌های مختلف استخراج پکتین.

Table 2: Comparison of different pectin extraction methods.

روش استخراج Extraction method	مزایا Advantages	معایب Disadvantages
اسید Acid	ساده و کم‌هزینه است. Simple and cost-effective. مناسب برای حفظ یکپارچگی پکتین در برخی موارد. Suitable for maintaining pectin integrity in some cases. قابل اجرا بر روی مواد اولیه متنوع. Applicable to various raw materials.	ممکن است باعث هیدرولیز بیش از حد پکتین شود. May cause excessive hydrolysis of pectin. زمان استخراج طولانی‌تر. Longer extraction time. بازده پایین‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر. Lower yield compared to other methods.
قلیا Alkaline	افزایش بازده استخراج پکتین. Increased pectin extraction yield. بهبود کیفیت و عملکرد پکتین. Improved quality and functionality of pectin. کاهش زمان استخراج نسبت به روش اسیدی. Reduced extraction time compared to acidic method.	ممکن است باعث تخریب ساختار پکتین شود. May cause degradation of pectin structure. نیاز به کنترل دقیق pH Requires precise pH control. امکان تولید ترکیبات ناخواسته در فرآیند. Possibility of producing unwanted compounds during the process.
آب Water	عدم نیاز به مواد شیمیایی مضر. No need for harmful chemicals. سازگار با محیط زیست و ایمن‌تر. Environmentally friendly and safer. مناسب برای محصولات غذایی ارگانیک. Suitable for organic food products.	بازده کمتر نسبت به روش‌های اسیدی یا قلیایی. Lower yield compared to acidic or alkaline methods. نیاز به زمان استخراج طولانی‌تر. Requires longer extraction time. احتمال استخراج ناکامل پکتین از مواد اولیه. Possibility of incomplete pectin extraction from raw materials.
مایکروویو Microwave	MAE باعث افزایش آزادسازی و حل‌الیت ترکیبات زیست‌فعال می‌شود که منجر به افزایش بازده می‌گردد. MAE increases the release and solubility of bioactive compounds, resulting in increased yields. این روش با محافظت از مواد حساس در برابر نور و حرارت، یکپارچگی آن‌ها را حفظ می‌کند. It maintains the integrity of fragile materials by shielding them from light and heat. آلودگی‌های موجود در هوا را حذف می‌کند. Removes airborne contaminants. نیاز به آموزش بسیار کمی دارد. It needs very little training. از دست رفتن ترکیبات فرار جلوگیری می‌کند. Prevents the loss of volatile chemicals. هزینه‌های سرمایه‌گذاری بسیار کمی دارد. Minimal costs for investments.	عوامل مختلفی مانند نوع حلال، زمان و توان مایکروویو باید به دقت کنترل شوند تا بهترین نتایج حاصل شود. Factors such as solvent type, time, and microwave power must be carefully controlled to achieve the optimum results. برخی ترکیبات ممکن است تحت شرایط مایکروویو تجزیه شوند و همه مواد ممکن است به خوبی به استخراج مایکروویو پاسخ ندهند. Certain compounds may degrade under microwave conditions, and not all materials may respond well to microwave extraction. برای انجام عملیات‌های حساس، کارکنان آموزش دیده برای به‌کارگیری صحیح و استفاده از تجهیزات لازم هستند. Trained staff are required to correctly operate and utilize the equipment for the most demanding operations.
اولتراسوند Ultrasound	زمان‌های فرآیند کاهش می‌یابند زیرا روش‌های استخراج با اولتراسوند (UAE) نسبت به روش‌های سنتی کارآمدتر هستند. Processing times are reduced since UAE extraction methods are more efficient than traditional methods. بازده استخراج ترکیبات زیست‌فعال می‌تواند با نفوذ بهتر حلال در روش UAE افزایش یابد. The yields of extracting bioactive components can be increased by UAE's improved solvent penetration. روش UAE از نظر هزینه مقرون به صرفه‌تر و برای محیط زیست سودمندتر است زیرا حلال کمتری استفاده می‌کند. UAE is more cost-effective and advantageous for the environment as it uses less solvent. روش UAE با کاهش فرار گرفتن در معرض حرارت، خلوص مواد شیمیایی حساس را حفظ می‌کند. The UAE approach preserves the purity of delicate chemicals by minimizing heat exposure. اثر بخشی روش UAE می‌تواند در مقیاس صنعتی نیز حفظ شود. The UAE's efficacy could be preserved when scaled up for industrial use.	در ابتدا، خرید تجهیزات اولتراسونیک ممکن است گران باشد و تنظیم پارامترهایی مانند فرکانس، توان و مدت زمان برای رسیدن به نتایج مطلوب ممکن است چالش برانگیز باشد. Initially, purchasing ultrasonic equipment might be expensive, and adjusting parameters like frequency, power, and duration to achieve the required results could be challenging. مواد حساس ممکن است هنگام فرار گرفتن در معرض اولتراسونیک با شدت بالا خراب شوند. Sensitive materials may degrade when exposed to high-intensity ultrasound. با وجود توانایی افزایش سرعت پردازش، سیستم اولتراسونیک ممکن است هنگام کار مصرف انرژی قابل توجهی داشته باشد. Despite its ability to speed up processing, the UAE may use significant energy when operating. ممکن است با تمام مواد یا ترکیبات سازگار نباشد و ممکن است باعث تخریب برخی از اسیدهای فنلی شود. It might not be compatible with all materials or substances. May result in the degradation of some phenolic acids.

