



بررسی ویژگی های فیزیکی-شیمیایی و سینتیک استخراج پکتین از تفاله چغندر قند بومی ایران

زینب شاه منصوری^۱، پویا رضوانی^۲، علی فروهر^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

کلمات کلیدی:

پکتین،

تفاله چغندر قند،

سینتیک استخراج،

قدرت ژل،

وزن مولکولی،

بهینه سازی زمانی

DOI: 10.48311/fsct.2026.120169.83123

* مسئول مکاتبات:

forouhar@iut.ac.ir

پکتین یک هیدروکلوئید ارزشمند در صنعت غذا می باشد که ویژگی های آن تا حد زیادی به منبع آن وابسته است. به منظور تعیین کاربرد، شناخت ویژگی ها، خواص عملکردی و مدل های ریاضی استحصال پکتین، ضروری می باشد. بنابراین، این پژوهش بر شناسایی ویژگی های ذاتی و عملکردی پکتین استخراج شده از تفاله چغندر قند حاصل از کارخانه قند تمرکز دارد. در این پژوهش پکتین از تفاله چغندر قند بومی ایران در زمان های مختلف با حلال اسیدی استخراج گردید. ویژگی های پکتین شامل بازده، درجه استریفیکاسیون، درصد اسید گالاکتورونیک، وزن مولکولی وابسته به ویسکوزیته، سفتی ژل، شدت رنگ و ظرفیت نگهداری آب اندازه گیری شد. همچنین ضریب انتشار موثر و مدل های سینتیکی برای توصیف رفتار استخراج برآزش گردید. نتایج نشان داد با افزایش زمان استخراج، بازده از $8/10 \pm 0/25$ درصد در ۳۰ دقیقه به $13/05 \pm 0/20$ درصد بعد از ۱۲۰ دقیقه افزایش می یابد، اما خلوص از $74/1 \pm 65/50$ به $45/65 \pm 0/20$ درصد کاهش می یابد. نمونه حاصل در دسته پکتین های با متوکسیل بالا قرار گرفت. بیشترین وزن مولکولی ($182/6 \pm 1/1$ کیلودالتون) در ۳۰ دقیقه و بیشترین سفتی ژل ($31/63 \pm 1/44$ گرم-نیرو) در ۶۰ دقیقه مشاهده شد، بدون تفاوت معنادار بین این دو زمان ($p < 0.05$). بیشترین شدت رنگ مربوط به ۱۲۰ دقیقه بود. ظرفیت نگهداری آب در زمان های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه به ترتیب $8/2 \pm 0/14$ و $8/3 \pm 0/07$ (گرم/گرم) بالاتر از سایر زمان ها بود و مدل سینتیکی مرتبه دوم برآزش مناسبی نشان داد. بر اساس تعیین ویژگی ها، پکتین استخراج شده در بازه زمانی ۳۰-۶۰ دقیقه دارای بهترین ویژگی های کیفی شامل خلوص بالا، وزن مولکولی مناسب، قدرت ژل مطلوب، شدت رنگ قابل قبول و ظرفیت نگهداری آب مناسب می باشد.

۱-مقدمه

تفاله چغندر قند یکی از منابع ضایعاتی ارزشمند بوده که پس از استحصال قند از آن، همچنان ترکیبات ارزشمندی مثل پکتین، سلولز، لیگنین، مقادیری پروتئین و ترکیبات فنولی در آن وجود دارد [۱، ۲]. با توجه به فعالیت کارخانجات قند متعدد، میزان تولید تفاله چغندر قند قابل توجه بوده که آن را به یکی از محصولات جانبی اصلی کارخانه‌های قند تبدیل کرده و دور ریختن آن به معنای هدر رفتن یک منبع با ارزش محسوب می‌شود. طبق آمار ارائه شده توسط انجمن صنفی کارخانه‌های قند و شکر ایران، میزان چغندر قند مصرفی در سال ۱۴۰۳، ۸/۸۵۶/۹۲۳ تن بوده. از طرفی به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم چغندر قند، ۲۵ کیلوگرم تفاله حاصل می‌شود [۳]. با توجه به این دو مورد می‌توان محاسبه کرد که حدود ۲/۲۱۴/۲۳۰ تن تفاله چغندر قند در سال ۱۴۰۳ تولید شده که میزان قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. پکتین یک هتروپلی ساکارید اسیدی کلئیدی است که تنوع ساختاری زیادی دارد. پکتین عمدتاً شامل زیرواحدهای هوموگالاکتورونان، زایلوگالاکتورونان، اپیوگالاکتورونان، رامنوگالاکتورونان I و رامنوگالاکتورونان II است. این پلیمر طبیعی به طور فراوان در دیواره سلولی اولیه گیاهان یافت می‌شود و منجر به افزایش استحکام مکانیکی گیاهان می‌شود. پکتین تجاری عمدتاً از ضایعات صنایع تولید آب میوه و شامل پوست مرکبات (۸۵ درصد)، تفاله سیب (۱۴ درصد) و یا چغندر قند (۱ درصد) استخراج می‌شود. پکتین توانایی به دام انداختن آب برای تشکیل ژل در غلظت‌های پایین را دارد. بنابراین به طور گسترده برای کاربردهای متنوع غذایی مانند عامل ژل کننده، تغلیظ کننده یا تثبیت کننده در مربا، محصولات نانویی، قنادی و محصولات لبنی استفاده می‌شود. علاوه بر این می‌توان ویژگی‌های زیست فعال و عملکردی فراوانی برای پکتین در نظر گرفت. به عنوان مثال

آن را فیبر رژیمی، پری بیوتیک و جایگزین چربی می‌دانند که پکتین را به یک ماده ارزشمند در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی تبدیل می‌کند. لازم به ذکر است که تفاوت‌هایی بین پکتین حاصل از چغندر قند و پوست مرکبات یا تفاله سیب وجود دارد. به عنوان مثال درجه استری شدن آن نسبت به پکتین حاصل از پوست مرکبات یا تفاله سیب تا حدودی کمتر بوده که باعث می‌شود کاربردهای متفاوتی برای آنها در نظر گرفته شود. همچنین تفاوت‌هایی در زمینه توالی و پراکندگی نواحی غیر استری شده و نواحی استری شده بین آنها وجود دارد. پکتین با افزایش زمان عبور و کاهش جذب گلوکز، اثرات فیزیولوژیکی بر روده داشته و به عنوان فیبر رژیمی عمل می‌کند. از سوی دیگر پکتین می‌تواند پیش‌ساز مهم و موثری برای داروسازی باشد زیرا با اصلاح آن و ساخت پکتین اصلاح شده، مزایای گسترده‌ای شامل حفاظت از سیستم ایمنی، ممانعت از توسعه تومور، درمان سرطان و بهبود زخم را شامل می‌شود [۴-۶].

پکتین بر اساس درجه متیلاسیون^۱ که مطابق با تعداد گروه‌های کربوکسیلیک متیله شده در هر ۱۰۰ واحد گالاکتورونیک اسید در زنجیره اصلی است به دو دسته پکتین با درجه متوکسی زیاد (HMP)^۲ و پکتین با درجه متوکسی کم (LMP)^۳ طبقه بندی می‌شود. در پکتین HM درجه متیلاسیون بیشتر از ۵۰ درصد بوده و غالباً در طبیعت به عنوان پکتین طبیعی وجود دارد. در پکتین LM درجه متیلاسیون کمتر از ۵۰ درصد بوده و از طریق دمتیله کردن پکتین HM از طریق اعمال تیمار قلیایی یا آنزیمی تولید می‌شود. پکتین با درجه متیلاسیون زیاد و کم، خواص فیزیکی شیمیایی متفاوتی دارند و برای کاربردهای مختلفی استفاده می‌شوند. از همین رو درجه متیلاسیون پکتین، قابلیت پراکندگی آن در آب و قابلیت تشکیل ژل از پکتین را نشان می‌دهد [۷، ۸].

1-Degree of methylation (DM)

2- high methoxyl pectin

3-low-methoxyl pectin

روش‌های متعددی برای استخراج پکتین وجود دارد به عنوان مثال می‌توان از خیساندن در آب داغ، استفاده از محلول‌های شلاته کننده مثل EDTA، استفاده از اسیدهای رقیق یا محلول سدیم هیدروکسید را می‌توان نام برد. از معایب استفاده از محلول‌های شلاته کننده در استخراج، دشواری جداسازی آن از پکتین حاصل است. از طرفی استفاده از محلول قلیایی نیز منجر به کاهش درجه متیلاسیون، و طول زنجیره پکتین حاصل می‌شود. رایج‌ترین روش استخراج پکتین از ضایعات غذایی هیدرولیز اسیدی است [۹، ۱۰]. در مطالعه‌ای که توسط کایا و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد، تأثیر استخراج پکتین از تفاله چغندر قند با کمک فشار هیدرواستاتیک بالا (HHPE)^۴ در مقایسه با روش استخراج متداول مورد بررسی قرار گرفت. کایا و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که افزایش فشار در فرآیند هیدرواستاتیک تا ۴۵۰ مگاپاسکال در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت، همراه با افزودن اسید، بیشترین بازده استخراج پکتین (۱۲ درصد) را به همراه دارد و اثر هم افزایی بین فشار بالا و اسید مشاهده شد. بررسی ویسکوزیته نشان داد که پکتین‌های استخراج شده در غلظت ۲ گرم بر لیتر رفتار نیوتنی داشته و برخلاف برخی روش‌ها، HHPE و افزودن اسید تأثیر منفی معناداری بر ویسکوزیته نسبت به روش متداول نداشتند که این مزیت مهمی برای کاربرد صنعتی محسوب می‌شود. در خصوص خلوص پکتین، اگرچه افزایش دما، زمان و HHPE باعث کاهش محتوای اسید گالاکتورونیک (Gal-A) به دلیل شکست پیوندهای گلیکوزیدی و واکنش β -حذفی شد، اما تمام نمونه‌های استخراج شده با HHPE دارای Gal-A بالاتر از ۶۵٪ بودند که طبق استانداردها، پکتین با درجه خلوص مناسب برای مصارف غذایی محسوب می‌شود [۱۱]. در مطالعه‌ای دیگر، الموحمد و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی امکان استفاده از پیش‌تیمار با تخلیه الکتریکی ولتاژ بالا (HVED)^۵ برای استخراج پکتین از تفاله چغندر قند

