

آماده انتشار

کدورت‌زدایی شیره میوه‌جات با استفاده از جاذب‌های زیستی پوست مرکبات: غربالگری جاذب‌های زیستی و بهینه-

سازی شرایط عملیاتی

روحیار اکبری سنه^{۱*}، حامد امیریان^۲، امید احمدی^۳، آرمان سلطانی^۴، اوین زندی^۵

^۱ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران، رایانامه: r.akbari@uok.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران، رایانامه: hamedamirian5@gmail.com

^۳ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران، رایانامه: o.ahmadi@uok.ac.ir

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران، رایانامه: arman.soltani@uok.ac.ir

^۵ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران، رایانامه: a.zandi@uok.ac.ir

چکیده:

سابقه و هدف: شیره انگور و انجیر به‌عنوان منابع غنی از قندهای طبیعی، پلی‌فنول‌ها و مواد معدنی، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و خون‌ساز هستند. این ترکیبات طبیعی با تأثیر بر بهبود کم‌خونی، تقویت سیستم ایمنی و افزایش انرژی، در صنایع غذایی و دارویی کاربردهای بالقوه‌ای دارند. با این حال، وجود کدورت در شیرهای میوه‌جات یکی از چالش‌های اساسی در پذیرش مصرف‌کننده و فرآوری صنعتی محسوب می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی عملکرد جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات (پرتقال، لیمو و نارنگی) در حذف کدورت از این شیرها با استفاده از روش جذب سطحی اختصاص دارد.

مواد و روش‌ها: بدین منظور، پوست مرکبات پس از جداسازی از بخش خوراکی، خشک شده، آسیاب و در ادامه الک گردید. جهت ارزیابی ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی جاذب‌ها، آزمون‌های FESEM، EDX، FTIR و BET انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از ارزیابی تصاویر FESEM نشان دادند که پوست لیمو دارای ساختاری متراکم و تجمع ذرات است، در حالی که پوست نارنگی و به‌ویژه پرتقال دارای ساختار متخلخل و یکنواخت هستند. آنالیز BET سطح ویژه بالاتری برای پوست پرتقال ($10 \text{ m}^2/\text{g}$) نسبت به سایر جاذب‌ها ثبت کرد. از سوی دیگر، بررسی نتایج حاصل از طیف‌سنجی FTIR نشان داد که گروه‌های عاملی فعال نظیر هیدروکسیل، کربونیل و فنولی در پوست پرتقال در مقایسه با جاذب‌های زیستی پوست نارنگی و لیمو از شدت بیشتری برخوردارند. با

استفاده از جاذب پوست پرتقال، تحت شرایط عملیاتی یکسان، ۵/۶۵٪ از شیر انجیر و ۸/۳۶٪ از شیر انگور کدورت زدایی شد. این اختلاف عملکرد به تفاوت در ماهیت و ترکیب کدورت زای موجود در هر شیر نسبت داده می شود. در ادامه، تأثیر متغیرهای عملیاتی از جمله زمان تماس، مقدار جاذب، غلظت ژلاتین و pH محلول بر بازده کدورت زدایی شیر انجیر با بکارگیری پوست پرتقال به عنوان جاذب زیستی، با استفاده از روش یک فاکتور در یک زمان مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط عملیاتی بهینه (زمان تماس ۶۰ دقیقه، مقدار جاذب ۲/۰ g، مقدار ژلاتین ۰/۰۰۹ g و pH اسیدی)، بیشترین میزان حذف کدورت برای شیر انجیر (۷۰/۴٪) ثبت گردید. استفاده از ژلاتین طبیعی به عنوان کمک منعقدکننده موجب افزایش تعامل بین ذرات کدورت زا و جاذب گردید؛ با این حال، افزایش بیش از حد آن باعث بروز کدورت معکوس شد.

نتیجه گیری: این نتایج کاربردی می توانند در طراحی راهکارهای عملیاتی موثر جهت ارتقاء کیفیت ظاهری و پذیرش مصرف کننده در فرآوری شیرهای گیاهی مورد توجه قرار گیرند. در مجموع، یافته ها نشان دادند که جاذب زیستی پوست پرتقال می تواند به عنوان گزینه ای مؤثر، کم هزینه و زیست سازگار برای شفاف سازی شیرهای گیاهی مورد استفاده قرار گیرد و زمینه ساز توسعه روش های صنعتی پایدار در فرآوری محصولات غذایی باشد.

واژه های کلیدی: کدورت زدایی، پوست مرکبات، شیر انگور، شیر انجیر، بهینه سازی.

۱- مقدمه

امروزه با رشد روزافزون گرایش جامعه به مصرف فرآورده های غذایی طبیعی، سالم و فاقد ترکیبات شیمیایی افزوده، شیرهای حاصل از میوه جات به یکی از اولویت های اصلی در صنعت غذا تبدیل شده است [۱]. شیرهای میوه جات مانند شیرهای انگور و انجیر، از جمله محصولات پرکاربرد و مغذی هستند که به دلیل دارا بودن ترکیبات قندی، پلی فنول ها، پکتین ها، مواد معدنی و ویتامین ها، جایگاه ویژه ای در سبد تغذیه ای دارند. شیرها که در واقع عصاره های غلیظ شده میوه ها هستند، می توانند اثرات مثبتی به عنوان شیرین کننده های طبیعی از جمله: بهبود سلامت متابولیک، جلوگیری از افزایش وزن و کاهش گلوکز خون داشته باشند [۲-۴]. «شربت انجیر» یا شیر انجیر از جوشاندن و تغلیظ انجیر تازه در آب، بدون افزودن هیچ ماده دیگری تهیه می شود. محصول به دست آمده شربتی غلیظ است که با رنگ قهوه ای، طعم و بوی شیرین آن مشخص می شود. این نوع شیر سرشار از کربوهیدرات و قندهای طبیعی است [۵]. شیر انگور که اصطلاحاً به آن «دوشاب» نیز گفته می شود، به عنوان یکی از محبوب ترین فرآورده های غذایی است که از تغلیظ و تبخیر طولانی مدت آب انگور بدست می آید. غنای بالای این محصول از نظر مواد مغذی،

طعم خوشمزه و کاربرد گسترده آن در تهیه انواع غذاها و دسرها به عنوان شیرین کننده، آن را به یک گزینه ایده آل برای مصارف انسانی تبدیل کرده است [۶ و ۷]. با این حال، فرآیند استخراج و فرآوری این محصولات اغلب با بروز کدورت همراه است که نه تنها جنبه ظاهری محصول را تضعیف می کند بلکه بر ماندگاری، قابلیت تغلیظ، فرآیند بسته بندی و پذیرش مصرف کننده نیز تأثیر منفی می گذارد. کدورت در شیرهای میوه جات عمدتاً ناشی از حضور ترکیبات کلوئیدی، رنگدانه های پایدار، پلی فنول های اکسید شده، پکتین، ذرات معلق و پروتئین های گیاهی است [۸]. از آنجایی که مصرف کنندگان امروزی به دنبال فرآورده هایی با ظاهر مطلوب و ترکیب طبیعی هستند، دستیابی به روش هایی برای شفاف سازی مؤثر و حفظ ویژگی های تغذیه ای، ضروری به نظر می رسد [۹].

روش های بسیار مختلفی برای رفع کدورت از شیرها استفاده شده اند که می توان به موارد زیر اشاره نمود: (۱) سانتریفیوژ [۱۰]، (۲) فرآیندهای سنتی شفاف سازی با کمک آنزیم [۱۱]، (۳) افزودن مواد زلال ساز [۱۲]، (۴) فرآیندهای غشایی [۱]، (۵) انعقاد الکتریکی [۱۳]، (۶) سولفیتاسیون [۱۳ و ۷] جذب [۱۴]. اگرچه این روش ها در برخی شرایط اثربخش هستند، اما معمولاً با چالش هایی نظیر هزینه بالا، پیچیدگی عملیاتی، تغییر ویژگی های تغذیه ای محصول و نگرانی های زیست محیطی همراه اند [۱۵].

در پاسخ به این محدودیت ها، استفاده از روش جذب زیستی بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله مزایایی که روش جذب زیستی را در مقایسه با سایر روش ها برتری بخشیده است می توان به موارد زیر اشاره نمود: هزینه عملیاتی پایین، راندمان کدورت زدایی بالا، عدم نیاز به مواد اضافی، عدم ایجاد آلودگی و سمیت در شیر و آبمیوه و امکان احیای جاذب زیستی

[۱۶ و ۱۷]. در سال های اخیر، بسیاری از پژوهش ها بر توسعه جاذب های زیستی ارزان قیمت با منشأ مواد زائد غیر متعارف حاصل

از صنایع و کشاورزی تمرکز یافته اند؛ این رویکرد ضمن کاهش هزینه ها، به بازیافت پسماندها و ارتقای پایداری فرآیندهای تصفیه

کمک می کند. جاذب های زیستی نه تنها با حذف ترکیبات نامطلوب موجب بهبود شفافیت محصول می شوند، بلکه از منظر

زیست محیطی نیز با کاهش پسماند و استفاده بهینه از منابع طبیعی، هم راستا با اهداف توسعه پایدار عمل می کنند. در این میان،

مركباتی همچون پرتقال، نارنگی و لیمو که از نظر ارزش غذایی بسیار مفید هستند، از جمله محصولات اصلی به شمار می روند که

کاربرد گسترده ای در صنایع غذایی و مصارف خانگی دارند [۱۸]. حدود یک سوم از کل مرکبات تولیدی وارد چرخه مصرف

صنعتی می شوند و در نتیجه، هزاران تن پوست باقی مانده از این فرآیند به عنوان ضایعات کشاورزی و صنعتی شناخته می شوند که

معمولاً بدون استفاده رها شده و پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری زیست‌محیطی دارند. پوست مرکبات یکی از محصولات جانبی فرآیند آب‌میوه‌گیری صنعتی است که معمولاً فاقد کاربرد ثانویه بوده و به‌عنوان یک ماده زائد کشاورزی و غذایی شناخته می‌شود. به‌دلیل فراوانی، هزینه پایین و سهولت دسترسی، این ضایعات، پتانسیل بالایی برای استفاده در فرآیندهای زیست‌پایه دارند. در صورت دفع غیربهداشتی یا انباشت در محیط، این ضایعات می‌توانند منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی و مشکلات بهداشتی در مناطق شهری و صنعتی شوند. بنابراین، تبدیل پوست مرکبات به جاذب کم‌هزینه، اهداف دوگانه‌ای را دنبال می‌کند. از یک سو، ضایعات ناخواسته بازار میوه به ماده‌ای با ارزش افزوده تبدیل می‌شوند، و از سوی دیگر، این ماده می‌تواند به‌طور مؤثر در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد. از جمله مزایای جاذب زیستی تهیه‌شده از پوست مرکبات می‌توان به دسترسی آسان، فراوانی، سرعت جذب بالا، مقرون‌به‌صرفه بودن، قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی، امکان تجدیدپذیری و تولید پسماند کمتر در پایان فرآیند جذب اشاره کرد [۱۹-۲۲]. از سوی دیگر، بخش سفیدرنگ زیرین پوست مرکبات (به‌ویژه در پرتقال و لیمو) حاوی ترکیبات زیست‌فعال از جمله فلاونوئیدها و پکتین است که برخی مطالعات، خواص ضدسرطانی آن را گزارش کرده‌اند. این بخش همچنین قابلیت استفاده در فرآیندهای جذب رنگ و کدورت از محلول‌های غذایی را دارد و از نظر ترکیب شیمیایی، منبع مناسبی برای استخراج پکتین نیز محسوب می‌شود [۲۳-۲۵].