ادامه جدول ۲: مقایسه روش‌های مختلف استخراج پکتین.

Table 2: Comparison of different pectin extraction methods.

روش استخراج Extraction method	مزایا Advantages	معایب Disadvantages
فراصوت پالسی Pulsed ultrasound	<p>در مقایسه با روش‌های استخراج سنتی، PUAE معمولاً بازده پکتین بیشتری دارد زیرا توانایی بهتری در حل کردن و آزادسازی از دیواره‌های سلولی دارد.</p> <p>When compared to traditional extraction techniques, PUAE usually delivers larger pectin yields because of its superior solubilization and release from cell walls.</p> <p>این روش به طور قابل توجهی زمان استخراج را کاهش می‌دهد و بهره‌وری فرآیند را افزایش می‌دهد.</p> <p>The method greatly cuts down on extraction time, increasing process efficiency.</p> <p>از آنجا که اولتراسونیک پالسی ملایم است، کیفیت و ویژگی‌های عملکردی پکتین حفظ می‌شود و به آن اجازه می‌دهد تا به ژل سازی و غلظت‌دهی ادامه دهد.</p> <p>Because pulsed ultrasound is mild, pectin's quality and functional qualities are preserved, allowing it to continue gelling and thickening.</p> <p>ممکن است مصرف انرژی کمتری داشته باشد زیرا تکنیک پالسی امکان تحویل کنترل شده انرژی را به جای قرارگیری بیوسسته فراهم می‌کند.</p> <p>It may be more energy-efficient because the pulsed technique permits regulated energy delivery instead of continuous exposure.</p>	<p>هزینه اولیه سنگین تجهیزات اولتراسونیک ممکن است آزمایشگاه‌ها و سازمان‌های کوچکتر را منصرف کند.</p> <p>The hefty initial cost of ultrasonic equipment may deter smaller labs and organizations.</p> <p>برای رسیدن به نتایج مطلوب با PUAE، تنظیم دقیق پارامترها (مانند نوع حلال، فرکانس و مدت زمان پالس) لازم است که ممکن است زمان بر باشد.</p> <p>To achieve ideal results with PUAE, rigorous parameter adjusting (such as solvent type, frequency, and pulse duration) is required, which can take time.</p> <p>ممکن است همه مواد یا آلودگی‌ها با PUAE حذف نشوند. برخی افراد ممکن است به اولتراسونوگرافی واکنش منفی نشان دهند.</p> <p>Not every material or contaminant may be eliminated with PUAE. Some people may respond negatively to ultrasonography.</p>
آنزیم Enzyme	<p>استفاده از آنزیم‌ها باعث شکستن دیواره سلولی بدون نیاز به شرایط خشن می‌شود، که به حفظ ترکیبات حساس کمک می‌کند.</p> <p>Enzymes break down cell walls under mild conditions, preserving heat-sensitive compounds.</p> <p>استفاده از آنزیم‌ها انتخاب‌پذیری بیشتری را در استخراج ترکیبات خاص فراهم می‌کند.</p> <p>Enzymatic extraction offers higher selectivity for targeting specific compounds.</p> <p>روش آنزیمی نسبت به روش‌های حرارتی، آسیب کمتری به ساختار مواد فعال وارد می‌کند.</p> <p>Compared to thermal methods, enzymatic extraction causes less degradation of active compounds.</p> <p>این روش اغلب به کاهش مصرف حلال‌های شیمیایی کمک می‌کند که به نفع ایمنی و محیط زیست است.</p> <p>This method often reduces chemical solvent use, benefiting both safety and the environment.</p>	<p>هزینه خرید آنزیم‌های تخصصی می‌تواند بالا باشد و هزینه نهایی استخراج را افزایش دهد.</p> <p>The cost of specialized enzymes can be high, raising overall extraction expenses.</p> <p>فعالیت آنزیم‌ها به شدت وابسته به شرایطی مانند pH و دما است، که نیاز به کنترل دقیق دارد.