پرداختند. این محققان با بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر دامنه پالس (۴۰ کیلوولت) و تعداد پالس (۱۰۰ پالس) با مصرف انرژی ۷۶/۲ کیلوژول بر کیلوگرم موفق شدند بازده استخراج پکتین را به میزان ۲۳ درصد در نمونه تیمار شده با HVED افزایش دهند (شرایط استخراج: دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، pH معادل ۲ و زمان ۱ ساعت). نتایج حاصل از طیف‌سنجی FTIR و کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) نشان داد که ترکیبات شیمیایی و گروه‌های عاملی پکتین استخراج شده از تفاله تیمار شده با HVED، مشابه پکتین استاندارد و پکتین حاصل از نمونه بدون پیش‌تیمار است [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر، رودسامران و همکاران (۲۰۱۹) از پوست لیمو به عنوان ماده‌ی اولیه جهت استخراج پکتین استفاده کردند. آنها نیز از اسید هیدروکلریک بهره بردند؛ با این حال شرایط فرآیند به گونه‌ای بود که دمای استخراج به ۹۵ درجه سلسیوس و مدت زمان آن به ۶۰ دقیقه (یک ساعت) افزایش یافت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده بازده استخراج ۱۵/۹۱ درصد، درجه متیلاسیون ۷۸/۴۹ درصد و مقدار اسید گالاکتورونیک ۸۹/۸ درصد می‌باشد. [۱۳]. از طرفی پکتین چغندر قند به دلیل داشتن گروه‌های فرولویل^۶ در زنجیره‌اش، توانایی ایجاد پیوند عرضی بین فرولیک اسید اضافی و آزاد را داشته تا به شکل ژل مقاوم به دما با داشتن پیوندهای جانبی کووالانسی درآید. با تشکیل ژل پکتین کاربردهای دیگری مثل ساخت هیدروژل ابر جاذب فراهم می‌شود [۱۴].

هدف از این پژوهش، مشخصه‌یابی و تعیین ویژگی‌های عملکردی پکتین حاصل از چغندر قند بومی ایران همزمان با سنجش شرایط مخلوط کردن و محاسبه ضریب استخراج می‌باشد. اگرچه مطالعات پیشین به بهینه‌سازی چندهدفه استخراج پکتین از تفاله چغندر قند پرداخته‌اند اما این پژوهش به بررسی ویژگی‌های پکتین استخراج شده از تفاله چغندر قند

6- Feruloyl groups

4 -high hydrostatic pressure assisted extraction

5- high-voltage electrical discharges

شد. بعد از سرد شدن عصاره، اتانول ۹۶ درصد با نسبت ۱:۱ اضافه شد تا رسوب پکتین حاصل شود. در نهایت، با استفاده از سانتریفیوژ با دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه رسوب پکتین به خوبی از مایع رویی جدا شد. در پایان پکتین حاصل در ۴۵ درجه سلسیوس تحت خلا به مدت ۲۴ ساعت خشک شد [۱۵].

۳-۲- تعیین بازده استخراج

برای تعیین بازده استخراج پکتین از تفاله چغندر قند، نمونه نهایی در زمان‌های مورد آزمون توزین شد و با فرمول ۱ راندمان استخراج هر کدام از تیمارها بررسی شد.

$$(۱) \quad \frac{\text{وزن پکتین خشک شده}}{\text{وزن تفاله خشک اولیه}} \times ۱۰۰$$

= بازده استخراج پکتین

۴-۲- تعیین میزان اسید گالاکتورونیک

برای تعیین میزان اسید گالاکتورونیک موجود در پکتین‌های استخراج شده از روش تیلور (۱۹۹۳) استفاده شد و میزان اسید گالاکتورونیک موجود در آن‌ها اندازه‌گیری شد و میزان آن برای پکتین‌های حاصل از زمان‌های مختلف استخراج با یکدیگر مقایسه شد. ۱۰ میلی گرم پکتین به مخلوط ۱۰۰ میلی لیتر آب اضافه شد. پس از انحلال، ۲۰۰ میکرولیتر از این محلول به همراه ۳ میلی لیتر از سولفوریک اسید غلیظ در دمای ۴ درجه سلسیوس به لوله شیشه ای افزوده شده و سپس ۲۰۰ میکرولیتر محلول کاربازول ۰/۱ درصد به آن افزوده و هم زده شد. سپس به مدت ۲ ساعت در ۶۰ درجه سلسیوس به صورت ساکن قرار داده شد تا رنگ صورتی تشکیل گردد و در نهایت جذب محلول در ۵۳۰ نانومتر قرائت شد. میزان اسید گالاکتورونیک با استفاده از محلول استاندارد دی-اسید گالاکتورونیک (۲۰ تا ۲۰۰ ppm) محاسبه شد [۱۶].

۵-۲- تعیین درجه استریفیکاسیون

ایران (کشت شده در شهرکرد) می‌پردازد و با ردیابی گسسته تغییرات در طی زمان استخراج، سیر تحول هریک از ویژگی‌ها در طی زمان را ترسیم می‌کند. مجموعه اهداف کامل‌تر بهینه‌سازی در این پژوهش (راندمان، خلوص، قدرت ژل، وزن مولکولی و ظرفیت نگهداری آب) نتایج حاصل از گزارش سایر محققان در زمینه پکتین حاصل از چغندر قند بومی را کامل‌تر می‌کند. بنابراین در یک شرایط خاص و ملایم، استخراج انجام می‌شود تا ویژگی‌های عملکردی پکتین بدست آمده، بررسی گردد. لذا در این پژوهش، بررسی همزمان سینتیک استخراج با تغییرات وزن مولکولی و قدرت ژل و سایر ویژگی‌های مهم پکتین در طی زمان‌های مختلف استخراج که منجر به معرفی یک بازه زمانی بهینه برای کاربردهای علمی می‌گردد، مورد توجه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

تفاله چغندر قند منطقه اصفهان از کارخانه قند اصفهان تهیه شد. هیدروکلریک اسید و الکل اتانول از شرکت مجللی تهیه شد. استاندارد گالاکتورونیک اسید از شرلت سیگما آمریکا، کاربازول، هیدروکسید سدیم، کلرید کلسیم و فنل فتالین از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

۲-۲- استخراج پکتین از تفاله چغندر قند

برای استخراج پکتین از ضایعات چغندر قند از روش فراوش و همکاران (۲۰۰۸) با کمی تغییرات استفاده شد. ابتدا تفاله‌های تهیه شده، با آب شستشو شد و در ادامه برای خشک کردن تفاله‌ها از آن ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت استفاده شد تا ضایعات به وزن ثابت برسند. تفاله خشک شده با استفاده از آسیاب قهوه-پارس خزر (مدل Chili توان ۲۰۰ وات)، آسیاب شده و از الک با مش ۶۰ عبور داده شد. در ادامه تفاله خشک با نسبت ۱:۲۰ با محلول اسیدی با pH معادل ۲ (با افزودن کلریدریک اسید به آب مقطر) مخلوط شد و استخراج در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سلسیوس انجام شد. در ادامه از فیلتر کردن برای جداسازی عصاره از مواد جامد استفاده

$$Y = \frac{Y_{eq}^2 k \cdot t}{1 + Y_{eq} \cdot k \cdot t} \quad (3)$$

در ادامه جهت مشخص شدن شرایط استخراج عدد رینولدز و ضریب انتشار موثر محاسبه گردید. انتقال جرم در ذرات جامد با فرض ثابت بودن ضریب انتشار در طول فرآیند از قانون دوم فیک تبعیت می‌کند. با فرض کروی بودن ذرات، فرمول کرانک، حاصل از حل تحلیلی انتقال جرم است که انتقال جرم را به صورت شعاعی نشان می‌دهد. بر اساس فرمول ۴ می‌توان ضریب انتشار موثر از ذره را محاسبه نمود. همچنین عدد رینولدز (Re) بر اساس فرمول ۵ محاسبه گردید [۱۸]. در این فرمول N تعداد دور در ثانیه، D قطر همزن و μ نشان دهنده ویسکوزیته سیال (محلول آبی اسیدی) می‌باشد.

$$\frac{C_t}{C_\infty} \quad (4)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{ef}^t}{r^2}\right) \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\mu}$$

۷-۲- ظرفیت نگهداری آب

اگرم پکتین با ۱۰ میلی لیتر آب مخلوط و ۱ دقیقه به شدت هم زده شد. سپس ۳۰ دقیقه در ۴۰۰۰ g سانتریفیوژ شد. مایع رویی حذف و باقی مانده توزین شد. ظرفیت نگهداری به صورت نسبت وزن آب نگهداری شده (اختلاف وزن دوم و وزن اول) به ازای وزن پکتین (وزن اول) گزارش شد [۱۹].