شایان ذکر است که طی انجام فرآیند جذب سطحی، عوامل متعددی بر عملکرد جاذب و میزان جذب عوامل کدورت‌زا تأثیر می‌گذارند. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر راندمان شفاف‌سازی آب‌میوه‌ها و شیرها میوه-جات شامل دوز جاذب مورد استفاده، pH محلول خوراک، زمان تماس و مقدار ژلاتین مورد استفاده می‌باشند که با بهینه‌سازی این فاکتورها می‌توان بازدهی فرآیند کدورت‌زدایی را بهبود بخشید. در پژوهشی توسط خلفوی^۱ و همکاران (۲۰۲۴)، حذف یون کروم (VI) از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب زیستی حاصل از پوست پرتقال مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر عوامل مؤثر نظیر pH محلول، مقدار جاذب، غلظت اولیه کروم (VI) و زمان تماس نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین بازده حذف (۹۷/۸ درصد) در زمان تماس ۹۰ دقیقه حاصل شد. این نتایج نشان می‌دهند که پوست پرتقال می‌تواند یک جاذب زیستی مؤثر، ارزان‌قیمت و دوستدار محیط زیست برای حذف فلزات سنگین مانند کروم (VI) از آب‌های آلوده باشد [۲۶]. در یکی از

¹ Khalfaoui

مطالعات اخیر بن جلما و همکاران (۲۰۲۵)، از پوست مرکبات (پرتقال و لیمو) تحت اصلاح یا عدم اصلاح با امواج فراصوت

به عنوان جاذب های زیستی برای حذف یون های فلزات سنگین از پساب استفاده کردند. نتایج نشان داد که اصلاح با امواج

اولتراسونیک موجب بهبود قابل توجه ظرفیت جذب و راندمان حذف یون های Ni^{2+} و Zn^{2+} گردید. نمونه USL (پوست لیمو

تیمارشده) بیشترین ظرفیت جذب نیکل ($5/45 \text{ mg/g}$) و راندمان حذف (۵۴ درصد) را نشان داد، در حالی که USO (پوست

پرتقال تیمارشده) در جذب روی عملکرد بهتری داشت ($14/64 \text{ mg/g}$ و ۷۳ درصد) [۲۷]. رانی^۱ و همکاران (۲۰۲۲) در

پژوهشی به بررسی حذف رنگ های متیلن بلو و بنفش کریستالی از محلول های آبی با استفاده از جاذب زیستی تهیه شده از پوست

لیمو شیرین (ACLP) پرداختند. فرآیند جذب با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر نظیر غلظت اولیه رنگ، زمان تماس، دوز جاذب و

pH انجام شد. بهینه سازی شرایط تجربی نشان داد که با استفاده از تنها ۰/۱ گرم ACLP و در مدت ۱۲۰ دقیقه، میزان حذف رنگ

متیلن بلو به ۸۲/۷۷ درصد و بنفش کریستالی به ۸۹/۸۷ درصد رسید که در pH برابر با ۷ حاصل گردید [۲۸]. ژانواری^۲ و

همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق خود، توانایی پوست نارنگی را به عنوان جاذب زیستی در حذف رنگ سافرانین نارنجی^۳ از

محلول های آبی بررسی نمودند. در شرایط بهینه شامل دمای ۳۱۸ K، دوز جاذب $0/4 \text{ g/L}$ و زمان تماس ۱۲۰ دقیقه، راندمان

حذف به ۸۴/۷۵ درصد رسید. نتایج مطالعه حاکی از آن است که پوست نارنگی به عنوان جاذب زیستی، از پایداری عملیاتی و

بازده جذب مطلوبی برخوردار بوده و پتانسیل استفاده در مقیاس صنعتی برای فرایندهای تصفیه محلول های آبی را داراست [۲۱].

مطالعه ی دو^۴ و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که پوست مرکبات با ظرفیت جذب بالا ($116/2 \text{ mg/g}$) قابلیت مؤثری در حذف

سلنیوم (IV) از محلول های آبی دارد. پایداری عملکرد این جاذب زیستی را به گزینه ای مناسب برای کاربردهای صنعتی در تصفیه

آب های آلوده تبدیل کرده است. این کار بستری را برای توسعه آینده یک سیستم فیلتراسیون کارآمد با استفاده از پوست مرکبات

به عنوان یک جاذب زیستی ارزان، جدید و پایدار برای تصفیه آب آلوده به سلنیوم (IV) فراهم می کند [۲۹]. در مطالعه دی^۵ و

همکاران (۲۰۲۱) پوست پرتقال به عنوان یک جاذب زیستی بسیار مؤثر و ارزان قیمت برای حذف نیترات و آمونیاک از آب های

زیرزمینی استفاده شد. جذب زیستی بهینه آمونیاک و نیترات توسط جاذب زیستی پوست پرتقال در $\text{pH}=5/5$ ، زمان تماس ۶۰

¹ Rani

² Januário

³ Safranin orange

⁴ Dev

⁵ Dey

دقیقه، دما 35°C و سرعت هم زدن 90 rpm به دست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که جاذب زیستی پوست پرتقال یکی از بهترین جاذب‌های زیستی برای حذف آمونیاک و نیترات موجود در آب است [۲۴]. در یک مطالعه احمدی (۱۴۰۳)، از پوست لیمو به عنوان جاذب زیستی طبیعی برای کاهش کدورت شیرۀ انگور استفاده کرد. آزمایش‌ها با ۲ گرم جاذب و ۴۰ میلی‌لیتر شیرۀ انگور با بریکس اولیه ۱۰ انجام گرفت. فرآیند جذب به صورت ناپیوسته و با طراحی سطح پاسخ در بازه دمایی 20°C تا 60°C و سرعت هم‌زدن ۲۰۰ تا 600 rpm به مدت ۴ ساعت بررسی شد. شرایط بهینه شامل دمای 35°C و سرعت هم‌زدن 380 rpm بود که در آن بیشترین درصد حذف کدورت (حدود ۵۸ درصد) حاصل شد. این نتایج، پوست لیمو را به عنوان جاذبی مؤثر، طبیعی و سازگار با محیط زیست برای بهبود کیفیت شیرۀ انگور معرفی می‌کنند [۳۰]. حاتمی کیا و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی به بررسی تأثیر انواع مواد زلال‌کننده بر کیفیت شیرۀ انگور پرداخت. در این مطالعه، شش ترکیب مختلف شامل خاک شیرۀ، بتونیت، سیلیکاسل، ژلاتین-بتونیت، ژلاتین-سیلیکاسل و ژلاتین-بتونیت-سیلیکاسل در سه سطح غلظت مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از بتونیت و سیلیکاسل، به ویژه در ترکیب با ژلاتین، موجب افزایش شفافیت و کاهش کدورت شیرۀ انگور می‌شود. تیمار ژلاتین-بتونیت-سیلیکاسل با ترکیب بهینه ۲ درصد ژلاتین، ۴ درصد بتونیت و ۷ درصد سیلیکاسل، بالاترین شفافیت و کمترین کدورت را بدون افت محسوس در ویژگی‌های کیفی نظیر pH، اسیدیته، بریکس و ماده خشک کل ارائه داد. این ترکیب به عنوان گزینه مناسب برای شفاف‌سازی شیرۀ انگور معرفی شد [۳۱]. سعد عبدالکریم جاسم و همکاران (۲۰۲۵) در یک مطالعه، از پوست لیموی طبیعی به عنوان جاذب زیستی کم‌هزینه برای حذف رنگ و کدورت از شیرۀ خرما استفاده کردند. فرآیند بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ (RSM) و با در نظر گرفتن دما و سرعت هم‌زدن انجام گرفت. شرایط بهینه (۵۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۱ دور در دقیقه) منجر به حذف ۵۰/۶ درصد رنگ و کدورت شد، در حالی که کاهش بریکس تنها ۷ درصد بود. همچنین، اندازه ذرات به طور قابل توجهی کاهش یافت و شفافیت محصول بهبود پیدا کرد. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای پوست لیمو در بهبود کیفیت ظاهری شیرۀ‌های گیاهی است [۳۲].

در نهایت، با توجه به گستردگی و در دسترس بودن پوست مرکبات در کشورهای تولیدکننده، مانند ایران، استفاده از این منابع می‌تواند به عنوان جایگزینی عملی و مقرون به صرفه برای روش‌های شیمیایی تلقی شود. مطالعات قبلی اثربخشی برخی جاذب‌های طبیعی را در حذف رنگ، فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار از محلول‌های آبی نشان داده‌اند. با این حال کاربرد آن‌ها در فرآیند

شفاف‌سازی شیرهای میوه‌جات کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات در حذف کدورت از شیرهای انجیر و انگور طراحی شده است. در این مسیر، آنالیزهای پیشرفته شامل تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱، تبدیل فوریه مادون قرمز^۲، جذب-واجذب نیتروژن^۳ و طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس^۴ به ترتیب جهت تحلیل ساختار میکروسکوپی، شناسایی گروه‌های عاملی، تعیین سطح ویژه و بررسی عناصر تشکیل‌دهنده سطح جاذب‌ها انجام گرفته و عملکرد و کارایی این بیوجاذب‌ها در شفاف‌سازی شیرهای انگور و انجیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در ادامه پس از تعیین جاذب‌زیستی و شیر به بالاترین بازده جذب، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی مؤثر در فرآیند جذب سطحی شامل نوع جاذب، زمان تماس، مقدار جاذب، میزان ژلاتین و pH محلول به جهت دستیابی به بالاترین میزان کدورت‌زدایی صورت گرفت. این پژوهش با تمرکز بر استفاده از منابع زیستی ارزان‌قیمت، ارائه راهکاری عملی برای بهبود ویژگی‌های ظاهری شیرهای گیاهی و ارتقاء پایداری زیست‌محیطی فرآیندهای تصفیه غذایی، می‌کوشد تا مسیر جدیدی در توسعه فناوری‌های سبز و قابل‌تعمیم به مقیاس صنعتی معرفی نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش پوست مرکبات که شامل: نارنگی، لیمو و پرتقال است به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفتند. شیر انگور و انجیر نیز به عنوان ماده اولیه جهت کدورت‌زدایی انتخاب شدند. علاوه بر این ژلاتین (فرمند) و آب دوبار تقطیر نیز به ترتیب به عنوان ماده کمکی و رقیق‌کننده استفاده شدند. تقریباً تمامی ترکیبات مورد استفاده در این تحقیق مواد خوراکی و پسماند میوه‌جات در دسترس و موجود در بازار بودند که عموماً بدون هیچ عملیات بازیابی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- آماده‌سازی جاذب زیستی

پوست مرکبات مختلف شامل لیمو، نارنگی و پرتقال که در پژوهش حاضر استفاده شده است، پس از جداسازی از میوه و بخش خوراکی آن به عنوان ماده اولیه جهت ساخت جاذب طبیعی استفاده گردید. بدین منظور، ابتدا پوست‌ها در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک گردیدند تا رطوبت آن‌ها به طور کامل گرفته شود. سپس، پوست‌های خشک‌شده به دقت خرد شده و از

^۱ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

^۲ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

^۳ N₂ Adsorption-Desorption

^۴ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

الک عبور داده شدند تا به اندازه‌های یکنواخت و یکدستی تبدیل شوند. در ادامه این جاذب‌ها آماده استفاده در فرآیند جذب می- باشند.