</p> <p>Enzyme activity is highly sensitive to factors like pH and temperature, requiring precise control.</p> <p>فرایندهای آنزیمی ممکن است زمان بر باشند و نیاز به مدت زمان طولانی‌تری نسبت به روش‌های فیزیکی داشته باشند.</p> <p>Enzymatic processes can be time-consuming and slower than physical extraction methods.</p> <p>امکان غیرفعال شدن آنزیم‌ها در شرایط نامطلوب وجود دارد، که باعث کاهش بازده می‌شود.</p> <p>Enzymes may become inactive under suboptimal conditions, leading to lower yields.</p>
میدان الکتریکی پالسی Pulsed electric field	<p>PEF می‌تواند به طور قابل توجهی بازده استخراج مواد شیمیایی را افزایش دهد و نسبت به روش‌های سنتی سریع‌تر است که منجر به پردازش کارآمدتر می‌شود.</p> <p>PEF may greatly enhance the yield of extracted chemicals and is quicker than traditional procedures, resulting in more efficient processing.</p> <p>PEF می‌تواند به حفظ یکپارچگی و خلوص مواد حساس کمک کند زیرا در دماهای پایین‌تر عمل می‌کند.</p> <p>PEF can help to protect the integrity and purity of delicate substances since it functions at lower temperatures.</p> <p>محتوای جامد خشک در طول مدت طولانی‌تر زمان «خاموش» نسبت به مطالعات کنترل افزایش یافته است.</p> <p>The dry solid content increased over the lengthier "OFF" time as compared to the control studies.</p>	<p>سرمایه‌گذاری در تجهیزات تخصصی ممکن است برای کسب‌وکارهای کوچک پرهزینه باشد.</p> <p>Investing in specialized equipment might be costly for small businesses.</p> <p>کارایی PEF برای برخی منابع گیاهی ممکن است محدود باشد زیرا همه مواد به خوبی به آن پاسخ نمی‌دهند.</p> <p>The usefulness of PEF to some plant sources may be limited since not all substances respond well to it.</p> <p>قرارگیری بیش از حد در معرض میدان‌های الکتریکی ممکن است به اجزای حساس آسیب برساند و کیفیت عصاره را کاهش دهد.</p> <p>Excessive exposure to electric fields may damage sensitive components, reducing the quality of the extract.</p>
میدان الکتریکی متوسط Moderate electric field	<p>شدت متوسط میدان الکتریکی ممکن است انرژی کمتری نسبت به تکنیک‌های با شدت بالاتر مصرف کند.</p> <p>The moderate electric field strength may use less energy than higher-intensity techniques.</p> <p>MEF می‌تواند روی مواد و ترکیبات حساس استفاده شود زیرا نسبت به PEF کمتر ساینده است.</p> <p>MEF can be used on fragile materials and chemicals since it is less abrasive than PEF.</p>	<p>در استخراج مواد شیمیایی، به ویژه آن‌هایی که دشوار به استخراج هستند، MEF ممکن است به اندازه PEF مؤثر نباشد.</p> <p>When it comes to extracting chemicals, especially those that are difficult to remove, MEF may not be as effective as PEF.</p> <p>MEF همچنان به تجهیزات خاصی نیاز دارد که ممکن است همه مراکز آن را نداشته باشند، حتی اگر پیچیدگی کمتری نسبت به PEF داشته باشد.</p> <p>MEF still needs certain equipment, which not all facilities may have, even if it is less complex than PEF.</p> <p>استفاده از MEF ممکن است محدود به ماتریس‌ها یا مواد گیاهی خاصی باشد زیرا همه مواد ممکن است به درستی با آن واکنش نشان ندهند.</p> <p>The use of MEF may be restricted to particular plant matrices or substances since not all materials may react properly with it.</p>

ادامه جدول ۲: مقایسه روش‌های مختلف استخراج پکتین.