۸-۲- رنگ سنجی

شاخص‌های رنگی (a^* , b^* , L^*) پکتین استخراج شده با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج (مدل ZE-6000، ساخت شرکت نیون، ژاپن) بر اساس سیستم رنگی CIE LAB، با منبع نور D65 و زاویه دید ۱۰ درجه اندازه‌گیری شد. کروما (شدت رنگ) بر اساس پارامترهای a^* (مقادیر + نشان‌دهنده قرمزی،

برای اندازه‌گیری درجه استریفیکاسیون (DE)^v از روش وای و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شد و درجه استریفیکاسیون پکتین‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد تا تاثیر زمان استخراج بر آن مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار ۲ میلی لیتر اتانول ۹۶٪ به ۰/۱ گرم از نمونه اضافه شد و سپس ۲۰ میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه و تا حل شدن کامل نمونه در دمای ۴۵ درجه سلسیوس هم زده شد. سپس ۲ قطره فنل فتالین به آن اضافه گردید و با سود ۰/۱ نرمال تا ظهور رنگ صورتی تیر شد. میزان سود مصرف شده ثبت شد (v1). به محلول خنثی شده قبل ۱۰ میلی لیتر سود نیم مولار اضافه و هم زده شد و سپس ۲۰ دقیقه ثابت باقی ماند. سپس ۱۰ میلی لیتر اسید نیم مولار اضافه و با سود ۰/۱ نرمال تا ظهور رنگ صورتی تیر شد (v2) بر اساس فرمول ۲ محاسبه انجام شد [۱۷].

$$DE = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \times 100 \quad (2)$$

۶-۲- مدلسازی سینتیکی و محاسبه ضریب انتقال

انتشار موثر

مدلسازی سینتیکی برای درک رفتار انتقال جرم و واکنش‌های طی استخراج پکتین انجام شد. داده‌های تجربی استخراج پکتین با سه مدل ریاضی شامل مدل سینتیک درجه صفر، درجه یک و درجه دوم با استفاده از نرم افزار متلب ورژن 2016a مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس شاخص‌های آماری مدل‌های ذکر شده شامل ضریب تبیین (R^2) و خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE)^a، مناسب‌ترین مدل برای توصیف فرآیند استخراج تعیین شد. این مدل‌ها به ترتیب ۱، ۲ و ۳ می‌باشند. در این مدل‌ها ضریب k ثابت سرعت، Y_{eq} نشان دهنده غلظت تعادلی یا در زمان بی نهایت و t نشان دهنده زمان می‌باشد.

$$Y = K \cdot t \quad (1)$$

$$Y = Y_{eq}(1 - e^{-k \cdot t}) \quad (2)$$

برای سنجش سفتی ژل‌های حاصل از پکتین‌های استخراج‌شده، از دستگاه بافت‌سنج سنتام (STM1 ساخت ایران) استفاده شد. دستگاه مجهز به لودسل با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم و پروب استوانه‌ای با قطر ۵ میلی‌متر بود. نمونه‌های ژل در ظرفی با قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر قرار گرفتند و فرآیند نفوذ پروب با سرعت ثابت ۶۰ میلی‌متر در دقیقه انجام پذیرفت. در این آزمون، سفتی ژل به‌صورت نیروی لازم برای رسیدن به عمق نفوذ ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد و داده‌های حاصل از منحنی نیرو-مکان ذخیره‌سازی و تحلیل شدند.

۱۲-۲- بهینه‌سازی

به منظور تعیین زمان بهینه استخراج که منجر به دست‌یابی به بهترین ویژگی‌های پکتین استخراج شده می‌گردد، از روش بهینه‌سازی چندمتغیره بر پایه درون‌یابی عددی با نرم‌متلب ۲۰۱۶ استفاده شد. تمامی داده‌های شاخص‌ها (شامل بازده، درجه استریفیکاسیون، درجه اسید گالاتکتورونیک، وزن مولکولی، قدرت ژل و ظرفیت نگهداری آب) با استفاده از روش مقیاس‌بندی خطی^۹ در بازه [۱-۰] نرمال‌سازی شدند. برای مدل‌سازی تغییرات متغیرها در فواصل زمانی بین داده‌های تجربی، از روش PCHIP^{۱۰} استفاده شد. این روش به دلیل حفظ ویژگی یکنوایی داده‌ها و جلوگیری از نوسانات غیرواقعی انتخاب گردید. در این پژوهش، برای تمامی متغیرها وزن یکسان در نظر گرفته شد و هدف، بیشینه‌سازی تمامی پاسخ‌ها تعیین گردید. زمان بهینه با جستجوی عددی در بازه ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه و با گام‌های زمانی ۱ دقیقه، در نقطه‌ای که بالاترین امتیاز کل را داشت، تعیین گردید [۲۳].

۱۳-۲- تحلیل آماری

داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS ورژن ۱۷ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آزمایش‌ها در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی^{۱۱} انجام و تفاوت

a- نشان‌دهنده سبزی) و b^* (مقادیر b- نشان‌دهنده آبی، b^+ نشان‌دهنده زردی) با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد [۲۰]:

$$\text{Chroma} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (6)$$

۹-۲- بررسی وزن مولکولی وابسته به گرانیروی

گرانیروی ذاتی محلول‌های رقیق پکتین (۵ میلی‌گرم بر میلی‌لتر) با استفاده از یک ویسکومتر مویین (مدل آستوالد، شرکت حیان، شیراز، ایران) که در حمام آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثابت شده بود، اندازه‌گیری شد. نمونه‌های پکتین در محلول کلرید سدیم ۰/۲ مولار حل شدند. گرانیروی ذاتی با استفاده از معادله ۷ محاسبه گردید. t_0 و t_s به ترتیب به عنوان زمان لازم برای خروج حلال و محلول نمونه از لوله مویین ثبت شدند، $[\eta]$ نشان‌دهنده گرانیروی ذاتی می‌باشد [۲۱].

$$[\eta] = \frac{1}{c} \sqrt{2 \left(\frac{(t_s - t_0)}{t_0} - \ln \left(\frac{t_s}{t_0} \right) \right)} \quad (7)$$

در ادامه با استفاده از معادله «مارک-هووینک» برای تعیین رابطه بین جرم مولکولی و گرانیروی ذاتی استفاده شد.

۱۰-۲- تهیه ژل پکتین

برای ساخت ژل پکتین از ۴۵ درصد ساکارز، ۲ درصد پکتین، و ۸۰ میلی‌گرم کلرید کلسیم به ازای هر گرم پکتین برای تشکیل ژل استفاده شد. برای تشکیل ژل ابتدا پکتین به آب اضافه شد و حرارت داده شد تا به همراه هم زدن، پکتین حل شود و در ادامه کلرید کلسیم نیز اضافه شد. در پایان به سیال زمان داده تا سرد شود و بعد از ۲۴ ساعت قدرت ژل سنجیده شد [۲۲].

۱۱-۲- بررسی سفتی ژل پکتین

11- Completely Randomized Design (CRD)

9- Linear Scaling

10- Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial

۹۰ دقیقه)، حلال به نواحی عمقی تر نفوذ کرده و ترکیبات پکتیکی با دسترسی دشوارتر (دارای پیوند با سایر اجزا دیواره سلولی) را حل می کند. در مرحله سوم (۹۰-۱۲۰ دقیقه)، فرآیند به تعادل نزدیک شده و نرخ استخراج کاهش می یابد. این الگو با مدل های انتقال جرم جامد-مایع و نفوذ فیزیکی قابل توجیه است [۲۴]. انرژی یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیندهای صنعتی و اقتصادی است. تعادل بین کمیت، کیفیت و اقتصاد نقطه بهینه را در استخراج مشخص می کند. از منظر اقتصادی، زمان ۹۰ دقیقه به عنوان نقطه بهینه پیشنهاد می شود. در این زمان، ۹۲٪ از حداکثر بازده حاصل می شود، در حالی که با کاهش ۲۵٪ در زمان فرآیند نسبت به ۱۲۰ دقیقه، صرفه جویی قابل توجهی در مصرف انرژی و هزینه های عملیاتی حاصل می گردد. بنابراین، انتخاب زمان استخراج مناسب نه تنها بازده مطلوب را تضمین می کند، بلکه بهره وری فرآیند را نیز بهبود می بخشد. در فرآیند استخراج پکتین از چغندر قند، زمان استخراج نقش تعیین کننده ای در کیفیت و کمیت محصول نهایی دارد. مطالعات نشان داده اند که بازه زمانی ۳۰ تا ۹۰ دقیقه، بهترین شرایط را برای استخراج مؤثر پکتین فراهم می کند [۲۵].

معنادر بین تیمارها با استفاده از آزمون آنالیز واریانس و آزمون توکی-کرامر، در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) تعیین گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- راندمان استخراج پکتین

استخراج پکتین از منابع گیاهی مانند چغندر قند، تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد که زمان استخراج یکی از مهم ترین آنهاست. بررسی داده های تجربی (شکل ۱) نشان می دهد که بازده استخراج پکتین با افزایش زمان، ابتدا به صورت تقریباً خطی افزایش می یابد و سپس به ناحیه ای با نرخ رشد کاهش یافته وارد می شود. در بازه ۰ تا ۹۰ دقیقه، بازده به 12.0 ± 1.5 می رسد، اما در ادامه و تا ۱۲۰ دقیقه، حدوداً ۱ درصد افزایش دیگر مشاهده می شود (13.05 ± 0.20). این روند بیانگر رسیدن به ناحیه پلاتو و اشباع فرآیند استخراج است. با این حال اختلاف در این زمان نیز با زمان قبل همچنان معنادار ($p < 0.05$) است. از منظر سینتیک، فرآیند استخراج پکتین از چغندر قند را می توان به سه مرحله تقسیم کرد: در مرحله اول (۰-۳۰ دقیقه)، ترکیبات سطحی و قابل دسترس به سرعت استخراج می شوند. در مرحله دوم (۳۰-۹۰-۱۲۰)

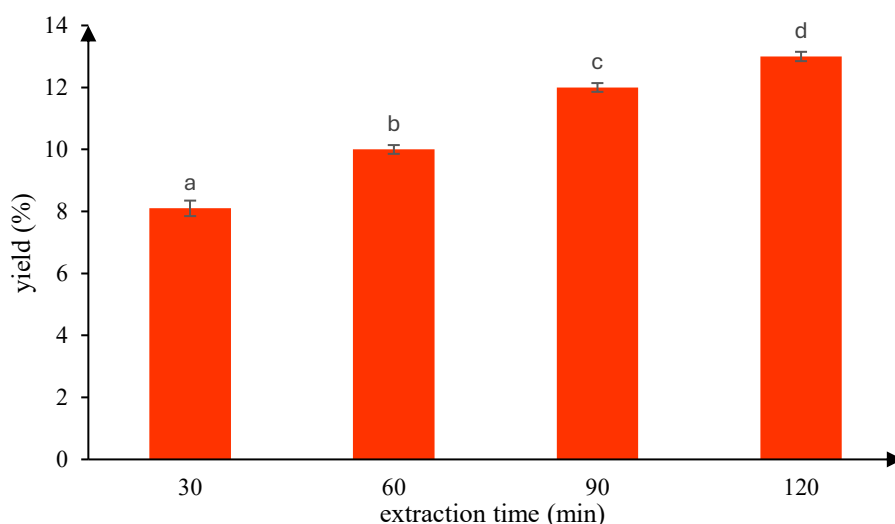


Figure 1- The effect of time on pectin extraction yield
Different letters in each column indicate a significant difference between the data ($p < 0.05$)

۳-۲- تأثیر زمان بر میزان اسید گالاکتورونیک و خلوص پکتین استخراج شده

زمان‌های ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه را می‌توان به سه عامل اصلی نسبت داد: نخست، تخریب حرارتی که در اثر قرارگیری طولانی‌مدت در معرض دمای بالا موجب شکستن زنجیره‌های پلی‌گالاکتورونیک و تبدیل آن‌ها به قندهای ساده‌تر می‌شود؛ دوم، مکانیسم حذف بتا که در شرایط اسیدی و دمای بالا باعث تخریب ساختار پکتین می‌گردد؛ و سوم، ورود ناخالصی‌ها به محصول نهایی که می‌تواند خلوص پکتین را کاهش دهد [۲۶، ۲۷].