۳-۲- آماده‌سازی محلول شیریه میوه‌جات

شیره انگور و شیریه انجیر تهیه شده در پژوهش حاضر که به منظور کدورت‌زدایی انتخاب شده‌اند، دارای غلظت و بریکس بالایی بوده (شیره انگور ۷۵/۷۷ و شیریه انجیر ۷۸/۷۲) و به همین دلیل لازم است پیش از انجام آزمایشات کدورت‌زدایی، بریکس آن از طریق رقیق‌سازی با آب مقطر، تنظیم گردد. از این‌رو، غلظت شیریه انگور و شیریه انجیر با استفاده از آب مقطر کاهش داده شد. با توجه به مشاهدات و همچنین مطالعات انجام شده در تحقیقات پیشین، بریکس مورد استفاده در فرآیند کدورت‌زدایی، مقدار بریکس ۵ انتخاب گردید و بریکس هر دو شیریه انگور و شیریه انجیر با استفاده از رقیق‌سازی با آب مقطر و به کمک دستگاه رفراکتومتر بر روی بریکس ۵ تنظیم گردید.

۴-۲- روش‌های تعیین خصوصیات جاذب‌های زیستی

به منظور بررسی مورفولوژی و خصوصیات ساختاری جاذب‌های زیستی آماده شده از آنالیز FESEM استفاده گردید. جهت انجام این آنالیز از دستگاه کمپانی TESCAN مدل MIRA III ساخت کشور جمهوری چک بهره گرفته شد. افزون بر این، به جهت بررسی ماهیت و کمیت عناصر و توزیع آن‌ها در ساختار نمونه‌ها از آنالیز EDX استفاده شد. به منظور شناسایی گروه‌های عملکردی سطح جاذب‌ها، طیف‌سنجی FTIR در محدوده $4000-400\text{ cm}^{-1}$ انجام شد. برای شناسایی توزیع حجم منافذ و مساحت سطح جاذب‌های زیستی از تجزیه و تحلیل جذب-دفع گاز نیتروژن بر اساس مدل‌های Barrett-Joyner-Halenda (BJH) و Brunauer-Emmett-Teller (BET) با استفاده از دستگاه Belsorp مدل Mini2 ساخت کشور ژاپن بهره گرفته شده است.

۵-۲- ارزیابی میزان کدورت‌زدایی شیریه میوه‌جات با استفاده از جاذب‌های زیستی

به منظور ارزیابی عملکرد جاذب‌ها در فرآیند کدورت‌زدایی شیریه انگور و انجیر، بعد از تنظیم بریکس شیریه‌ها، به ۵۰ سی‌سی از محلول شیریه انگور و یا شیریه انجیر با بریکس ۵، مقدار 0.09 g ژلاتین اضافه کرده و به مدت ۱۵ دقیقه هم‌زده شد تا ژلاتین هضم گردد. سپس مقدار مشخصی از جاذب زیستی (پوست لیمو، پرتقال یا نارنگی) را به آن افزوده و به مدت زمان ۴ ساعت تحت اختلاط قرار گرفت. در نهایت، جاذب‌ها به کمک کاغذ صافی از محلول جدا شده و جهت حصول اطمینان از جداسازی کامل ذرات جامد، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه با دور 4000 rpm سانتریفیوژ شدند. نتایج طیف‌سنجی نور مرئی-فرابنفش به منظور

دستیابی به میزان حذف کدورت با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Pg instruments t80+ و در طول موج ۶۲۵ nm انجام گرفت.

جهت محاسبه بازده حذف کدورت جاذب‌های مختلف معادله (۱) مورد استفاده قرار گرفت [۳۳]:

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این معادلات C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه شیر میوه‌جات و غلظت شیر میوه‌جات در زمان t است.

۶-۲- بهینه‌سازی فاکتورهای عملیاتی

به جهت دستیابی به حداکثر بازده در کدورت‌زدایی شیر انجیر، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فرآیند جذب سطحی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از روش «یک فاکتور در یک زمان» (One-Factor-at-a-Time, OFAT)

طراحی و اجرا گردید تا اثر متغیرهای مستقل به صورت مجزا ارزیابی شود. جدول ۱، جزئیات پارامترهای کلیدی

مؤثر در فرآیند حذف کدورت از شیر میوه‌جات را به همراه محدوده تغییرات به کاررفته برای هر پارامتر در مطالعات تجربی نشان

می‌دهد.

جدول ۱: جزئیات پارامترهای کلیدی جهت بهینه‌سازی شرایط عملیاتی.

پارامتر	واحد	محدوده
زمان تماس	دقیقه	۲۴۰-۳۰
مقدار جاذب زیستی	گرم	۰/۱ - ۰/۴
مقدار ژلاتین	گرم	۰/۰۰۹ - ۰/۰۲۷
pH محلول	—	۱-۴

به جهت تنظیم pH محلول از محلول‌های NaOH و HCl یک مولار بهره گرفته شد. در تمام آزمایش‌ها، سایر عوامل ثابت نگه

داشته شدند تا اثر مستقل هر متغیر بر عملکرد جاذب زیستی منتخب به دقت بررسی شود. از طریق پایش تغییرات بازده حذف

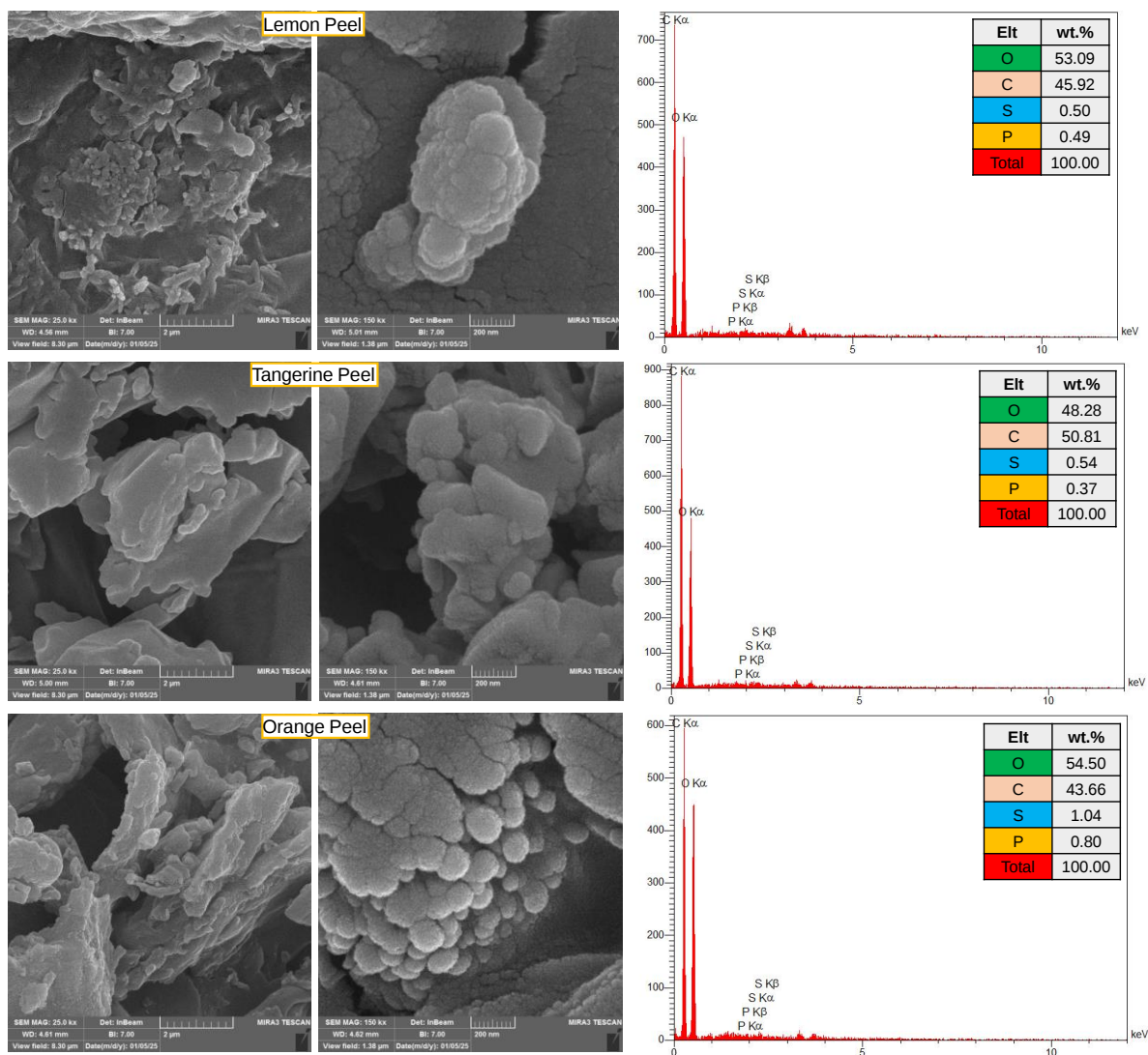
تحت شرایط مختلف، شرایط بهینه برای شفاف‌سازی مؤثر و تعیین زمان تعادلی فرآیند استخراج گردید.

۳- نتایج و بحث‌ها

۱-۳- آنالیز FESEM/EDX جاذب‌های زیستی

مورفولوژی جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات لیمو، نارنگی و پرتقال توسط آنالیز FESEM مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر مربوط به نتایج این آنالیز با بزرگنمایی‌های ۲ میکرون و ۲۰۰ نانومتر در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه به تصاویر می‌توان دریافت که جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات دارای سطحی ناهموار با مورفولوژی و شکل نامنظم هستند. با مقایسه تصاویر سه نوع جاذب پوست لیمو، نارنگی و پرتقال می‌توان دریافت که جاذب حاصل از پوست لیمو دارای ساختاری بسیار متراکم و فشرده در مقایسه با دو نمونه پوست پرتقال و نارنگی می‌باشد. این در حالی است که در نمونه‌های پوست پرتقال و نارنگی ساختاری نسبتاً متخلخل مشاهده می‌شود که این تخلخل در نمونه پوست پرتقال مشهودتر است. همچنین ساختار نمونه‌های زیستی حاصل از پوست لیمو و نارنگی دارای کلوخه‌ها و انباشتگی‌های قابل توجهی است که این امر در نمونه پوست پرتقال دیده نمی‌شود و ذرات در این نمونه، فاقد تجمع و کلوخه می‌باشند. سطح متخلخل و مورفولوژی نسبتاً یکنواخت‌تر جاذب زیستی پوست پرتقال امکان عملکرد مناسب را در فرآیند جذب سطحی شیره میوه‌جات فراهم می‌نماید که این امر منجر به افزایش احتمالی بازده کدورت‌زدایی توسط این جاذب می‌گردد.