Table 2: Comparison of different pectin extraction methods.

آب زیر بحرانی Subcritical water extraction	<p>این یک روش استخراج دوستدار محیط زیست و پایدار است زیرا SWE از آب به عنوان حلال اصلی به جای حلال‌های آلی خطرناک استفاده می‌کند.</p> <p>It is an environmentally friendly and sustainable extraction technique because SWE employs water as its main solvent instead of hazardous organic solvents.</p> <p>حلالیت و نفوذپذیری بهبود یافته این روش اغلب منجر به بازده استخراج بهتر نسبت به روش‌های سنتی می‌شود.</p> <p>The technique's improved solubility and diffusion often lead to better extraction yields than traditional approaches.</p> <p>SWE معمولاً سریع‌تر استخراج می‌کند و به این ترتیب بهره‌وری کلی فرآیند را افزایش می‌دهد.</p> <p>SWE often extracts faster, increasing processing efficiency overall.</p> <p>با تنظیم دما و فشار بر اساس خواص حلالیت، می‌توان برخی مواد را به صورت انتخابی استخراج کرد.</p> <p>Certain substances can be extracted selectively by adjusting the temperature and pressure according to their solubility properties.</p> <p>از آنجا که این روش موجب کاهش ضایعات حلال می‌شود، اقتصادی و از نظر زیست‌محیطی ایمن است.</p> <p>Because it reduces solvent waste, the method is economical and ecologically safe.</p>	<p>تجهیزات تخصصی با فشار بالا ممکن است در ابتدا هزینه‌بر باشند.</p> <p>Specialized high-pressure equipment might be costly initially.</p> <p>پارامترهای دما و فشار باید با دقت تنظیم شوند تا بهترین نتایج استخراج حاصل شود.</p> <p>The temperature and pressure parameters must be carefully adjusted to get the best extraction results.</p> <p>این روش نیازمند نظارت دقیق است و برای استخراج مواد حساس به حرارت مناسب نیست زیرا مولکول‌های حساس ممکن است در دماهای بالاتر تخریب شوند.</p> <p>This approach requires careful monitoring and is inappropriate for extracting thermo-labile chemicals since sensitive molecules may break down at higher temperatures.</p> <p>همه ترکیبات را نمی‌توان با استفاده از SWE استخراج کرد؛ برخی ممکن است به محلول حلال متفاوتی نیاز داشته باشند.</p> <p>Not all compounds can be extracted using SWE; some may need a different solvent solution.</p>
گرمايش اهمی Ohmic heating	<p>گرمايش یکنواخت باعث کاهش تخریب حرارتی می‌شود.</p> <p>Uniform heating minimizes thermal degradation.</p> <p>هزینه‌های نگهداری کمتر.</p> <p>Lower maintenance costs.</p> <p>زمان کلی فرآیند کوتاه‌تر.</p> <p>Shorter overall processing time.</p> <p>بازده استخراج بهبود یافته.</p> <p>Improved extraction yields.</p>	<p>سرمايه‌گذاري اوليه بالا است.</p> <p>The initial investment is high.</p> <p>نیاز به کنترل دقیق ولتاژ و جریان دارد.</p> <p>Need for carefully controlled voltage and current.</p> <p>مقیاس‌پذیری پیچیده است.</p> <p>Scalability is complex.</p>
فرایند فشار بالا High-pressure processing	<p>افزایش بازده استخراج.</p> <p>Increased extraction yield.</p> <p>استفاده حداقلی از حلال.</p> <p>Minimal solvent use.</p> <p>کیفیت و خلوص بهتر پکتین.</p> <p>Better quality and purity of pectin.</p>	<p>هزینه‌های بالای بهره‌برداری و نگهداری.</p> <p>High operation and maintenance costs.</p> <p>حساس به تغییرات فشار.</p> <p>Sensitive to variations in pressure.</p> <p>افزایش مقیاس سیستم دشوار است.</p> <p>Scaling up is challenging.</p>
تخلیه الکتریکی با مانع دی‌الکتریک Dielectric barrier discharge	<p>بدون حلال و دوستدار محیط زیست.</p> <p>Solvent-free and eco-friendly.</p> <p>مناسب برای حفظ یکپارچگی پکتین.</p> <p>Suitable for keeping the integrity of pectin.</p> <p>بازده و خلوص بهبود یافته.</p> <p>Improved yield and purity.</p>	<p>هزینه بالای تجهیزات.</p> <p>High equipment cost.</p> <p>نیاز به کنترل دقیق پارامترهای پلاسما.</p> <p>Need for precise control of plasma parameters.</p> <p>گسترش صنعتی دشوار است.</p> <p>Industrial scaling up is challenging.</p>