در مجموع، زمان استخراج به‌عنوان یک متغیر کلیدی در تعیین درصد اسید گالاکتورونیک استخراج‌شده شناخته می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهند که زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه به‌طور معناداری ($p < 0.05$) کیفیت بهتری نسبت به زمان‌های ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه دارند. از میان این زمان‌ها، ۶۰ دقیقه با میانگین 75.52 ± 2.0 درصد، به‌عنوان زمان مناسب برای دست‌یابی به خلوص بیشینه نمونه استخراج‌شده مشخص شد.

میزان اسید گالاکتورونیک نشان‌دهنده درجه خلوص پکتین می‌باشد. نتایج حاصل از تاثیر زمان استخراج بر میزان اسید گالاکتورونیک پکتین حاصل در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج خلوص پکتین استخراج‌شده بعد از ۶۰ دقیقه کاهش می‌یابد. کاهش خلوص پکتین علاوه بر تاثیر گذاری بر قابلیت تشکیل ژل پکتین بر سرعت انحلال پکتین نیز تاثیر دارد. تحلیل آماری داده‌ها به‌وضوح نشان داد که میزان اسید گالاکتورونیک نمونه استخراج‌شده از زمان‌های ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه استخراج، تفاوت آماری معناداری ($p < 0.05$) با یکدیگر ندارند؛ همچنین میزان اسید گالاکتورونیک نمونه حاصل از زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه استخراج نیز تفاوت آماری معناداری ($p < 0.05$) با یکدیگر ندارند. با این حال، تفاوت بین این دو زیرگروه از نظر آماری بسیار معنادار است، به‌طوری‌که بیشترین میزان اسید گالاکتورونیک در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه به دست آمده است. ماریک و همکاران (۲۰۱۸) نیز در پژوهشی میزان خلوص پکتین را در همین بازه زمانی بهینه گزارش کرده‌اند [۲۵]. کاهش قابل توجه درصد اسید گالاکتورونیک در

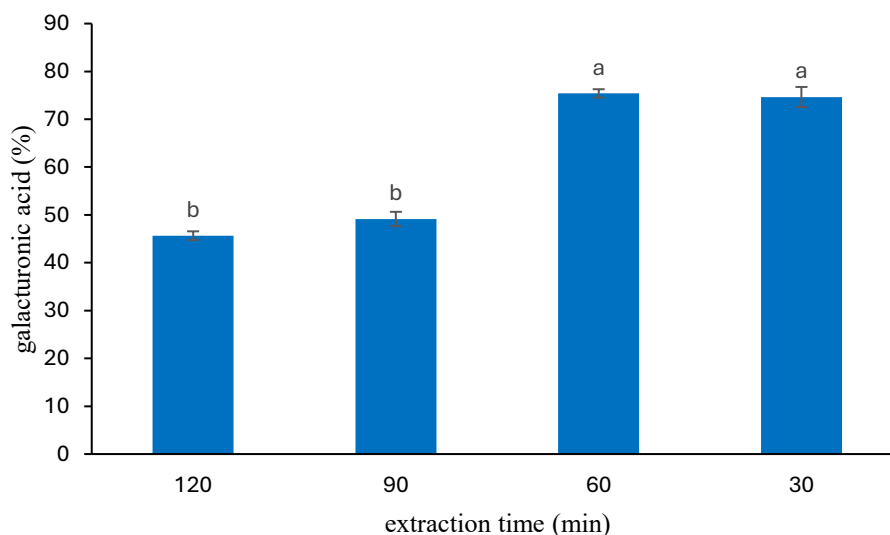


Figure 2- The effect of time on the amount of galacturonic acid present in the extracted pectin
Different letters in each column indicate a significant difference between the data ($p < 0.05$)

در فرایند استخراج پکتین، درجه استری شدن (DE) یکی از ویژگی‌های مهم محصول می‌باشد، چرا که DE مستقیماً بر ویژگی‌های عملکردی پکتین مانند ژل‌سازی، ویسکوزیته تأثیر می‌گذارد. نتایج حاصل از آزمون آنالیز واریانس

۳-۳- تاثیر زمان بر درجه استری شدن پکتین استخراج شده

یک طرفه^۱ نشان داد که زمان استخراج تأثیر آماری معناداری بر DE دارد ($p < 0.01$, Sig. = 0.006). این یافته نشان می‌دهد که تغییرات زمانی در فرآیند استخراج، نه تنها بر کمیت بلکه بر کیفیت ساختاری پکتین نیز اثرگذار است.

نتایج تأثیر زمان استخراج بر درجه استری شدن پکتین چغندر قند در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج پکتین استخراج شده از چغندر قند عمدتاً در دسته پکتین‌های با درجه متوکسیل بالا قرار می‌گیرد. اگرچه در زمان‌های استخراج طولانی‌تر (۱۲۰ دقیقه)، کاهش درجه استری به زیر ۵۰ درصد مشاهده شد که نشان‌دهنده شکسته شدن زنجیره پلیمری در اثر تیمار حرارتی طولانی است. بررسی روند تغییرات نشان داد که در بازه زمانی کوتاه (۳۰ تا ۶۰ دقیقه)، درجه استری تفاوت معناداری نداشته و ساختار پکتین حفظ می‌شود؛ اما با افزایش زمان از ۶۰ به ۹۰ دقیقه و سپس به ۱۲۰ دقیقه، کاهش معناداری در درجه استری رخ می‌دهد ($P < 0.01$). این الگو حاکی از آن است که زمان‌های استخراج طولانی‌تر، تخریب ساختاری پکتین را به همراه داشته و در نتیجه درجه استری به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این یافته‌ها با نتایج حاصل از اندازه‌گیری محتوای گالاکتورونیک اسید نیز همسو و مؤید یکدیگر هستند.

به‌طور خاص، با افزایش زمان استخراج از ۳۰ به ۱۲۰ دقیقه، مقدار DE از 66.5 ± 2.1 درصد به 47.5 ± 2.9 درصد کاهش یافت. این افت قابل توجه را می‌توان به فرآیند شکست پیوندهای استری نسبت داد که تحت شرایط دمایی بالا و محیط اسیدی رخ می‌دهد. در این شرایط، گروه‌های متوکسی

($-OCH_3$) که مسئول استری شدن زنجیره پلی‌گالاکتورونیک هستند، به تدریج جدا شده و موجب کاهش DE می‌شوند. این پدیده نه تنها از منظر شیمیایی قابل توضیح است، بلکه از نظر کاربرد صنعتی نیز اهمیت دارد؛ چرا که پکتین با DE پایین‌تر رفتار متفاوتی در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی خواهد داشت. مطالعات پیشین نیز این روند را تأیید کرده‌اند. کراوچنکو و همکاران (۱۹۹۹) در بررسی مقایسه‌ای پکتین‌های صنعتی نشان دادند که قرارگیری طولانی‌مدت در دمای بالا منجر به تخریب گروه‌های متوکسی و کاهش DE می‌شود. همچنین، در محیط‌های اسیدی، مکانیسم حذف بتا فعال شده و موجب شکستن زنجیره‌های پکتین می‌گردد. این مکانیسم‌ها نه تنها باعث کاهش DE، بلکه ممکن است منجر به ورود ناخالصی‌ها به محصول نهایی شوند که خلوص و عملکرد پکتین را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲۷].

از منظر کاربردی، این یافته‌ها نشان می‌دهند که زمان استخراج باید به گونه‌ای تنظیم شود که تعادل بین بازده و کیفیت ساختاری حفظ گردد. زمان‌های کوتاه‌تر مانند ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، نه تنها بازده قابل قبولی دارند، بلکه ساختار پکتین را نیز حفظ می‌کنند. در مقابل، زمان‌های طولانی‌تر اگرچه ممکن است بازده را اندکی افزایش دهند، اما با کاهش DE، کیفیت عملکردی پکتین را تضعیف می‌کنند. بنابراین، انتخاب زمان استخراج بهینه باید بر اساس هدف نهایی از کاربرد پکتین صورت گیرد؛ برای مثال، در کاربردهای ژل‌سازی، حفظ DE بالا اولویت دارد، در حالی که در برخی کاربردهای غلیظ‌سازی، DE پایین‌تر ممکن است مطلوب‌تر باشد.

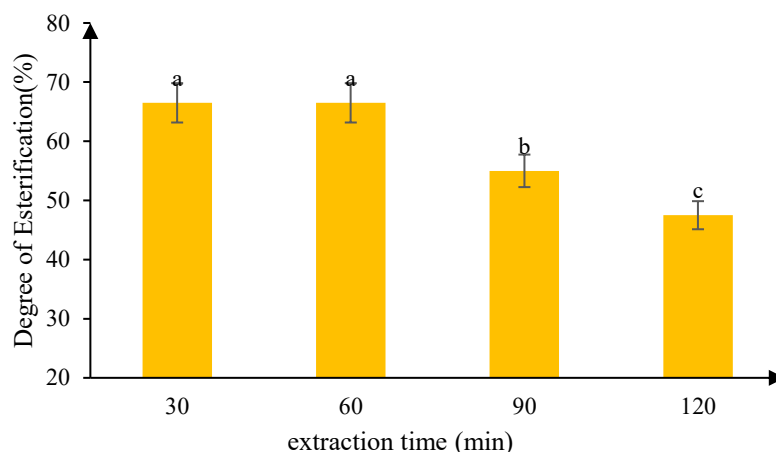


Figure 3- The effect of extraction time on the degree of esterification of pectin
Different letters in each column indicate a significant difference between the data ($p < 0.05$)

رفتار استخراج، مدل درجه دوم ضرایب برازش بهتری را نشان داد. این مدل غلظت تعادلی را $13/09$ درصد و ثابت سرعت را $0/029$ بر دقیقه برآورد کرد. در مقابل، مدل درجه صفر با R^2 برابر $0/726$ و RMSE برابر $2/421$ ، نتوانست برازش مناسبی با داده‌ها ارائه دهد و برای توصیف فرآیند استخراج مناسب ارزیابی نشد.