نتایج آنالیز EDX به منظور مطالعه ماهیت و کمیت عناصر موجود در نمونه‌های طبیعی و زیستی پوست مرکبات در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه به اینکه پوست مرکبات عمدتاً از ترکیبات آلی همچون سلولز، همی سلولز، پکتین و لیگنین تشکیل شده است، لذا عناصر شناسایی شده در ساختار این نمونه‌ها می‌بایست عمدتاً شامل عناصر کربن و اکسیژن باشند که اجزای اصلی ترکیبات آلی و پلی ساکاریدها را تشکیل می‌دهند. همانطور که مشخص است، نتایج آنالیز EDX برای هر سه نمونه پوست مرکبات مؤید درصد بالای عناصر کربن و اکسیژن در این نمونه‌ها می‌باشد. حضور مقادیر کم عناصری همچون گوگرد و فسفر در ترکیب هر سه نمونه پوست لیمو، نارنگی و پرتقال را می‌توان ناشی از متابولیسم گیاه یا کودها دانست. همچنین شایان ذکر است که عدم حضور ترکیبات و عناصر معدنی چون منیزیم، کلسیم و پتاسیم در نتایج آنالیز EDX نمونه‌ها، ممکن است به دلیل مقدار بسیار کم این عناصر در ترکیب پوست مرکبات باشد که دستگاه قادر به تشخیص این مقادیر کم نبوده است. حضور عناصر معدنی از متابولیسم گیاه و خاک زراعی نشأت می‌گیرد که مقدار بسیار ناچیز آن‌ها می‌تواند به دلیل رشد گیاه در خاکی فقیر از مواد معدنی، آبیاری نامناسب گیاه و یا جذب کم مواد معدنی توسط گیاه باشد.



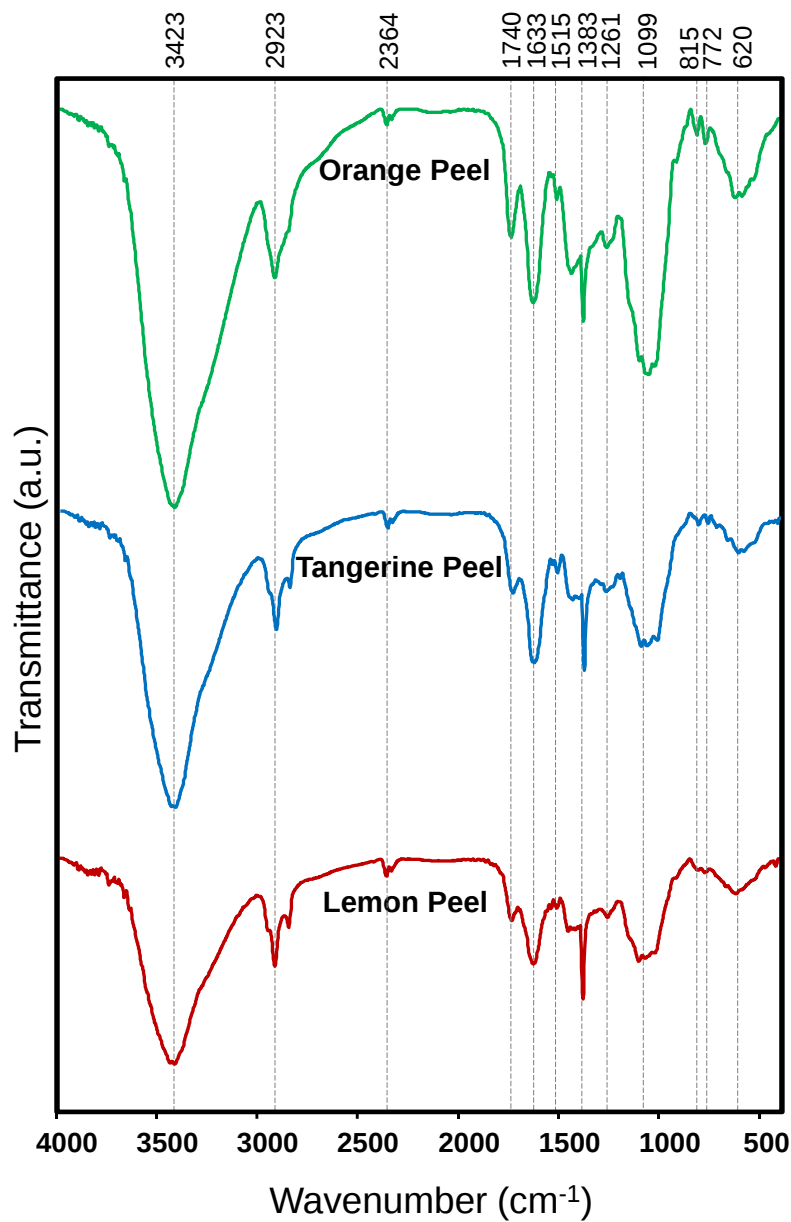
شکل ۱: تصاویر FESEM و آنالیز EDX جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات.

Figure 1: FESEM images and EDX analysis of biosorbents derived from citrus peel

۲-۳- آنالیز FTIR جاذب‌های زیستی

به منظور شناسایی و ارزیابی گروه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی موجود در جاذب‌های زیستی پوست لیمو، نارنگی و پرتقال از آنالیز FTIR استفاده شد، که نتایج حاصل از این آنالیز برای هر سه نمونه در محدوده طول موج $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ در شکل (۲) ارائه شده است. بررسی اجمالی طیف‌های IR برای هر سه نوع جاذب زیستی نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت یکسان گروه‌های عاملی، تقریباً نوارهای جذب مشابهی در طول موج‌های $815, 1099, 1383, 1515, 1633, 1740, 2923, 3423 \text{ cm}^{-1}$

۷۷۲ و ۶۲۰ برای تمامی نمونه‌ها قابل تشخیص می‌باشد. پیک‌های مشاهده شده در طول موج 3423 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوند O-H می‌باشد، که می‌تواند ناشی از آب جذب شده به صورت فیزیکی و همچنین حضور پلی‌ساکاریدها (سلولز، همی‌سلولز) و ترکیبات الکلی و فنولی باشد. در تمامی نمونه‌ها، نوار جذبی در طول موج 2923 cm^{-1} ظاهر می‌شود که به حالت کششی پیوند C-H در گروه‌های عاملی متیل و متیلن نسبت داده می‌شود که می‌تواند مربوط به وجود لیپیدها، هیدروکربن‌ها و زنجیره‌های جانبی پلی‌ساکاریدها در ساختار جاذب‌های زیستی باشد. شایان ذکر است که پیک نسبتاً ضعیف مشاهده شده در طول موج 2364 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاشات پیوند $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ ناشی از مولکول‌های دی اکسید کربن اتمسفر مربوط دانست. نوار جذب موجود در طول موج 1740 cm^{-1} بیانگر ارتعاش $\text{C}=\text{O}$ کششی و مربوط به گروه‌های کربونیل ناشی از استرهای پکتین، لیپیدها و اسیدهای چرب است. پیک‌های مشاهده شده در طول موج‌های 1633 cm^{-1} و 1515 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی $\text{C}=\text{C}$ گروه‌های عاملی آروماتیک موجود در ترکیبات فنولی و لیگنین می‌باشند. نوار جذب دیده شده در طول موج 1383 cm^{-1} می‌تواند مربوط به CH_2 خمشی ناشی از وجود لیپیدها و پروتئین‌ها در ساختار جاذب‌های زیستی باشد. بعلاوه حضور پیک‌هایی در طول موج‌های 1261 cm^{-1} و 1099 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی C-O گروه‌های اتری یا استری می‌باشد که به دلیل وجود پکتین و ترکیبات پلی ساکاریدی در ساختار است. حضور پیک‌هایی در فرکانس‌های پایین (زیر 1000 cm^{-1}) که در طیف FTIR تمامی نمونه‌های زیستی مشاهده می‌شود، بیانگر ارتعاشات خمشی پیوند C-H در آروماتیک‌ها و ناشی از حضور ترکیبات فنولی و مونوترپن‌ها (لیمونن) می‌باشند. شایان ذکر است که گروه عاملی اتر دارای نیروی جاذبه الکترواستاتیکی بالایی است که این امر در فرآیند جذب سطحی می‌تواند اثرگذار باشد. همچنین جاذب‌های زیستی حاوی گروه‌های عاملی کربونیل و هیدروکسیل بوده که می‌تواند نشان‌دهنده حضور گروه کربوکسیل باشد. گروه‌های کربوکسیل متعلق به الک‌ها بوده و میل بالایی به جذب از خود نشان می‌دهند. بعلاوه حضور گروه‌های کربونیل در ساختار جاذب‌ها، امکان پیوند هیدروژنی آن‌ها را با ترکیبات هدف فراهم نموده و بازدهی فرآیند جذب سطحی را بهبود می‌بخشد. همانطور که از نتایج آنالیز FTIR ترکیبات پوست لیمو، نارنگی و پرتقال مشخص است، طیف-های مشابهی برای هر سه نوع مرکبات مشاهده گردید اما شدت بسیاری از پیک‌ها از جمله پیک‌های مربوط به گروه‌های عاملی کربونیل، هیدروکسیل و ترکیبات اتری در نمونه پوست پرتقال بیشتر است که این امر می‌تواند به عملکرد نسبی بهتر این ماده نسبت به دو جاذب زیستی دیگر در فرآیند کلدورت‌زدایی شیره میوه‌جات، کمک نماید [۳۴ و ۳۵].



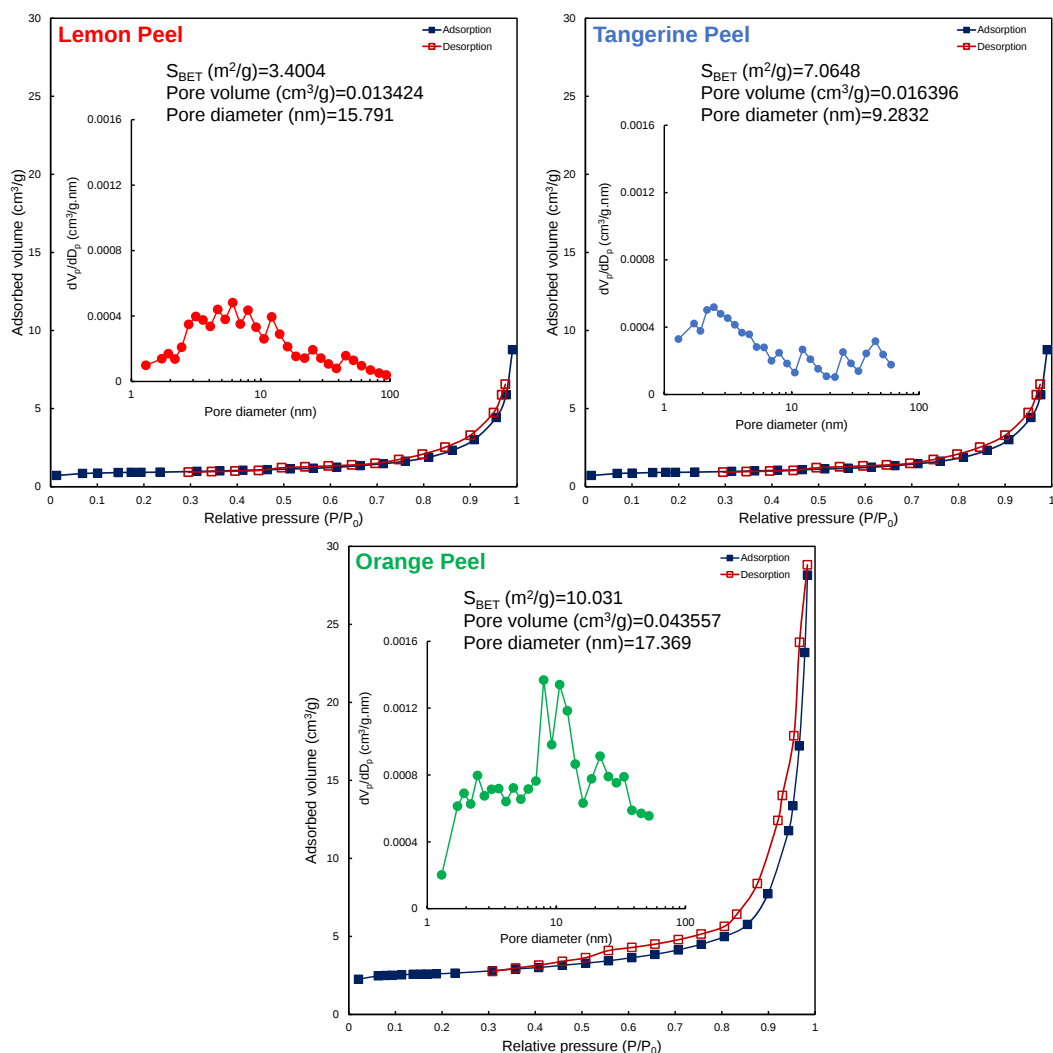
شکل ۲: طیف‌سنجی FTIR جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات.