چشم‌اندازهای آینده

در چشم‌اندازهای آینده استخراج پکتین، تمرکز بر توسعه روش‌هایی است که هم‌زمان بازده بالا داشته و ساختار و خصوصیات زیستی پکتین را حفظ می‌نمایند و در مقابل مصرف انرژی و مواد شیمیایی را به حداقل می‌رسانند. انتظار می‌رود فناوری‌هایی مانند استخراج با آب زیر بحرانی به صورت گسترده‌تر در مقیاس صنعتی پیاده‌سازی شوند؛ چرا که این روش‌ها نه تنها باعث افزایش خلوص پکتین و ارتقای خواص آنتی‌اکسیدانی آن می‌شوند، بلکه نیاز به حلال‌های خورنده را نیز حذف یا کاهش می‌دهند. همچنین، ترکیب چند فناوری پیشرفته (مثلاً ترکیب فراصوت، میکروویو و آنزیم‌ها یا میدان الکتریکی پالسی) مورد توجه قرار می‌گیرد تا با هم‌افزایی اثرات استخراج، فرایندهایی سریع، کارآمد و کم‌ضرر برای محیط‌زیست پدید آیند. در این مسیر، چالش‌هایی مانند کاهش هزینه تجهیزات تخصصی، بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی در منابع گیاهی گوناگون و استانداردسازی

روش‌ها باید حل شود. با توجه به رشد نیاز به پکتین‌هایی با ویژگی‌های منحصر به فرد در صنایع غذایی، دارویی و بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر، پیش‌بینی می‌شود تحولات آتی بیش از پیش به سمت پایدارسازی، مقیاس‌پذیری و سفارشی‌سازی ساختار پکتین برای کاربردهای تخصصی سوق پیدا کند.

نتیجه گیری کلی

با توجه به اهمیت فزاینده پکتین در صنایع غذایی، دارویی و زیست‌فناورانه، انتخاب روش استخراج بهینه برای دستیابی به بازده بالا و کیفیت مطلوب، نقش کلیدی ایفا می‌کند. مرور جامع روش‌های استخراج نشان داد که روش‌های سنتی مانند استخراج اسیدی، قلیایی و آبی‌علیرغم سادگی، با محدودیت‌هایی از جمله مصرف انرژی بالا، تخریب ساختار پکتین و آثار زیست‌محیطی همراه‌اند. در مقابل، روش‌های نوین مانند استفاده از امواج مایکروویو، فراصوت، آنزیم‌ها، میدان‌های الکتریکی و آب زیر بحرانی، ضمن کاهش زمان و انرژی مصرفی، توانسته‌اند بازده استخراج را افزایش داده و ویژگی‌های عملکردی پکتین را حفظ یا حتی بهبود بخشند. با این حال، این روش‌های نوین نیز نیازمند تجهیزات پیشرفته و بهینه‌سازی دقیق شرایط استخراج هستند که ممکن است در مقیاس صنعتی چالش‌برانگیز باشد. از سوی دیگر، مشخص شد که انتخاب روش استخراج نمی‌تواند به صورت عمومی و مستقل از منبع گیاهی صورت گیرد، بلکه باید با توجه به نوع منبع، کاربرد نهایی، هزینه‌های عملیاتی و ملاحظات زیست‌محیطی اتخاذ شود. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که هیچ روش استخراجی به‌تنهایی برای همه منابع و کاربردها ایده‌آل نیست و ترکیب هوشمندانه‌ای از روش‌ها می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش کارایی و پایداری فرآیند استخراج پکتین در آینده باشد. حرکت به سوی استخراج سبز، کم‌مصرف و هدفمند می‌تواند نقش موثری در تولید صنعتی پکتین با کیفیت بالا و دوستدار محیط‌زیست ایفا کند.