نتایج این بخش بر اساس مدل درجه دوم نشان می‌دهد که استخراج پکتین از چغندر قند از مکانیسمی پیچیده و نه فقط رابطه خطی زمان و غلظت بلکه چندین مکانیسم هم‌زمان با واکنش‌های شیمیایی بر انتقال جرم تاثیرگذار هستند. یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های پیشین در زمینه استخراج پکتین از منابع گیاهی دیگر هم‌راستا هستند و تأکید می‌کنند که مدل‌های غیرخطی مانند مدل درجه دوم، ابزار مناسبی برای تحلیل سینتیکی چنین فرآیندهایی محسوب می‌شوند [29, 28].

۳-۴- نتایج مدل‌سازی سینتیکی و ضریب موثر استخراج

در فرآیند استخراج پکتین از چغندر قند، تحلیل سینتیکی نقش مهمی در درک رفتار انتقال جرم و واکنش‌های شیمیایی ایفا می‌کند. در این مطالعه، داده‌های تجربی استخراج پکتین با سه مدل ریاضی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند: مدل سینتیک درجه صفر، درجه یک و درجه دوم (شکل‌های ۵، ۴ و ۶). بر اساس شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین (R^2) و خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE)، مدل سینتیک درجه دوم به عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف فرآیند استخراج شناسایی شد. این مدل با R^2 برابر $0/998$ و RMSE برابر $0/441$ ، برازش بسیار مطلوبی با داده‌ها نشان داد و پارامترهای آن شامل غلظت تعادلی نهایی (∞) معادل $16/41$ درصد و ثابت سرعت استخراج (k_1) برابر $0/0018$ بر دقیقه بود. در مقایسه، مدل درجه یک نیز عملکرد قابل قبولی داشت R^2 برابر $0/990$ و RMSE برابر $0/581$ ، اما در پیش‌بینی دقیق

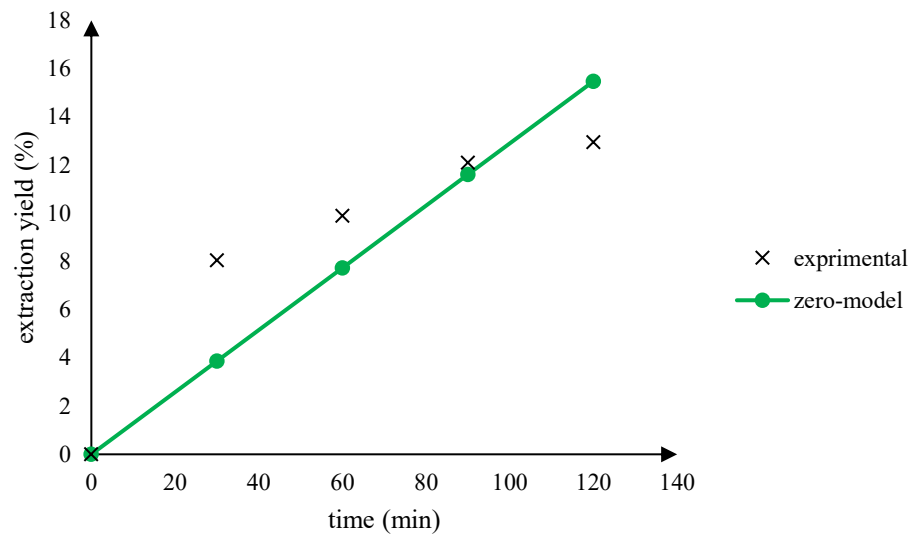


Figure 4- Zero-order kinetic model, crosses represent the experimental data, and the circles and line indicate the model data.

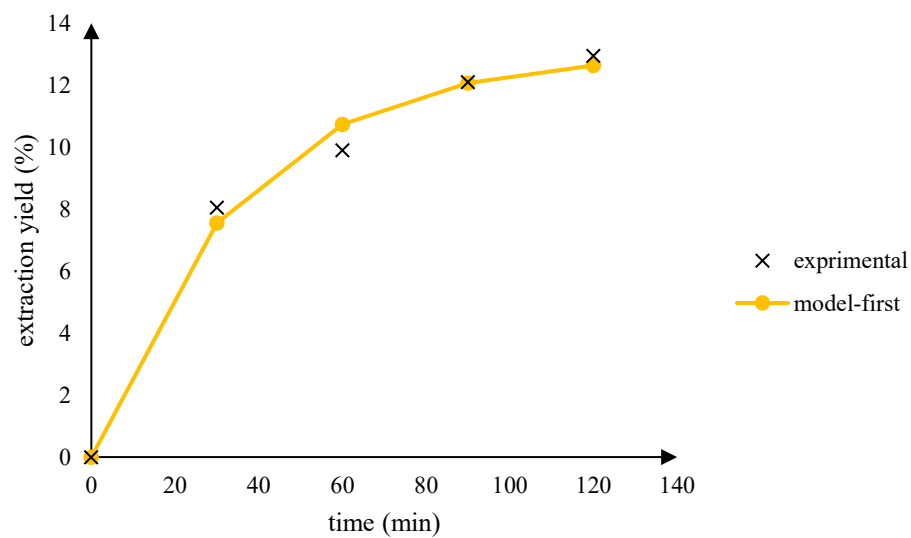


Figure 5- First-order kinetic model, crosses represent the experimental data, and the circles and line indicate the model data

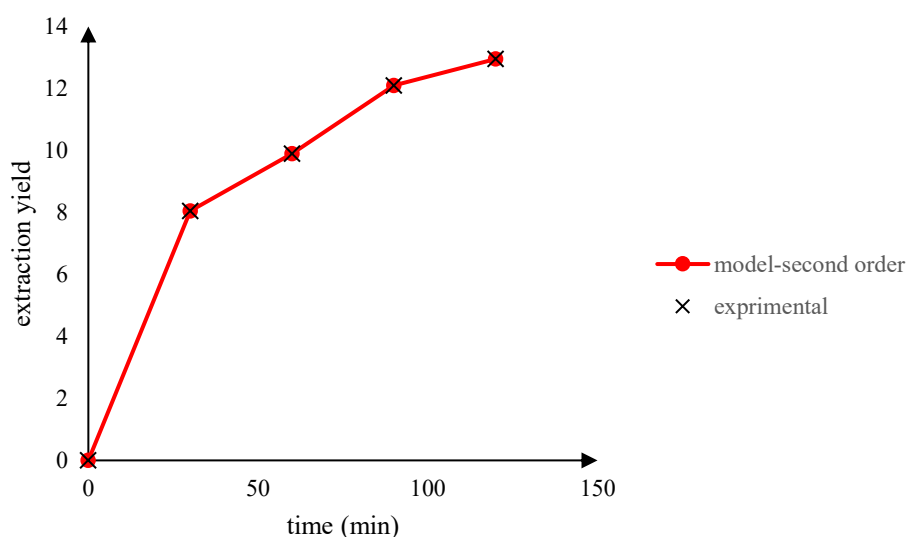


Figure 6- Second-order kinetic model, crosses represent the experimental data, and the circles and line indicate the model data

غلظت قابل استخراج یا غلظت در زمان بی نهایت بر اساس مدل سینتیکی درجه دوم (مدل ریاضی بهینه) برابر $16/41$ درصد انتخاب و بر اساس حل کردن معادله ۴، مقدار ضریب موثر استخراج برابر $3/16 \times 10^{-13}$ برآورد شد. الموحمد و همکاران (۲۰۱۷) ضریب انتشار موثر استخراج پکتین از چغندر قند با روش استخراج اسیدی با پیش تیمار تخلیه الکتریکی را با فرض کروی بودن ذرات در محدوده 10^{-13} تا 9×10^{-13} متر مربع بر ثانیه گزارش کردند. این محققان نیز استفاده از پیش تیمار را در افزایش ضرایب انتقال جرم معنادار گزارش نمودند. این ضریب تابعی از نسبت ماده جامد به حلال و اندازه ذرات می باشد [۱۲]. با توجه به این نتایج، در حالی که عدد رینولدز محاسبه شده حاکی از اختلاط عالی در فاز مایع است، مقدار بسیار کوچک ضریب نفوذ مؤثر (در مرتبه 10^{-13}) نشان می دهد که مرحله نفوذ درون ذره ها، به عنوان گلوگاه اصلی فرآیند استخراج عمل می کند. به عبارت دیگر، علی رغم شرایط آشفته و مناسب محیط بیرونی، مولکول های پکتین برای خروج از ساختار فشرده تفاله چغندر قند با مقاومت قابل توجهی مواجه هستند. برای مقایسه، الموحمد و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از پیش تیمار تخلیه الکتریکی، ضریب انتشار را در محدوده بالاتری نسبت

از آنجایی که شرایط استخراج می تواند بر برخی از ویژگی های پکتین همانند بازده و یا درجه استری تاثیرگذار باشد در این بخش از پژوهش بر اساس ویژگی های جریان سیال و ضرایب پدیده های انتقال در فرآیند انتقال جرم شرایط به صورت عددی محاسبه شد.