Figure 2: FTIR spectroscopy of biosorbents obtained from citrus peel.

۳-۳- آنالیز جذب-وا جذب نیتروژن جاذب‌های زیستی

عملکرد جاذب‌های زیستی به طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی نظیر مساحت سطح ویژه، حجم کل و قطر حفرات ساختاری آن‌ها قرار دارد. به منظور بررسی این خصوصیات در نمونه‌های زیستی، آزمون جذب و واجذب نیتروژن به عنوان یکی

از روش‌های استاندارد مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های حاصل از این آنالیز شامل اطلاعاتی در خصوص ایزوترم‌های جذب و واجذب، سطح ویژه، قطر و حجم حفرات و نحوه توزیع اندازه آن‌ها بوده و در شکل (۳) ارائه شده‌اند. برای انجام این آنالیز، نمونه‌ها به مدت دو ساعت تحت شرایط خلأ قرار گرفتند تا پیش‌تیمار مناسبی جهت حذف مولکول‌های سطحی حاصل شود. محاسبه‌ی مساحت سطح ویژه براساس مدل BET و با استفاده از داده‌های حاصل از جذب-واجذب نیتروژن انجام شد. همچنین جهت تعیین حجم و توزیع اندازه حفرات، مدل BJH مورد استفاده قرار گرفت. مطابق طبقه‌بندی IUPAC، مواد دارای ساختار حفره‌ای در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند: میکروحفره‌ها با قطر کمتر از ۲ نانومتر، مزوحفره‌ها با قطر در محدوده‌ی ۲ تا ۵۰ نانومتر، و ماکروحفره‌ها با قطر بیش از ۵۰ نانومتر. با تحلیل نتایج حاصل از نمودار توزیع اندازه قطر حفرات، مشخص می‌گردد که در تمامی نمونه‌ها، بیشترین فراوانی حفرات در محدوده‌ی ۲ تا ۵۰ nm مشاهده شده است. بنابراین، با استناد به معیارهای طبقه‌بندی ساختارهای متخلخل، می‌توان این مواد را در گروه مزوحفره‌ها دسته‌بندی نمود. با تطبیق طبقه‌بندی رسمی IUPAC با نمودارهای هیستریسی حاصل از آزمون جذب-واجذب نیتروژن، مشخص گردید که تمامی نمونه‌ها دارای ایزوترم‌هایی از نوع V و منحنی‌های هیستریس دسته H4 هستند. این الگوی جذب بیانگر ویژگی‌های ساختاری مزوحفره‌ای جاذب‌های زیستی بوده و بر وجود حفرات مزو در ساختار منافذ آن‌ها دلالت دارد. علاوه بر این، شکل منحنی‌ها نشان‌دهنده هندسه مخروطی‌مانند حفرات بوده که می‌تواند بر نحوه عملکرد و انتقال ماده درون ساختار جاذب زیستی تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز BET، مساحت سطح ویژه جاذب‌های زیستی تهیه‌شده از پوست لیمو، نارنگی و پرتقال به ترتیب برابر با ۳، ۷ و $10 \text{ m}^2/\text{g}$ تعیین گردید. این تفاوت چشمگیر در سطح ویژه بیانگر تنوع در ساختارهای سطحی و میزان تخلخل این جاذب‌هاست. در میان نمونه‌های مورد بررسی، پوست پرتقال بالاترین سطح ویژه را داراست که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های ساختاری مطلوب آن برای فرآیند جذب باشد. افزایش سطح ویژه این نمونه احتمالاً ناشی از دو عامل اصلی است: حجم بالاتر حفرات سطحی نسبت به پوست‌های نارنگی و لیمو، که منجر به افزایش فضای سطحی در دسترس برای جذب ذرات کدورت می‌شود. مورفولوژی یکنواخت‌تر و ساختار متخلخل‌تر که پیش‌تر توسط آنالیز FESEM تأیید گردیده است. این ویژگی‌ها موجب افزایش تماس مؤثر بین سطح جاذب و ذرات آلاینده می‌گردند. با توجه به خصوصیات ساختاری ذکر شده، انتظار می‌رود که پوست پرتقال در حذف کدورت، عملکرد مؤثرتری نسبت به پوست‌های لیمو و نارنگی از خود نشان دهد [۳۶ و ۳۷].



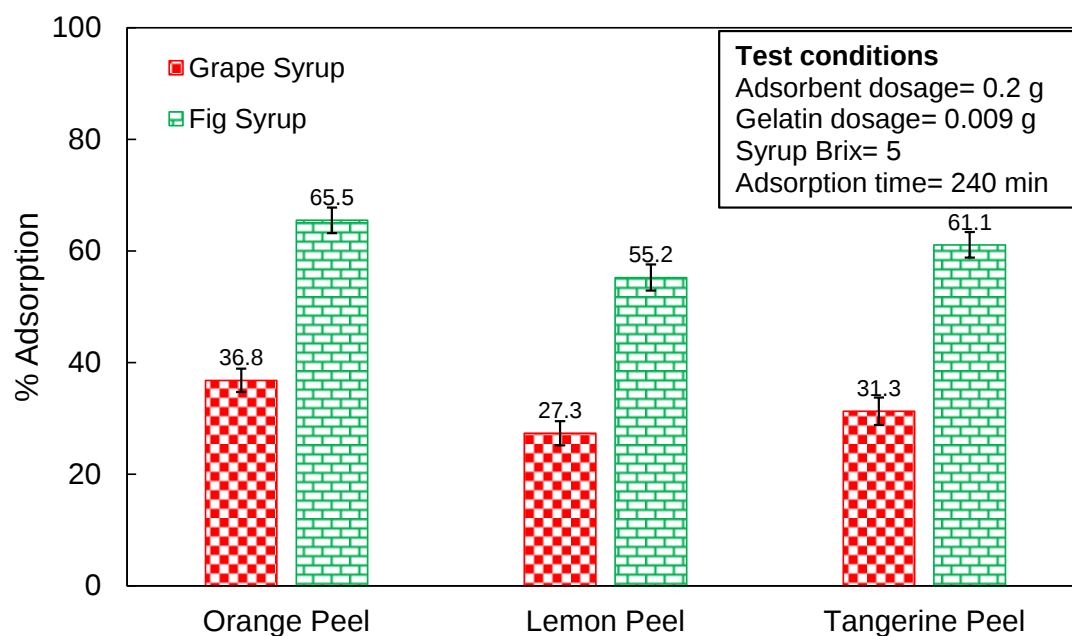
شکل ۲: ایزوترم‌های جذب-دفع نیتروژن و نمودار توزیع اندازه قطر حفرات جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات.

Figure 3: N_2 adsorption-desorption isotherms and pore diameter size distribution diagram of biosorbents derived from citrus peel.

۳-۴- ارزیابی عملکرد جاذب‌های زیستی پوست مرکبات در کدورت‌زدایی شیره میوه‌جات

پس از ارزیابی خصوصیات ساختاری و بافتی جاذب‌ها، عملکرد جاذب‌های زیستی حاصل از پوست لیمو، نارنگی و پرتقال در فرآیند کدورت‌زدایی شیره‌های انگور و انجیر مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در انجام آزمایشات کدورت‌زدایی شیره میوه‌جات سعی شد تا با ثابت نگه داشتن شرایط عملیاتی با مقدار جاذب $0.2/g$ ، مقدار ژلاتین g 0.09 ، بریکس شیره 5 و مدت زمان 4 ساعت، تاثیر نوع جاذب زیستی حاصل از پوست مرکبات در شفاف‌سازی هر دو شیره

انگور و انجیر به خوبی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج تست‌های جذب نشان داد که در حالت کلی هر سه نوع جاذب در کدورت-زدایی شیره انجیر نسبت به شیره انگور موفق‌تر عمل کردند. از طرف دیگر با مقایسه نتایج درصد جذب می‌توان دریافت که در میان سه جاذب زیستی مختلف، جاذب حاصل از پوست پرتقال بهترین عملکرد را در شفاف‌سازی شیره‌ها از خود نشان داده است. این بازدهی بالاتر و عملکرد بهتر جاذب پوست پرتقال را می‌توان به ساختار یکنواخت‌تر با تخلخل بیشتر و کلوخه‌های کمتر در این نمونه نسبت به دو نمونه پوست نارنگی و به ویژه پوست لیمو دانست. همچنین شدت بیشتر پیک‌های مربوط به گروه‌های عاملی تأثیرگذار در فرآیند جذب سطحی (کربونیل، هیدروکسیل و ترکیبات اتری و استری) در نمونه پوست پرتقال نسبت به دو جاذب دیگر در بازدهی بالاتر این جاذب، نقش بسیار مؤثری دارد. بعلاوه مساحت سطح جاذب همواره به عنوان یکی از فاکتورهای کلیدی و اثرگذار در عملکرد جاذب شناخته می‌شود که در این پژوهش، مساحت سطح بالاتر جاذب پوست پرتقال می‌تواند دلیل مهم دیگری جهت توجیه تفاوت و بهبود عملکرد این جاذب نسبت به جاذب‌های پوست لیمو و نارنگی باشد. از این‌رو در ادامه تحقیق و جهت تکمیل مطالعات بر روی پارامترهای عملیاتی مؤثر در فرآیند کدورت‌زدایی شیره میوه‌جات، جاذب زیستی پوست پرتقال به عنوان جاذب بهینه در نظر گرفته شد.



شکل ۳. میزان کدورت‌زدایی شیره انجیر و انگور توسط جاذب‌های زیستی حاصل از پوست مرکبات.