منابع

- Abou-Elseoud, W. S., Hassan, E. A., & Hassan, M. L. (2021).** Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2: 100042.
- Abou-Shady, A., & El-Araby, H. (2025).** A comprehensive analysis of the advantages and disadvantages of pulsed electric fields during soil electrokinetic remediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(5): 3895-3925.
- Asgari, K., Labbafi, M., Khodaiyan, F., Kazemi, M., & Hosseini, S. S. (2020).** High-methylated pectin from walnut processing wastes as a potential resource: Ultrasound assisted extraction and physicochemical, structural and functional analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152: 1274-1282.
- Basak, S., & Annapure, U. S. (2022).** The potential of subcritical water as a “green” method for the extraction and modification of pectin: A critical review. *Food Research International*, 161: 111849.
- Calce, E., Bugatti, V., Vittoria, V., & Luca, S. D. (2012).** Solvent-free synthesis of modified pectin compounds promoted by microwave irradiation. *Molecules*, 17(10): 12234-12242.
- Chaharbaghi, E., Khodaiyan, F., & Hosseini, S. S. (2017).** Optimization of pectin extraction from pistachio green hull as a new source. *Carbohydrate polymers*, 173: 107-113.

Chen, J., Zhang, C., Xia, Q., Liu, D., Tan, X., Li, Y., & Cao, Y. (2020). Treatment with subcritical water-hydrolyzed citrus pectin ameliorated cyclophosphamide-induced immunosuppression and modulated gut microbiota composition in ICR mice. *Molecules*, 25(6): 1302.

Cho, E. H., Jung, H. T., Lee, B. H., Kim, H. S., Rhee, J. K., & Yoo, S. H. (2019). Green process development for apple-peel pectin production by organic acid extraction. *Carbohydrate polymers*, 204: 97-103.

Forouhar, A., Hamdami, N., Djelveh, G., Lecerf, D., Rihouey, C., Gardarin, C., ... & Michaud, P. (2024). Effects of high voltage dielectric barrier discharge on the extraction and properties of pectins from watermelon rinds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91: 103558.

Gavahian, M., & Chu, R. (2022). Ohmic heating extraction at different times, temperatures, voltages, and frequencies: a new energy-saving technique for pineapple core valorization. *Foods*, 11(14): 2015.

Gavahian, M., Chu, Y. H., & Sastry, S. (2018). Extraction from food and natural products by moderate electric field: Mechanisms, benefits, and potential industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4): 1040-1052.

Guandalini, B. B. V., Rodrigues, N. P., & Marczak, L. D. F. (2019). Sequential extraction of phenolics and pectin from mango peel assisted by ultrasound. *Food Research International*, 119: 455-461.

Haque, S. M., Kabir, A., Ratemi, E., Elzagheid, M., Appu, S. P., Ghani, S. S., & Sarief, A. (2025). Greener pectin extraction techniques: Applications and challenges. *Separations*, 12(3): 65.

Hosseini, S. S., Khodaiyan, F., & Yarmand, M. S. (2016a). Aqueous extraction of pectin from sour orange peel and its preliminary physicochemical properties. *International journal of biological macromolecules*, 82: 920-926.

Hosseini, S. S., Khodaiyan, F., & Yarmand, M. S. (2016b). Optimization of microwave assisted extraction of pectin from sour orange peel and its physicochemical properties. *Carbohydrate polymers*, 140: 59-65.

Hosseini, S. S., Khodaiyan, F., Kazemi, M., & Najari, Z. (2019). Optimization and characterization of pectin extracted from sour orange peel by ultrasound assisted method. *International journal of biological macromolecules*, 125: 621-629.