نتایج محاسبات عدد رینولدز و محاسبات ضریب استخراج مؤثر، برای بیان شرایط واقعی حاکم بر استخراج در کنار دما، pH و زمان ضروری است. لذا برای بررسی شرایط اختلاط و جریان سیال درون بشر، عدد رینولدز همزن مغناطیسی با در نظر گرفتن طول مؤثر مگنت (۳ سانتی متر) به عنوان قطر همزن محاسبه گردید. عدد رینولدز برابر ۶۸۷۵ محاسبه گردید. این مقدار به مراتب نشان دهنده جریان گردابی آشفته در سیستم های همزن درون بشر است. چنین شرایطی حاکی از اختلاط مؤثر و یکنواخت ذرات تفاله درون حلال بوده و مقاومت لایه مرزی اطراف ذرات را به حداقل می رساند. همچنین به منظور تعیین سرعت حرکت پکتین درون ماتریس جامد ذرات تفاله، ضریب نفوذ مؤثر ($Deff$) با استفاده از مدل کرانک برای ذرات کروی و با بهره گیری از داده های تجربی استخراج در زمان های مختلف محاسبه گردید. ابتدا حداکثر

به مطالعه حاضر گزارش کرده است و نشان‌دهنده تأثیر مثبت پیش‌تیمار در کاهش مقاومت داخلی ماده جامد می‌باشد [۱۲].

۳-۵- ظرفیت نگهداری آب

آنالیز آماری نتایج حاصل از بررسی ویژگی ظرفیت نگهداری آب در پکتین حاصل از چغندر قند در محدوده $6/85 \pm 0/07$ تا $8/0 \pm 30/07$ گرم به گرم نمونه می‌باشد که در جدول ۱ آورده شده است. ظرفیت نگهداری آب یکی از ویژگی‌های مهم است که به توانایی ۱ گرم ماده مرطوب در نگهداری آب اشاره دارد. آب نگهداری شده مجموع آب پیوندی، آب هیدرودینامیکی و آب به دام افتاده فیزیکی است. در واقع، پکتین با WHC بالاتر می‌تواند برای حفظ آب و بهبود خواص حسی در سیستم‌های غذایی استفاده شود. بر اساس نتایج این پژوهش ظرفیت نگهداری آب پکتین چغندر قند ایرانی از پکتین بادمجان گزارش شده توسط کاظمی و همکاران ($6/2$ گرم به گرم نمونه) بیشتر می‌باشد [۳۰]. همچنین WHC پکتین چغندر قند مقدار بیشتری را نسبت به WHC گوجه فرنگی گزارش شده توسط نمیر و همکاران دارا می‌باشد [۳۱].

همچنین مشخص شد که زمان استخراج تأثیر معناداری بر ظرفیت نگهداری آب پکتین‌های استخراج شده از تفاله چغندر قند دارد ($p < 0.05$). یافته‌های این پژوهش نشان داد که ظرفیت نگهداری آب پکتین استخراج شده از تفاله چغندر قند در زمان‌های ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه به ترتیب $8/2 \pm 0/14$ و $8/0 \pm 35/07$ (g/g) به طور قابل توجهی بیشتر از زمان‌های ۶۰ و ۹۰ دقیقه استخراج است و از نظر آماری تفاوت معناداری با یکدیگر (۳۰ و ۱۲۰ دقیقه) ندارند. کاهش معنادار WHC در زمان ۹۰ دقیقه ($6/8 \pm 0/07$ g/g) نسبت به زمان‌های کوتاه‌تر (۳۰ و ۶۰ دقیقه) می‌تواند ناشی از تخریب ساختاری پکتین در اثر تماس طولانی مدت با حلال اسیدی و دمای بالا باشد. این تخریب ممکن است منجر به کاهش توانایی زنجیره‌های پکتین در حفظ مولکول‌های آب از طریق پیوندهای هیدروژنی شود. با این حال مشخص شد که

WHC نمونه استخراج شده در زمان ۱۲۰ دقیقه نه تنها کاهش نیافته، بلکه افزایش یافته است. این افزایش مجدد را می‌توان به عواملی نسبت داد. نخست با گذشت زمان بیشتر، استخراج بیشتری از پکتین و ترکیبات همراه (مانند همی سلولزها) صورت می‌گیرد که ممکن است خود دارای ظرفیت نگهداری آب بالایی باشند. همچنین تخریب کنترل‌شده ساختار پکتین در زمان طولانی می‌تواند منجر به ایجاد زنجیره‌های کوتاه‌تر با تعداد بیشتری گروه‌های هیدروکسیل آزاد شود که تمایل بیشتری برای اتصال با آب دارند.

۳-۶- رنگ سنجی

رنگ، شاخص مهمی برای پکتین است زیرا نقش مهمی در پذیرش آن قبل از استفاده به عنوان افزودنی غذایی دارد. در طول فرآیند استخراج، تجزیه دیواره سلولی باعث می‌شود رنگدانه‌های محلول در آب برای حل شدن در حلال در دسترس باشند. این رنگدانه‌ها در مرحله رسوب در پکتین به دام می‌افتند و بر رنگ پکتین تأثیر می‌گذارند [۳۲]. نتایج بصری نشان داد که نمونه‌ها دارای رنگی سفیدمایل به زرد هستند. پارامترهای رنگی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. بر اساس این نتایج می‌توان گفت رنگ نمونه‌های پکتین چغندر قند روشن تر و زرد تر از رنگ پکتین استخراج شده از پوست گوجه فرنگی استخراج شده به روش فراصوت می‌باشد که توسط سنگار و همکاران در محدوده (۸ تا 11 و $24-21$ b) گزارش شد [۳۲]. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه همراه با آزمون توکی نشان داد که زمان استخراج تأثیر معناداری بر شاخص کروما نمونه‌های پکتین استخراج شده دارد ($p < 0.05$). بررسی مقادیر نشان می‌دهد که با افزایش زمان استخراج از ۳۰ به ۹۰ دقیقه، شدت رنگ روند کاهشی دارد که می‌تواند ناشی از تخریب حرارتی رنگدانه‌ها در اثر تماس طولانی‌تر با حلال اسیدی باشد. با این حال، در زمان استخراج ۱۲۰ دقیقه، شدت رنگ به بالاترین مقدار خود می‌رسد. با توجه به اینکه بین زمان ۱۲۰ دقیقه با ۳۰ دقیقه تفاوت آماری معناداری مشاهده نشد،

صورت ساده افزایشی نیست و احتمالاً حاصل برهم‌کنش همزمان دو پدیده متضاد آزادسازی رنگدانه‌ها از ماتریکس و تخریب حرارتی آن‌ها می‌باشد.

نمی‌توان نتیجه گرفت که افزایش شدت رنگ در ۱۲۰ دقیقه قطعی است. بنابراین می‌توان گفت روند کلی شدت رنگ در محدوده زمانی ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه، فاقد یک الگوی یکنواخت افزایشی یا کاهشی است و زمان استخراج تأثیر پیچیده و غیرخطی بر این شاخص دارد. به طور خلاصه، اگرچه زمان استخراج از نظر آماری بر کروما مؤثر است، اما این تأثیر به

table 1- Colorimetric Parameters and Water Holding Capacity of Sugar Beet Pectin

Extraction time (min)	b*	a*	Chroma	WHC
30	19.7±0.5 ^a	4.5±0.4 ^a	20.2±0.7 ^a	8.2±0.14 ^a
60	18.5±1.5 ^a	3.8±1.0 ^a	18.8±2.0 ^{ab}	7.7±0.14 ^b
90	16.1±1.1 ^b	3.9±0.7 ^a	16.6±0.7 ^b	6.9±0.07 ^b
120	20.6±0.2 ^a	4.2±0.9 ^a	20.9±0.2 ^a	8.3±0.07 ^a

*Different letters the indicator Significant difference It is between samples (p<0.05)

نسبتاً کنترل‌پذیر است، حذف بتا می‌تواند ساختار پکتین را به‌طور غیرقابل بازگشت تغییر دهد و خواص عملکردی آن را تضعیف کند. [۳۳].

۳-۷- ویژگی‌های رئولوژیکی و مولکولی پکتین استخراج شده

ارتباط وزن مولکولی و ویسکوزیته ذاتی با معادله مارک-هوونیک^۱ بیان می‌شود. این معادله شامل $[\eta]$ ، ویسکوزیته ذاتی، وزن مولکولی (M) می‌باشد و به شکل رابطه $[\eta] = K \times M^a$ بیان می‌شود. K و α ثابت‌هایی وابسته به نوع پلیمر و حلال هستند. هاردینگ و همکاران (۲۰۱۷) ذکر کردند که این رابطه نشان می‌دهد که ویسکوزیته ذاتی می‌تواند به‌عنوان شاخصی سریع و غیرمخرب برای تخمین وزن مولکولی و ارزیابی کیفیت ساختاری پکتین مورد استفاده قرار گیرد. این ویژگی برای کنترل کیفیت در خطوط تولید صنعتی بسیار ارزشمند است [۳۴]. مطالعات پانوئیل و همکاران (۲۰۱۴) و ماریک و همکاران (۲۰۱۸) نیز کاهش وزن مولکولی و ویسکوزیته ذاتی پکتین در زمان‌های استخراج طولانی‌تر را تأیید کرده‌اند. این مطالعات نشان دادند که استخراج بیش از حد نه تنها باعث کاهش عملکرد ژل‌دهی پکتین می‌شود، بلکه ممکن است منجر به تولید محصولی با خلوص پایین‌تر و خواص رئولوژیکی ضعیف‌تر گردد [۳۵، ۳۶].