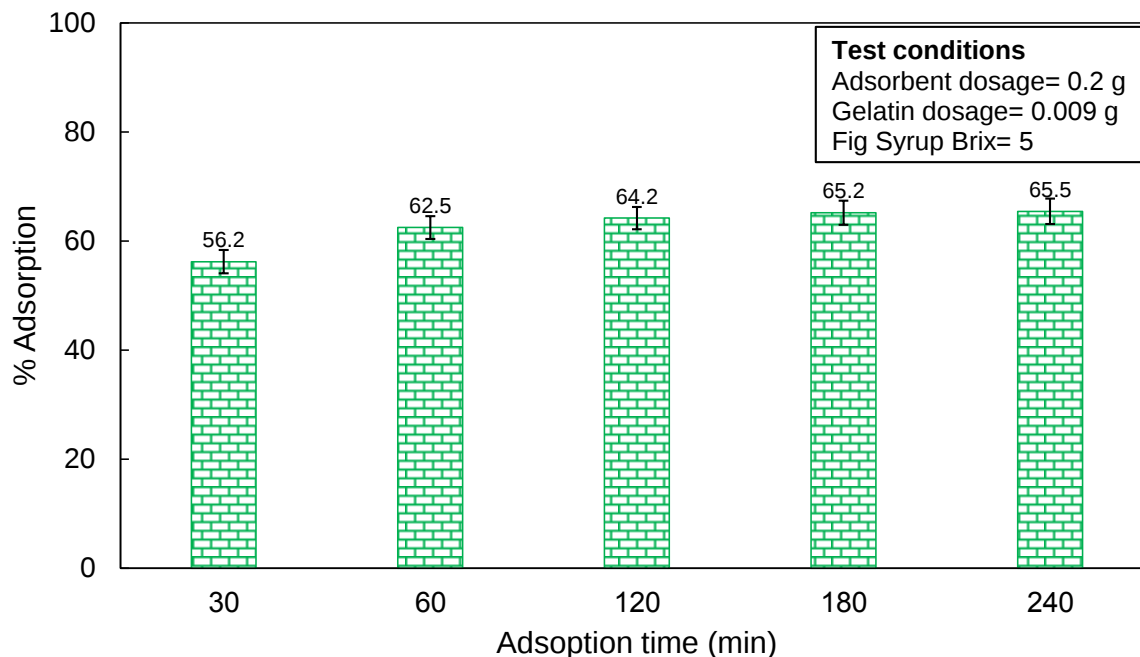
Figure 4: Turbidity removal efficiency of fig and grape syrups using biosorbents derived from citrus peels.

۵-۳- بررسی پارامترهای عملیاتی مؤثر بر بازده فرآیند کدورت‌زدایی شیره انجیر

علاوه بر نوع جاذب مورد استفاده، پارامترهای عملیاتی مختلفی در فرآیند شفاف‌سازی شیره میوه‌جات بر بازدهی و عملکرد جاذب مورد نظر تأثیر می‌گذارند. از این‌رو تلاش گردید تا با تغییر شرایط عملیاتی مختلف مانند زمان تماس، مقدار جاذب، مقدار ژلاتین و pH محلول شیره با استفاده از روش یک فاکتور در یک زمان (OFAT)، اثرگذاری این عوامل بر بازدهی فرآیند کدورت-زدایی شیره انجیر با استفاده از جاذب زیستی پوست پرتقال بررسی و شرایط عملیاتی بهینه تعیین گردد.

۳-۵-۱- اثر زمان تماس

اثر زمان تماس بین جاذب پوست پرتقال و محلول شیره انجیر در بازه زمانی ۳۰ min تا ۲۴۰ با ثابت نگه داشتن سایر شرایط عملیاتی (مقدار جاذب ۰/۲ g، مقدار ژلاتین ۰/۰۰۹ g، بریکس شیره انجیر ۵ و pH محلول) بررسی و نتایج آن در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش زمان تماس بین جاذب و محلول شیره از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه مقدار جذب افزایش یافت و در ادامه با گذشت زمان بیشتر، تغییر چندانی در میزان شفاف‌سازی ایجاد نشد. در فرآیند جذب سطحی بعد از گذشت مدت زمان مشخصی، افزایش زمان تأثیر معناداری بر فرآیند جذب ندارد و منحنی جذب به تعادل می‌رسد، چراکه در شروع فرآیند، به دلیل خالی بودن سایت‌های فعال جاذب، سرعت جذب بالاست و با گذشت زمان و اشباع تدریجی مکان‌های فعال جاذب، ماده جذب‌شونده شروع به واجذب می‌کند و در نقطه تعادل سرعت جذب و واجذب برابر می‌شود و در نتیجه افزایش زمان، تغییری در مقدار کلی جذب ایجاد نمی‌کند. از دیدگاه سینتیکی نیز، در مراحل پایانی جذب، فرآیند توسط مکانیسم نفوذ درون ذره‌ای کنترل می‌شود که مولکول‌ها می‌بایست به جایگاه‌های عمیق‌تری در درون حفره‌های جاذب نفوذ کنند که این امر، پدیده‌ای بسیار کند است و ممکن است ساعت‌ها به طول بینجامد و سهم بسیار ناچیزی هم در فرآیند جذب کلی داشته باشد و به این ترتیب است که پس از اشباع و در مراحل پایانی جذب، افزایش زمان تأثیر قابل توجهی بر میزان جذب کلی نخواهد داشت. از این‌رو در ادامه و به منظور بررسی اثر سایر پارامترهای عملیاتی، به منظور جلوگیری از اتلاف زمان و انرژی، آزمایش‌ها در زمان تعادلی ۶۰ دقیقه انجام شد.



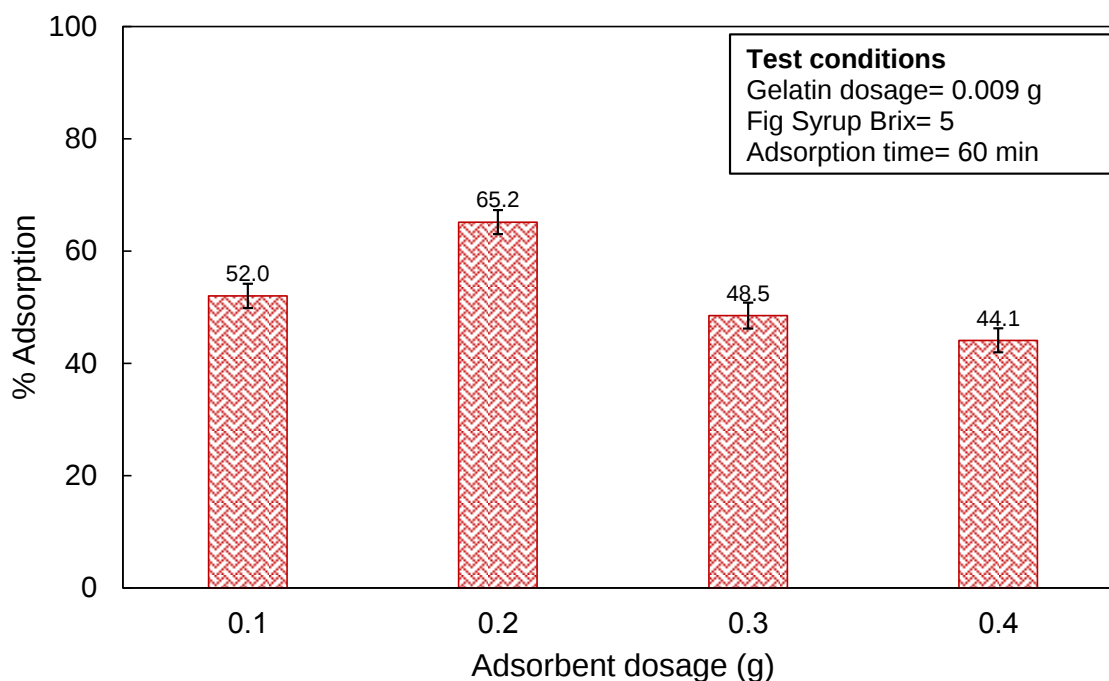
شکل ۴: بررسی اثر زمان تماس بر فرآیند کدورت‌زدایی شیر انجیر توسط جاذب زیستی پوست پرتقال.

Figure 5: Effect of contact time on the turbidity removal process of fig syrup using orange peel biosorbent.

۳-۵-۲- اثر مقدار جاذب پوست پرتقال

پس از تعیین زمان تعادلی در فرآیند جذب سطحی، در این بخش اثر تغییر مقدار جاذب بهینه پوست پرتقال بر روی شفاف-سازی شیر انجیر مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور تاثیر تغییرات مقدار جاذب در بازه 0.1 g تا 0.4 g با ثابت نگه‌داشتن سایر شرایط عملیاتی (زمان تماس 60 min، مقدار ژلاتین 0.009 g، بریکس شیر انجیر 5 و pH محلول) ارزیابی و نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شد. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش مقدار جاذب از 0.1 g تا 0.2 g مقدار جذب، افزایش پیدا کرد چراکه با افزایش جرم جاذب، تعداد مکان‌های فعال جذب و سطح در دسترس برای فرآیند جذب، افزایش می‌یابد و هر واحد از ماده جذب‌شونده، جایگاه‌های بیشتری برای جذب دارد. در ادامه با افزایش مقدار جاذب از 0.2 g تا 0.4 g، درصد جذب کاهش یافت که این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش جرم جاذب، تمایل ذرات به تجمع و انباشتگی بیشتر شده که این امر منجر به کاهش سطح مؤثر جذب، مسدود شدن حفره‌ها و کاهش دسترسی به مکان‌های فعال جاذب می‌گردد. همچنین حضور جاذب اضافی می‌تواند باعث توزیع نامتوازن ماده جذب‌شونده گردد به طوری‌که بعضی از مکان‌های فعال جذب کاملاً پر شده در

حالی که بسیاری از آن‌ها خالی باقی می‌مانند. با توجه به نتایج این بخش، در ادامه مطالعات پارامترهای عملیاتی مؤثر در فرآیند کدورت‌زدایی، مقدار ۰/۲ g از جاذب زیستی پوست پرتقال مورد استفاده قرار گرفت.



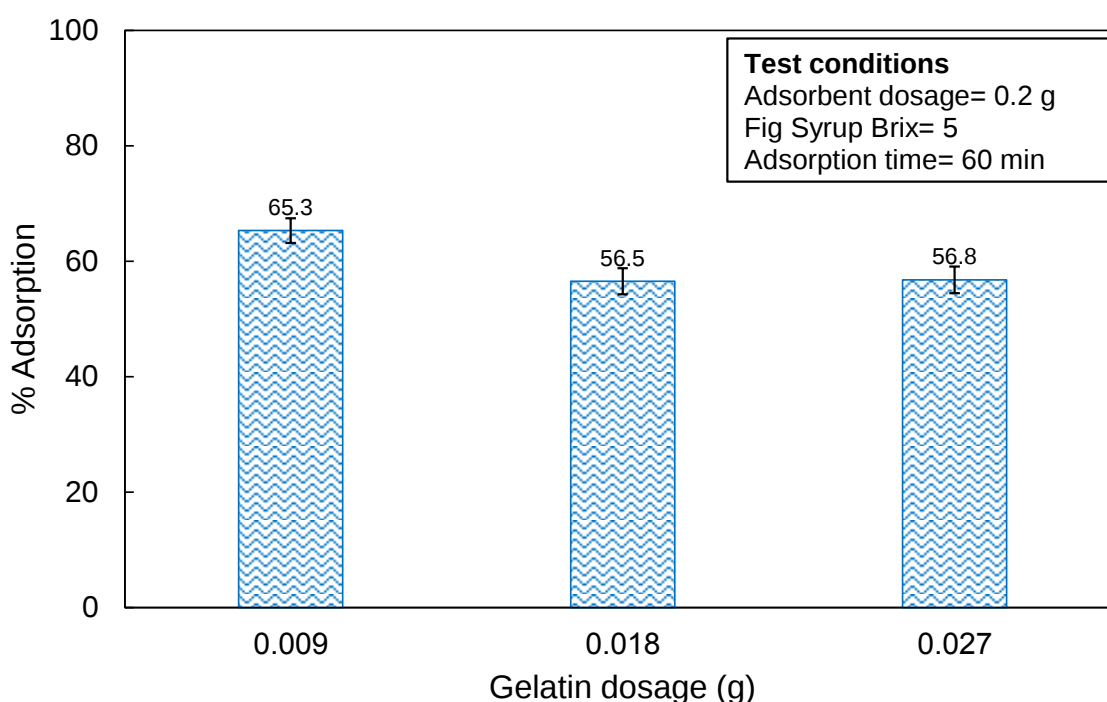
شکل ۵: بررسی اثر مقدار جاذب بر فرآیند کدورت‌زدایی شیر انجیر توسط جاذب زیستی پوست پرتقال.