Hu, W., Zhao, Y., Yang, Y., Zhang, H., Ding, C., Hu, C., ... & Yuan, M. (2019). Microwave-assisted extraction, physicochemical characterization and bioactivity of polysaccharides from *Camptotheca acuminata* fruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133: 127-136.

Huang, H. W., Wu, S. J., Lu, J. K., Shyu, Y. T., & Wang, C. Y. (2017). Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food control*, 72: 1-8.

Kazemi, M., Amiri Samani, S., Ezzati, S., Khodaiyan, F., Hosseini, S. S., & Jafari, M. (2021). High-quality pectin from cantaloupe waste: Eco-friendly extraction process, optimization, characterization and bioactivity measurements. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(15): 6552-6562.

Kazemi, M., Khodaiyan, F., & Hosseini, S. S. (2019b). Eggplant peel as a high potential source of high methylated pectin: Ultrasonic extraction optimization and characterization. *LWT*, 105: 182-189.

Kazemi, M., Khodaiyan, F., Hosseini, S. S., & Najari, Z. (2019a). An integrated valorization of industrial waste of eggplant: Simultaneous recovery of pectin, phenolics and sequential production of pullulan. *Waste Management*, 100: 101-111.

Luo, W. B., Han, Z., Zeng, X. A., Yu, S. J., & Kennedy, J. F. (2010). Study on the degradation of chitosan by pulsed electric fields treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4): 587-591.

Ma, S., & Wang, Z. H. (2013). Pulsed electric field-assisted modification of pectin from sugar beet pulp. *Carbohydrate Polymers*, 92(2): 1700-1704.

Mao, G., Wu, D., Wei, C., Tao, W., Ye, X., Linhardt, R. J., ... & Chen, S. (2019). Reconsidering conventional and innovative methods for pectin extraction from fruit and vegetable waste: Targeting rhamnogalacturonan I. *Trends in Food Science & Technology*, 94: 65-78.

Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M., & Brnčić, S. R. (2018). An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction. *Trends in food science & technology*, 76: 28-37.

Mehta, N., S, J., Kumar, P., Verma, A. K., Umaraw, P., Khatkar, S. K., ... & Sazili, A. Q. (2022). Ultrasound-assisted extraction and the encapsulation of bioactive components for food applications. *Foods*, 11(19): 2973.

Misra, N. N., Keener, K. M., Bourke, P., Mosnier, J. P., & Cullen, P. J. (2014). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. *Journal of bioscience and bioengineering*, 118(2): 177-182.

Najari, Z., Khodaiyan, F., Yarmand, M. S., & Hosseini, S. S. (2022). Almond hulls waste valorization towards sustainable agricultural development: Production of pectin, phenolics, pullulan, and single cell protein. *Waste Management*, 141: 208-219.

Nova, M. V., Nothnagel, L., Thurn, M., Travassos, P. B., Herculano, L. S., Bittencourt, P. R., ... & Bruschi, M. L. (2019). Development study of pectin/Surelease® solid microparticles for the delivery of L-alanyl-L-glutamine dipeptide. *Food Hydrocolloids*, 89: 921-932.

Pasandide, B., Khodaiyan, F., Mousavi, Z. E., & Hosseini, S. S. (2017). Optimization of aqueous pectin extraction from *Citrus medica* peel. *Carbohydrate polymers*, 178: 27-33.

Pasandide, B., Khodaiyan, F., Mousavi, Z., & Hosseini, S. S. (2018). Pectin extraction from citron peel: optimization by Box-Behnken response surface design. *Food science and biotechnology*, 27(4): 997-1005.

Pico, Y. (2013). Ultrasound-assisted extraction for food and environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 43: 84-99.

Pinkowska, H., Wolak, P., Krzywonos, M., & Złocińska, A. (2021). Comprehensive study of hydrothermal extraction of pectin from sugar beet pulp. *Waste and Biomass Valorization*, 12(8): 4587-4598.

Pourramezan, H., Khodaiyan, F., & Hosseini, S. S. (2022). Extraction optimization and characterization of pectin from sesame (*Sesamum indicum* L.) capsule as a new neglected by-product. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(14): 6470-6480.