ویژگی‌های عملکردی پکتین تحت تأثیر ویژگی‌های مولکولی مانند وزن مولکولی و ویسکوزیته ذاتی قرار دارند. در این مطالعه، اثر زمان استخراج بر این دو شاخص کلیدی نیز بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش زمان از ۹۰ به ۱۲۰ دقیقه منجر به کاهش ۳۴/۵ درصد در وزن مولکولی و ویسکوزیته ذاتی شد. کاهش ویسکوزیته ذاتی و وزن مولکولی نشان‌دهنده وقوع تخریب زنجیره‌های پلی‌گالاکتورونیک در زمان‌های طولانی‌تر استخراج است. این پدیده از دو مکانیسم اصلی شامل تخریب هیدرولیتیک و حذف بتا ناشی می‌شود. در تخریب هیدرولیتیک طی شرایط دمایی بالا و محیط اسیدی، پیوندهای گلیکوزیدی بین مونومرهای گالاکتورونیک شکسته شده و زنجیره‌های بلند به الیگومرهای کوتاه‌تر تبدیل می‌شوند. این مکانیسم به‌عنوان عامل اصلی کاهش وزن مولکولی در پکتین‌های صنعتی معرفی شده است. مکانیسم تخریب حذف بتا نیز در دماهای بالا و pH پایین اتفاق می‌افتد و منجر به شکستن تصادفی زنجیره‌های پکتین می‌شود. برخلاف تخریب هیدرولیتیک که

^۱Mark-Houwink

کیلودالتون (تقریباً ۳۵٪ کاهش) افت کرده است. این نتایج نشان می‌دهند که با طولانی شدن زمان استخراج، پدیده تخریب حرارتی در زنجیره‌های پکتین رخ داده است. پیوندهای گلیکوزیدی در بدنه اصلی پکتین در اثر حرارت و محیط استخراج (اسیدی) شکسته شده و مولکول‌های بلند به قطعات کوتاه‌تر تبدیل شده‌اند.

بر اساس نتایج جدول ۲ مشخص است که زمان استخراج بر وزن مولکولی پکتین تأثیری معنادار داشته است. با افزایش زمان استخراج از ۳۰ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه، هر دو شاخص ویسکوزیته ذاتی و وزن مولکولی روند کاهشی معنا داری را نشان می‌دهند ویسکوزیته ذاتی تقریباً ۴۳ درصد کاهش یافته است و وزن مولکولی از 182.6 ± 1.1 به 119.2 ± 1.2 و 15.71 ± 0.10 به 8.88 ± 0.11 است.

Table 2- Molecular characteristics of the extracted pectin

Extraction Time (min)	Viscosity-Average Molecular Weight (K Da)	Intrinsic Viscosity (mL g ⁻¹)
30	182.6±1.1 ^a	15.71±0.10 ^a
60	179.6±1.9 ^a	15.21±0.21 ^a
90	162.7±0.7 ^b	13.55±0.09 ^b
120	119.2±1.2 ^c	8.88±0.11 ^c

*Different letters the indicator Significant difference It is between samples (Duncan's test, $p < 0.05$)

را می‌توان به تخریب حرارتی زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی، کاهش وزن مولکولی و افت درجه استری شدن نسبت داد. در این شرایط، زنجیره‌های بلند پکتین به الگومرهای کوتاه‌تر تبدیل می‌شوند و گروه‌های متوکسیل نیز تحت فرآیند دی‌استری شدن شکسته می‌شود. این تغییرات ساختاری منجر به کاهش توانایی پکتین در تشکیل شبکه ژلی منسجم می‌شود، چرا که تعاملات بین مولکولی ضعیف‌تر شده و ساختار سه‌بعدی ژل دچار فروپاشی نسبی می‌گردد [۳۸]. بنابراین نمونه‌های استخراج شده در زمان‌های کوتاه استخراج (۳۰ تا ۶۰ دقیقه) دارای خواص ژل‌دهی بهتری نسبت به نمونه‌های بدست آمده در زمان‌های طولانی‌تر استخراج بودند. این بهبود را می‌توان به افزایش استخراج پکتین‌های با وزن مولکولی بالا، حفظ ساختار و درجه استری شدن مناسب برای تشکیل ژل نسبت داد. در این مرحله، ساختار پلی‌گالاکتورونیک هنوز حفظ شده و گروه‌های متوکسی (-OCH₃) به میزان کافی در زنجیره باقی مانده‌اند، که برای تشکیل شبکه ژلی قوی ضروری است [۳۹]. این الگو نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه در فرآیند استخراج است؛ نقطه‌ای که در آن هم بازده استخراج و هم کیفیت عملکردی پکتین در وضعیت مطلوب قرار دارند. قبلاً فراوش و آشتیانی (۲۰۰۸) نیز در پژوهشی نشان دادند شرایط استخراج

از نظر صنعتی، انتخاب زمان استخراج مناسب می‌تواند ویژگی‌های عملکردی پکتین را به‌طور هدفمند تنظیم کند. به طور مثال پکتین با وزن مولکولی بالا برای کاربردهایی مانند ژل‌دهی قوی در مرباها، ژله‌ها و محصولات لبنی مناسب است درحالی که پکتین با وزن مولکولی پایین برای امولسیون‌سازی، پایدارسازی نوشیدنی‌ها و کاربردهای دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از ویسکوزیته ذاتی به‌عنوان شاخص کنترل کیفیت، امکان پایش سریع و دقیق فرآیند استخراج را فراهم می‌سازد و از تولید محصول نامطلوب جلوگیری می‌کند [۳۷].

۳-۸- سفتی ژل حاصل از پکتین

تحلیل اثر زمان استخراج بر سفتی ژل پکتین چغندر قند، نه تنها نشان‌دهنده تغییرات عملکردی این بیوپلیمر در شرایط فرآیندی مختلف است، بلکه بازتابی از تغییرات ساختاری و مولکولی آن نیز محسوب می‌شود. داده‌های حاصل از آزمون بافت‌سنجی به‌وضوح نشان می‌دهند که زمان استخراج نقش تعیین‌کننده‌ای در توانایی تشکیل ژل پکتین دارد (شکل ۷). در بازه ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، سفتی ژل به ترتیب $30/10 \pm 0/72$ و $31/63 \pm 15/44$ گرم-نیرو می‌باشد که این افزایش از نظر آماری معنادار نیست. با افزایش زمان استخراج به ۹۰ و سپس ۱۲۰ دقیقه، سفتی ژل به شکل معناداری کاهش یافته و به ترتیب به $12/5$ و $15/56$ گرم-نیرو رسیده است. این افت عملکردی

کنترل شده می‌تواند به تولید پکتین با خواص عملکردی مطلوب منجر شود [۴۰].

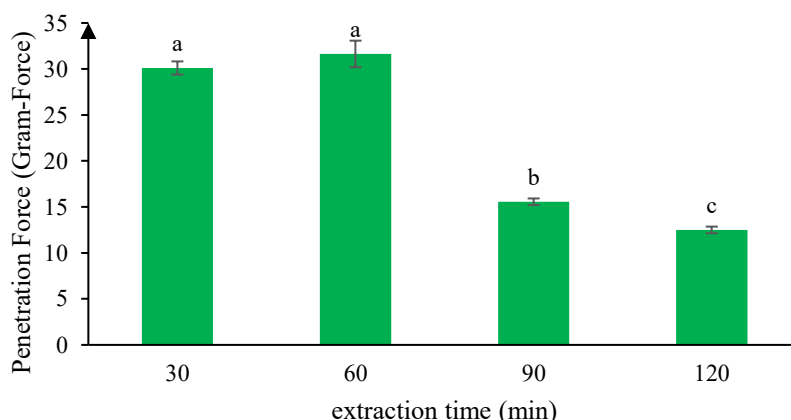


Figure 7- Effect of Extraction Time on Pectin Gel Strength

Different letters in each column indicate a significant difference between the data ($p < 0.05$)

ریاضی بیان کند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان استخراج، بازده به طور معناداری افزایش می‌یابد اما در زمان‌های طولانی استخراج، به دلیل تخریب حرارتی زنجیره‌های پلی‌ساکاریدی و ورود ناخالصی‌ها به محصول نهایی، کیفیت محصول کاهش می‌یابد. این افت شامل کاهش خلوص، کاهش وزن مولکولی و قدرت ژل پکتین می‌باشد. در نهایت، با توجه به تعادل بین بازده و کیفیت، زمان استخراج ۶۰ دقیقه به‌عنوان بهینه‌ترین شرایط برای دستیابی به بالاترین بازده استخراج و در عین حال حفظ مناسب‌ترین ویژگی‌های کیفی پکتین شناسایی شد.

سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس درویشی و مسئولین کارخانه قند اصفهان جهت تامین تفاله چغندر قند سپاسگزاریم.

دسترسى به داده ها

داده های پژوهش در متن آورده شده است و خارج از قوانین این نشریه به اشتراک گذاشته نمی‌شوند.

تعارض منافع

۳-۹- بهینه سازی

نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌یابی اساس بالاترین میزان راندمان استخراج و در عین حال بالاترین میزان خلوص محصول استخراج شده بر اساس شاخص درصد گالاکتورونیک اسید، بیشترین حفظ ساختار اولیه بر اساس شاخص بیشینه بودن درجه استری و وزن مولکولی وابسته به ویسکوزیته، بالاترین کیفیت ژل دهی بر اساس شاخص بیشینه بودن سفتی ژل و بالاترین ظرفیت نگهداری آب بدست آمد. بر این اساس، زمان استخراج ۶۰ دقیقه دارای بالاترین کیفیت و بیشترین راندمان استخراج پکتین از چغندر قند محاسبه شد. در این مدت زمان تعادلی از کیفیت محصول و بازده استخراج بدست می‌آید.

۴- نتیجه گیری کلی

بر اساس یافته‌های این پژوهش، استخراج پکتین از تفاله چغندر قند فرآیندی پیچیده با الگوی غیرخطی از نظر بازده، ویژگی‌های کیفی و عملکردی است. زمان به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی، تأثیر مستقیمی بر بازده استخراج، خلوص و ساختار شیمیایی پکتین دارد. مدل سینتیکی درجه دوم توانست راندمان استخراج پکتین را با دقت کافی به‌صورت

بدین وسیله تأیید می‌گردد که تمامی نویسندگان در مراحل طراحی، تحلیل، نگارش و تأیید نسخه نهایی این مقاله مشارکت فعال داشته‌اند.

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض (تضاد) منافع مالی یا شخصی در رابطه با این پژوهش وجود ندارد.