Figure 6: Effect of adsorbent dosage on the turbidity removal process of fig syrup using orange peel biosorbent.

۳-۵-۳- اثر مقدار ژلاتین

ژلاتین به عنوان یک کمک صافی طبیعی، نقش بسیار کلیدی در شفاف‌سازی آبمیوه‌ها و شیر میوه‌جات دارد و طبیعتاً اثرگذاری آن به مقدار مصرفی این ماده شدیداً وابسته است. از این‌رو در این بخش اثر مقدار ژلاتین مصرفی در محدوده ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۲۷ g و با ثابت نگه داشتن سایر شرایط عملیاتی (زمان تماس ۶۰ min، مقدار جاذب ۰/۲ g، بریکس شیر انجیر ۵ و pH محلول) بررسی و نتایج آن در شکل (۷) ارائه شده است. حضور ژلاتین در فرآیند شفاف‌سازی منجر به این امر می‌شود که پروتئین‌های با بار مثبت در ژلاتین با ترکیبات کلوئیدی با بار منفی در شیر میوه‌جات پیوند برقرار کنند که این برهمکنش باعث خنثی‌سازی بار سطحی و تشکیل لخته‌های سنگین می‌شود که قابلیت ته‌نشینی یا فیلتراسیون را دارا می‌باشند. همچنین ژلاتین قادر به جذب ترکیبات فنولی بوده که جزء عوامل اصلی ایجاد کدورت در شیر میوه‌جات هستند. نتایج بررسی‌های این پژوهش بر

روی تغییر مقدار ژلاتین نشان داد که مقدار 0.009 g ژلاتین در کنار جاذب پوست پرتقال بهترین نتیجه را برای کدورت زدایی شیره انجیر از خود نشان داد و با افزایش مقدار ژلاتین، میزان جذب کاهش پیدا کرد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که بکارگیری مقادیر بالای ژلاتین منجر به تجمع ذرات پروتئینی می‌شود که این ذرات خود به عنوان عامل کدورت جدید عمل کرده و باعث ایجاد کدوری معکوس در محصول نهایی می‌شوند. همچنین از دیدگاه صنایع غذایی، حضور مقادیر اضافی ژلاتین، ممکن است با جذب ترکیبات مطلوب مانند اسیدهای آمینه، طعم و ارزش غذایی محصول را نیز کاهش دهد. به این ترتیب در کنار زمان تماس تعادلی 60 min و مقدار بهینه جاذب زیستی پوست پرتقال 0.02 g ، مقدار 0.009 g ژلاتین نیز به عنوان مقدار بهینه این کمک صافی طبیعی در فرآیند کدورت زدایی شیره انجیر انتخاب گردید.



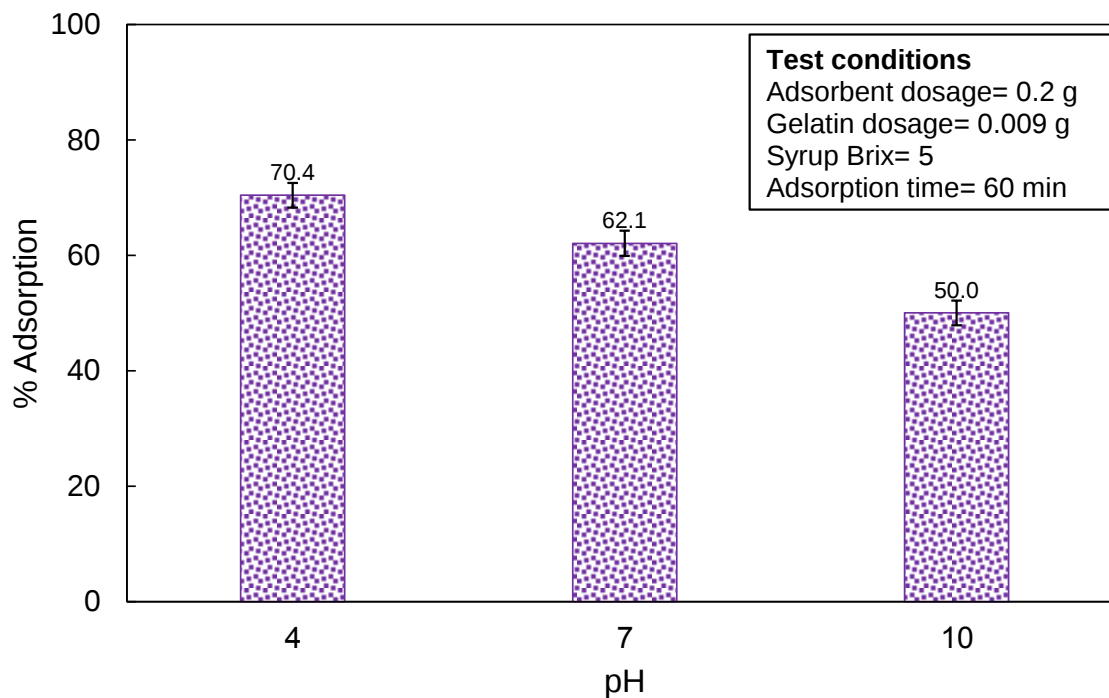
شکل ۶: بررسی اثر مقدار ژلاتین بر فرآیند کدورت زدایی شیره انجیر توسط جاذب زیستی پوست پرتقال.

Figure 7: Effect of gelatin concentration on the turbidity removal process of fig syrup using orange peel biosorbent.

۴-۵-۳- اثر pH محلول شیره انجیر

اهمیت pH در فرآیند کدورت زدایی شیره میوه‌جات یک عامل تعیین‌کننده و غیر قابل چشم‌پوشی است چراکه pH مستقیماً بر رفتار شیمیایی ترکیبات کلئیدی، بار سطحی جاذب‌ها و پایداری سیستم اثرگذار است. در این راستا با تغییر مقدار pH محلول

شیره در سه ناحیه اسیدی، خنثی و بازی و با ثابت نگه داشتن سایر شرایط عملیاتی (زمان تماس ۶۰ min، مقدار جاذب ۰/۲ g، مقدار ژلاتین ۰/۰۰۹ g، بریکس شیره انجیر ۵) تأثیر pH محلول شیره انجیر بر میزان شفاف سازی آن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل (۸) ارائه شده است. ترکیبات کدورت‌زا در شیره میوه‌ها و همچنین ترکیبات موجود در جاذب زیستی پوست پرتقال عمدتاً دارای گروه‌های عاملی مختلف حساس به pH هستند که تغییر در pH محلول شیره منجر به تغییر بار سطحی در آن-ها و تغییر در نیروهای جاذبه/دافعه الکترواستاتیکی بین جاذب و مواد کدورت‌زای موجود در شیره میوه‌جات می‌گردد. نتایج بررسی این فاکتور نشان داد که میزان جذب توسط جاذب زیستی پوست پرتقال در pH اسیدی افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت خنثی در pH محلول خود شیره و به ویژه نسبت به حالت قلیایی داشته است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که جاذب پوست پرتقال عمدتاً حاوی ترکیباتی چون لیگنین، سلولز، پکتین و ترکیبات فنولی با بار منفی (حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل) است، در حالی که ترکیبات کدورت‌زای شیره انجیر معمولاً شامل پروتئین‌ها، پلی فنول‌ها و کلئیدهای آلی با بار متغیر هستند که در pHهای اسیدی این عوامل کدورت‌زا و به ویژه پروتئین‌ها بار مثبت پیدا می‌کنند که با توجه به بار منفی گروه-های عاملی جاذب پوست پرتقال، دافعه الکترواستاتیکی بین جاذب و عوامل کدورت‌زا کاهش پیدا می‌کند و میزان جذب افزایش می‌یابد. در حالی که در pHهای خنثی و بخصوص pHهای بازی ترکیبات کدورت‌زای شیره انجیر بار منفی پیدا می‌کنند و به دلیل افزایش دافعه الکترواستاتیکی بین این عوامل با گروه‌های عاملی جاذب پوست پرتقال میزان جذب کاهش پیدا می‌کند. بعلاوه باید خاطر نشان نمود که در pHهای اسیدی ساختار لیگنین-سلولز حفظ شده و دسترسی به حفره‌ها و مکان‌های فعال جذب حفظ می‌شود و این در حالی است که ترکیبات لیگنینی در pHهای قلیایی تا حدودی دچار هیدرولیز شده و نه تنها بر میزان جذب جاذب اثر منفی دارند بلکه با آزاد کردن ترکیبات جدید حاصل از این هیدرولیز که خود کدورت‌زا هستند بر شفاف سازی اثر معکوس می‌گذارند.



شکل ۷: بررسی اثر pH محلول شیره بر فرآیند کدورت‌زدایی شیره انجیر توسط جاذب زیستی پوست پرتقال.

Figure 8: Effect of syrup solution pH on the turbidity removal process of fig syrup using orange peel biosorbent.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، جاذب‌های زیستی دورریز و زیست‌تخریب‌پذیر حاصل از پوست مرکبات در فرآیند شفاف‌سازی و رفع کدورت شیره‌های انگور و انجیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج تست‌های جذب زیستی انجام شده می‌توان گفت که علاوه بر اثربخشی نوع جاذب زیستی استفاده شده برای کدورت‌زدایی از شیره‌ها، نوع شیره نیز به شدت بر روی بازده حذف عوامل کدورت‌زای اثرگذار است. در میان جاذب‌های زیستی مختلف، پوست پرتقال بهترین عملکرد را برای شفاف‌سازی شیره‌ها از خود نشان داده است. این عملکرد بهبودیافته می‌تواند به سبب مورفولوژی یکنواخت‌تر و متخلخل‌تر، توزیع مناسب سایت‌های فعال، مساحت سطح بالاتر و حضور بیشتر گروه‌های عاملی فعال در نمونه اتفاق افتاده باشد. در میان شیره‌های مختلف میزان شفاف‌سازی شیره انجیر با پوست پرتقال تقریباً ۱/۸ برابر کدورت‌زدایی شیره انگور است. این تفاوت معنادار در میزان شفاف‌سازی شیره‌ها می‌تواند به سبب تفاوت در ماهیت و ترکیب کدورت‌زدای موجود در هر شیره مرتبط باشد. به جهت بهینه‌سازی فاکتورهای عملیاتی به منظور دستیابی به بیشینه کدورت‌زدایی از روش یک فاکتور در یک زمان برای پارامترهای زمان

تماس، مقدار جاذب، میزان ژلاتین و pH بهره گرفته شد. بیشترین بازده شفاف‌سازی (۷۰/۴٪) تحت شرایط عملیاتی زمان تماس ۶۰ دقیقه، مقدار جاذب زیستی ۰/۲ g، میزان ژلاتین ۰/۰۰۹ g و pH=۴ حاصل شد. با در نظر گرفتن قابلیت‌های ساختاری و عملکرد عملیاتی جاذب‌های زیستی، روش ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان جایگزینی پایدار برای فرآیندهای شیمیایی مرسوم در صنعت تصفیه شیرها و نوشیدنی‌های گیاهی مطرح گردد. علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، این رویکرد همسو با اصول توسعه پایدار، بازیافت منابع کشاورزی، و کاهش اثرات زیست‌محیطی است.