Putra, N. R., Aziz, A. H. A., Faizal, A. N. M., & Che Yunus, M. A. (2022). Methods and potential in valorization of banana peels waste by various extraction processes: In review. *Sustainability*, 14(17): 10571.

Raji, Z., Khodaiyan, F., Rezaei, K., Kiani, H., & Hosseini, S. S. (2017). Extraction optimization and physicochemical properties of pectin from melon peel. *International journal of biological macromolecules*, 98: 709-716.

Ripoll, C. S. S., & Hincapié-Llanos, G. A. (2023). Evaluation of sources and methods of pectin extraction from fruit and Vegetable wastes: A Systematic Literature Review (SLR). *Food Bioscience*, 51: 102278.

Rodsamran, P., & Sothornvit, R. (2019). Microwave heating extraction of pectin from lime peel: Characterization and properties compared with the conventional heating method. *Food chemistry*, 278: 364-372.

- Sabater, C., Blanco-Doval, A., Montilla, A., & Corzo, N. (2021).** Optimisation of an enzymatic method to obtain modified artichoke pectin and pectic oligosaccharides using artificial neural network tools. In silico and in vitro assessment of the antioxidant activity. *Food Hydrocolloids*, 110: 106161.
- Salimi, A., Khodaiyan, F., Askari, G., & Hosseini, S. S. (2024).** A zero-waste approach towards a sustainable waste management of apple: Extraction of value-added products and their application as edible coating. *Food Hydrocolloids*, 147: 109304.
- Sarkis, J. R., Jaeschke, D. P., Tessaro, I. C., & Marczak, L. D. (2013).** Effects of ohmic and conventional heating on anthocyanin degradation during the processing of blueberry pulp. *LWT-Food Science and Technology*, 51(1): 79-85.
- Sharifi, A., Hamidi-Esfahani, Z., Gavligi, H. A., & Saberian, H. (2022).** Assisted ohmic heating extraction of pectin from pomegranate peel. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 172: 108760.
- Sivakumar, M., & Pandit, A. B. (2001).** Ultrasound enhanced degradation of Rhodamine B: optimization with power density. *Ultrasonics Sonochemistry*, 8(3): 233-240.
- Talha, M., Khalid, S., Maan, A. A., Tanveer, N., Khan, M. K. I., Asif, M., ... & Sarwar, A. (2024).** Ohmic assisted extraction: a sustainable and environment friendly approach to substitute conventional extraction methods. *Food Reviews International*, 40(10): 3508-3529.
- Wang, W., Ma, X., Xu, Y., Cao, Y., Jiang, Z., Ding, T., ... & Liu, D. (2015).** Ultrasound-assisted heating extraction of pectin from grapefruit peel: Optimization and comparison with the conventional method. *Food chemistry*, 178: 106-114.
- Wani, K. M., & Uppaluri, R. V. (2023).** Characterization of pectin extracted from pomelo peel using pulsed ultrasound assisted extraction and acidic hot water extraction process. *Applied Food Research*, 3(2): 100345.
- Woo, K. K., Chong, Y. Y., Li Hiong, S. K., & Tang, P. Y. (2010).** Pectin extraction and characterization from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*): A preliminary study. *Journal of Biological Sciences*, 10(7): 631-636.
- Ximenes, E., Kim, Y., Mosier, N., Dien, B., & Ladisch, M. (2011).** Deactivation of cellulases by phenols. *Enzyme and microbial technology*, 48(1): 54-60.
- Xu, Y., Zhang, L., Bailina, Y., Ge, Z., Ding, T., Ye, X., & Liu, D. (2014).** Effects of ultrasound and/or heating on the extraction of pectin from grapefruit peel. *Journal of Food Engineering*, 126: 72-81.
- Yang, Y., Wang, Z., Hu, D., Xiao, K., & Wu, J. Y. (2018).** Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process. *Food Hydrocolloids*, 79: 189-196.
- Yuliarti, O., Matia-Merino, L., Goh, K. T., Mawson, J., & Brennan, C. (2012).** Characterisation of gold kiwifruit pectin isolated by enzymatic treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(3): 633-639.
- Zoghi, A., Vedadi, S., Esfahani, Z. H., Gavligi, H. A., & Khosravi-Darani, K. (2023).** A review on pectin extraction methods using lignocellulosic wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7): 5577-5589.