بیانیه تأمین مالی

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

۵-منابع

مشارکت نویسندگان

- [1] Dinand, E., H. Chanzy, and M.R. Vignon, Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp. *Food Hydrocolloids*, 1999. 13: p. 275-283.
- [2] Kuhnel, S., H.A. Schols, and H. Gruppen, Aiming for the complete utilization of sugar beet pulp: Examination of the effects of mild acid and hydrothermal pretreatment followed by enzymatic digestion. *Biotechnology for Biofuels*, 2011. 4: p. 14.
- [3] Bastani, D., B. Babaei, and F. Haji Esmaili, Extraction of pectin from sugar beet pulp. *Iranian National Congress of Chemical Engineering*, 2003. 8.
- [4] Wang, W., et al., Applications of power ultrasound in oriented modification and degradation of pectin: A review. *Journal of Food Engineering*, 2018. 234: p. 98-107.
- [5] Jarvis, M.C., Structure and properties of pectin gels in plant cell walls. *Plant Cell and Environment*, 1984. 7: p. 153-164.
- [6] Olano-Martin, E., G.R. Gibson, and R. Rastall, Comparison of the in vitro bifidogenic properties of pectins and pectic-oligosaccharides. *Journal of Applied Microbiology*, 2002. 93: p. 505-511.
- [7] Belkheiri, A., et al., Extraction, characterization, and applications of pectins from plant by-products. *Applied Sciences*, 2021. 11(14): p. 6596.
- [8] Castillo-Israel, K., et al., Extraction and characterization of pectin from Saba banana [Musa'saba'(Musa acuminata x Musa balbisiana)] peel wastes: A preliminary study. *International Food Research Journal*, 2015. 22.
- [9] Levigne, S., M.C. Ralet, and J.F. Thibault, Characterization of pectins extracted from fresh sugar beet under different conditions using an experimental design. *Carbohydrate Polymers*, 2002. 49 p. 145-153.
- [10] Pérez, J., K. Gómez, and L. Vega, Optimization and Preliminary Physicochemical Characterization of Pectin Extraction from Watermelon Rind (Citrullus lanatus) with Citric Acid. *International Journal of Food Science*, 2022. 1796: p. 3068829.
- [11] Kaya, B., et al., High hydrostatic pressure assisted extraction of pectin from sugar beet pulp. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021. 56(10): p. 4861-4870.
- [12] Almohammed, F., et al., Pectin recovery from sugar beet pulp enhanced by high-voltage electrical discharges. *Food and bioproducts processing*, 2017. 103: p. 95-103.
- [13] Rodsamran, P. and R. Sothornvit, Microwave heating extraction of pectin from lime peel: Characterization and properties compared with the conventional heating method. *Food Chemistry*, 2019. 278: p. 364-372.
- [14] Hosseinzadeh, B.E., I. Alamzadeh, and A.A.S. Kordi, The Effect of Different Parameters on the Quality and Water Absorption of Gel Produced from Sugar Beet Pulp Pectin for the Production of Superabsorbent. *Iranian Chemical and Chemical Engineering Journal*, 2006. 24(2): p. 83-92.
- [15] Faravash, R.S. and F.Z. Ashtiani, The influence of acid volume, ethanol to extract ratio and acid washing time on the yield of pectic substances extraction from peach pomace. *Food Hydrocolloids*, 2008. 22: p. 196-202.
- [16] Taylor, K.A., A colorimetric method for the quantitation of galacturonic acid. *Applied biochemistry and biotechnology*, 1993. 43(1): p. 51-54.
- [17] Wai, W.W., A.F. Alkarkhi, and A.M. Easa, Effect of extraction conditions on yield and degree of esterification of durian rind pectin: An experimental design. *Food and Bioproducts Processing*, 2010. 88(2-3): p. 209-214.
- [18] Simpson, R. and S.K. Sastry, *Chemical and Bioprocess Engineering. Fundamental Concepts for First-Year Students*. New York, NY, sl: Springer New York. 2013.
- [19] Kazemi, M., F. Khodaiyan, and S.S. Hosseini, Eggplant peel as a high potential source of high methylated pectin: Ultrasonic extraction optimization and characterization. *LWT*, 2019. 105: p. 182-189.
- [20] Bellary, A.N., et al., Anthocyanin infused watermelon rind and its stability during storage.

- Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016. 33: p. 554-562.
- [21] Forouhar, A., et al., The Effect of Ultrasound Pretreatment on Pectin Extraction from Watermelon Rind Using Microwave-Assisted Extraction. *applied science*, 2023. 13(9). p. 5558.
- [22] Alemzadeh, I., Investigation into Some Parameters A ecting Pectin Gel Quality. *Scientia Iranica*, 2007. 14(2): p. 13.
- [23] Kaykha, M.E.H., A. Forouhar, and H. Saberian, Functional Cakes: The Effect of Acorn Flour and Hydrocolloids and Emulsifier on Texture, Nutritional and Sensory Properties. *Food Science & Nutrition*, 2025. 13. p. 1-15.
- [24] Khamsucharit, P., N. Laohakunjit, and O. Kerdchoechuen, Kinetic modeling of pectin extraction from fruit wastes. *Food Hydrocolloids*, 2020. 107: p. 105927.
- [25] Marić, M., V. Pavlović, and K. Banjac, Optimization of pectin extraction from sugar beet pulp. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018. 109: p. 291-301.
- [26] Bagherian, H., et al., Comparisons between conventional, microwave- and ultrasound-assisted methods for extraction of pectin from grapefruit. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2011. 50: p. 1237-1243.
- [27] Kravtchenko, T.P., A.G.J. Voragen, and W. Pilnik, Analytical comparison of three industrial pectin preparations. *Carbohydrate Polymers*, 1999. 38: p. 261-269.
- [28] Mishra, A., R. Verma, and S. Srivastava, Kinetic modeling of pectin extraction from agricultural waste. *Food Chemistry*, 2020. 312: p. 126072.
- [29] Wang, X., Y. Liu, and L. Zhang, Comparative study of kinetic models for pectin extraction from plant materials. *Carbohydrate Polymers*, 2019. 206: p. 297-304.
- [30] Kazemi, M., F. Khodaiyan, and S.S. Hosseini, Utilization of food processing wastes of eggplant as a high potential pectin source and characterization of extracted pectin. *Food chemistry*, 2019. 294: p. 339-346.
- [31] Namir, M., H. Siliha, and M.F. Ramadan, Fiber pectin from tomato pomace: characteristics, functional properties and application in low-fat beef burger. *Journal of food measurement and Characterization*, 2015. 9(3): p. 305-312.
- [32] Sengar, A.S., et al., Comparison of different ultrasound assisted extraction techniques for pectin from tomato processing waste. *Ultrasonics sonochemistry*, 2020. 61: p. 104812.
- [33] Kravtchenko, T.P., A.G.J. Voragen, and W. Pilnik, Analytical comparison of the industrial pectin preparations. *Carbohydrate Polymers*, 1992. 18: p. 253-263.
- [34] Harding, S.E., G.A. Morris, and K.K.T. Goh, The molecular weight distribution and conformation of citrus pectins. *Food Hydrocolloids*, 2017. 66: p. 1-8.
- [35] Panouillé, M., R. Verhé, and C. Dufour, Molecular weight and intrinsic viscosity of pectin from apple pomace. *Carbohydrate Polymers*, 2014. 106: p. 30-38.
- [36] Marić, m., V. Pavlović, and K. Banjac, Optimization of ultrasound-assisted extraction of pectin from sugar beet pulp. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018. 48: p. 180-190.
- [37] Kpodo, F.M., J.K. Agbenorhevi, and K. Alba, Pectin extraction and characterization from cocoa husk. *Food Chemistry*, 2017. 216: p. 27-33.
- [38] Methacanon, P., S. Benjakul, and W. Visessanguan, Pomelo (*Citrus maxima*) pectin: Effects of extraction parameters and its properties. *Food Hydrocolloids*, 2014. 35: p. 383-391.
- [39] Ptichkina, N.M., O.A. Markina, and G.N. Rumyantseva, The effect of extraction conditions on the quality of pectin from sugar beet pulp. *Food Chemistry*, 2008. 107: p. 1202-1206.
- [40] Faravash, R.S. and F.Z. Ashtiani, The effect of pH, ethanol volume and acid washing time on the yield of pectin extraction from peach pomace. *International Journal of Food Science & Technology*, 2008. 43: p. 557-561.



Scientific Research

Study on the Physicochemical Characteristics and Extraction Kinetics of Pectin Derived from Indigenous Iranian Sugar Beet Pulp

zeynab Shah Mansouri¹, Pouya Rezvani², Ali Forouhar^{*3}

1- B.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, college of agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

2- M.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, college of agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

3- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, college of agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2026/04/30

Review: 2026/06/06

Accepted: 2026/06/07

Keywords:

Pectin;

Sugar Beet Pulp;

Extraction Kinetics;

Gel Strength;

Molecular Weight;

Time Optimization

DOI: 10.48311/fsct.2026.120169.83123

*Corresponding Author E-

forouhar@iut.ac.ir

Pectin is a valuable hydrocolloid in the food industry, and its properties are largely influenced by its source. Understanding the characteristics, functional properties, and mathematical models of extracting this important hydrocolloid is essential. Therefore, this study focuses on identifying the intrinsic and functional properties of pectin extracted from Sugar beet pulp obtained from a sugar factory. In this research, pectin was extracted from sugar beet pulp at different extraction times. The pectin characteristics measured included yield, degree of esterification, galacturonic acid content, viscosity-average molecular weight, gel strength, color intensity, and water-holding capacity. In addition, the effective diffusion coefficient and kinetic models were fitted to describe the extraction behavior. Evaluation of the properties of pectin showed that increasing extraction time resulted in an increase in yield from $8.1 \pm 0.25\%$ at 30 minutes to $13.05 \pm 0.20\%$ after 120 minutes, while purity decreased. The extracted sample was classified as high-methoxyl pectin. The highest molecular weight (182.6 ± 1.1 kDa) was observed at 30 minutes, and the highest gel strength (31.63 ± 1.44 g-force) was detected at 60 minutes. The lowest color intensity corresponded to the 90-minute extraction time, while the highest color intensity was observed at 120 minutes. Water-holding capacity at 30 and 120 minutes was 8.2 ± 0.14 and 8.35 ± 0.07 g/g, respectively. The second-order kinetic model provided an appropriate fit. Based on the characterization results, pectin extracted within the 30–60-minute time range exhibited the best qualitative properties.