۵- منابع

1. de Oliveira, R. C., Docê, R. C., & de Barros, S. T. D. (2012). Clarification of passion fruit juice by microfiltration: Analyses of operating parameters, study of membrane fouling and juice quality. *Journal of food engineering*, 111(2), 432-439.
2. Ramos, J. E. T., Duarte, T. C., Rodrigues, A. K. d. O., Silva Jr, I., Cavalcante Jr, C., & Azevedo, D. C. S. d. (2011). On the production of glucose and fructose syrups from cashew apple juice derivatives. *Journal of food engineering*, 102(4), 355-360.
3. Castro-Muñoz, R., Correa-Delgado, M., Córdova-Almeida, R., Lara-Nava, D., Chávez-Muñoz, M., Velásquez-Chávez, V. F., . . . Ahmad, M. Z. (2022). Natural sweeteners: Sources, extraction and current uses in foods and food industries. *Food chemistry*, 370, 130991.
4. Derouich, M., Meziani, R., Bourkhis, B., Filali-Zegzouti, Y., & Alem, C. (2020). Nutritional, mineral and organic acid composition of syrups produced from six Moroccan date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) varieties. *Journal of food composition and analysis*, 93, 103591.
5. Puoci, F., Iemma, F., Spizzirri, U. G., Restuccia, D., Pezzi, V., Sirianni, R., . . . Cirillo, G. (2011). Antioxidant activity of a Mediterranean food product: "fig syrup". *Nutrients*, 3(3), 317-329.
6. Cosme, F., Pinto, T., & Vilela, A. (2018). Phenolic compounds and antioxidant activity in grape juices: A chemical and sensory view. *Beverages*, 4(1), 22.
7. Ahani, T., Ahmadi, M. M., & Saghebjo, M. (2023). Effects of Grape Syrup Intake on Metabolic Rate and Substrate Oxidation During and After Sprint Intermittent Exercise. *Zahedan Journal of Research in Medical Sciences*, 25(4).
8. Dereli, B. O., Türkyılmaz, M., & Özkan, M. (2023). Clarification of pomegranate and strawberry juices: Effects of various clarification agents on turbidity, anthocyanins, colour, phenolics and antioxidant activity. *Food chemistry*, 413, 135672.
9. Aghajanzadeh, S., Ziaifar, A. M., & Verkerk, R. (2023). Effect of thermal and non-thermal treatments on the color of citrus juice: A review. *Food Reviews International*, 39(6), 3555-3577.

10. Echavarría, A., Torras, C., Pagan, J., & Ibarz, A. (2011). Fruit juice processing and membrane technology application. *Food Engineering Reviews*, 3(3), 136-158.
11. Singh, R., & Singh, R. (2015). Role of Enzymes in Fruit juices Clarification during Processing: A review. *Int. J. Biol. Technol*, 6(1), 1-12.
12. Ahamad, S., Choudpar, G. K., Kumar, R., Kumar, A., Bihari, C., Singh, S., . . . Wamiq, M. (2023). Enhancing clarity and quality: The role of clarifying agents in horticulture foods and formulations. *Int J Environ Clim Change*, 13, 549-559.
13. Yin, J., Fang, K., Li, J., Du, N., Hu, D., Cao, D., . . . Li, K. (2023). Competitive adsorption mechanisms of pigments in sugarcane juice on starch-based magnetic nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 123134.
14. Nehmé, L., El Tekle, M., Barakat, N., El Khoury, A., Azzi-Achkouty, S., & El Rayess, Y. (2024). Alternative processes for apple juice stabilization and clarification: A bibliometric and comprehensive review. *Processes*, 12(2), 296.
15. Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145-155.
16. Bhattacharjee, C., Dutta, S., & Saxena, V. K. (2020). A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent. *Environmental Advances*, 2, 100007.
17. Vijayaraghavan, K., & Balasubramanian, R. (2015). Is biosorption suitable for decontamination of metal-bearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. *Journal of Environmental Management*, 160, 283-296.
18. Solangi, N. H., Kumar, J., Mazari, S. A., Ahmed, S., Fatima, N., & Mubarak, N. M. (2021). Development of fruit waste derived bio-adsorbents for wastewater treatment: A review. *Journal of hazardous materials*, 416, 125848.
19. Dutta, S., Bhattacharyya, A., Ganguly, A., Gupta, S., & Basu, S. (2011). Application of response surface methodology for preparation of low-cost adsorbent from citrus fruit peel and for removal of methylene blue. *Desalination*, 275(1-3), 26-36.
20. Malviya, A., & Jaspal, D. (2023). Biosorption application in water reuse and recovery. In *Resource Recovery in Drinking Water Treatment* (pp. 93-105): Elsevier.
21. Januário, E. F. D., Vidovix, T. B., Araújo, L. A. d., Bergamasco Beltran, L., Bergamasco, R., & Vieira, A. M. S. (2022). Investigation of *Citrus reticulata* peels as an efficient and low-cost adsorbent for the removal of safranin orange dye. *Environmental Technology*, 43(27), 4315-4329.

22. Gupta, A. K., Dhua, S., Kumar, V., Naik, B., Magwaza, L. S., Ncama, K., . . . Mishra, P. (2023). Current and emerging applications in detection and removal of bitter compounds in citrus fruit juice: A critical review. *Food Bioscience*, 55, 102995.
23. Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., Baral, E. R., Koteswararao, R., Dhyani, A., . . . Cho, S. (2020). Bio-sorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: A review. *Journal of Advanced Research*, 23, 61-82.
24. Dey, S., Basha, S., Babu, G., & Nagendra, T. (2021). Characteristic and biosorption capacities of orange peels biosorbents for removal of ammonia and nitrate from contaminated water. *Cleaner Materials*, 1, 100001.
25. Bukhari, A., Ijaz, I., Zain, H., Gilani, E., Nazir, A., Bukhari, A., . . . Naseer, Y. (2022). Removal of Eosin dye from simulated media onto lemon peel-based low cost biosorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(7), 103873.
26. Khalfaoui, A., Benalia, A., Selama, Z., Hammoud, A., Derbal, K., Panico, A., & Pizzi, A. (2024). Removal of chromium (VI) from water using orange peel as the biosorbent: experimental, modeling, and kinetic studies on adsorption isotherms and chemical structure. *Water*, 16(5), 742.
27. Jmaa, S. B., Abdelhedi, O., Karia, J., Jridi, M., & Sebai, H. (2025). Assessment of an ecofriendly process to remove Nickel and Zinc from wastewater using ultrasound-treated Citrus fruit peels. *Results in Engineering*, 107003.
28. Rani, S., & Chaudhary, S. (2022). Adsorption of methylene blue and crystal violet dye from waste water using Citrus limetta peel as an adsorbent. *Materials Today: Proceedings*, 60, 336-344.
29. Dev, S., Khamkhash, A., Ghosh, T., & Aggarwal, S. (2020). Adsorptive removal of Se (IV) by citrus peels: Effect of adsorbent entrapment in calcium alginate beads. *ACS omega*, 5(28), 17215-17222.

۳۰. احمدی امید. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی شرایط عملیاتی کدورت‌زدایی از شیر انگور رقیق شده با جاذب طبیعی

پوست لیمو.

۳۱. حاتمی کیا معصوم، محمدی ثانی علی و زمردی شهین. (۱۳۹۱). بررسی تاثیر مواد مختلف شفاف سازی بر

ویژگی های فیزیکوشیمیایی و میکروبی شیر انگور.

32. Jasim, S. A., Hashim, A. F., S, R., Sridevi, G., Chaudhary, K., Sharma, S., . . . Kadhum, W. R. (2025). Optimization of lemon peel adsorbent for clarification of date syrup. *Chemical Papers*. doi:10.1007/s11696-025-04430-9

۳۳. زندی، اوین .، اکبری سنه، روجیار و رحمانی، فرهاد. (۱۴۰۳). ارزیابی خواص ساختاری-نوری و عملکرد

کاتالستی فتوکامپوزیت اتصال ناهمگون BiOI-CuO تعبیه شده در خمیره ژئولیتی. نشریه مهندسی منابع معدنی، ۹ (۴)،

۹۵-۱۱۳.

34. Bhagat, M., Yadav, A., & Yadav, V. (2018). Removal of Pb (II) ions from Aqueous Solution using Natural Orange Peel and Activated Orange Peel. *Int. J. Res. Advent Technol*, 6, 688-693.

35. Lazim, Z. M., Mazuin, E., Hadibarata, T., & Yusop, Z. (2015). The removal of methylene blue and Remazol Brilliant Blue R dyes by using orange peel and spent tea leaves. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 74(11).

36. Nasser, A. O., & Kareem, S. L. (2024). Removal of Congo red from aqueous solution using lemon peel-Fe₃O₄ nanocomposite adsorbent. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(18), 23183-23193.

37. Kukowska, S., Nowicki, P., & Szewczuk-Karpisz, K. (2025). Valorization of orange peels through the production of eco-friendly, highly effective adsorbents for herbicides based on one-step CO₂ -activation under conventional/microwave heating. *Food and Bioproducts Processing*, 153, 145-160.

Clarification of Fruit Syrup Using Citrus Peel-Based Biosorbents: Screening of Biosorbents and Optimization of Operational Conditions

Rojiar Akbari Seneh^{1*}, Hamed Amirian², Omid Ahmadi³, Arman Soltani⁴, Avin Zandi⁵

¹ Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Iran, Email: r.akbari@uok.ac.ir

² M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Iran, Email: hamedamirian5@gmail.com

³ Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Iran, Email: o.ahmadi@uok.ac.ir

⁴ M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Iran, Email: arman.soltani@uok.ac.ir

⁵ Ph.D. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Iran, Email: a.zandi@uok.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Grape and fig syrups, as rich sources of natural sugars, polyphenols, and minerals, possess antioxidant, anti-inflammatory, and hematopoietic properties. These natural compounds have potential applications in the food and pharmaceutical industries due to their effects on improving anemia, boosting the immune system, and increasing energy levels. However, turbidity in fruit syrups remains a major challenge in terms of consumer acceptance and industrial processing. This study investigates the performance of biosorbents derived from citrus peels (orange, lemon, and tangerine) in removing turbidity from these syrups using the adsorption method.

Materials and Methods: For this purpose, citrus peels were separated from the edible portions, dried, ground, and sieved. To evaluate the structural and chemical characteristics of the adsorbents, FESEM, EDX, FTIR, and BET analyses were conducted.

Results: FESEM imaging revealed that lemon peel exhibited a dense structure with particle aggregation, whereas tangerine and especially orange peels showed a porous and uniform morphology. BET analysis recorded a higher specific surface area for orange peel (10 m²/g) compared to the other adsorbents. FTIR spectroscopy indicated that active functional groups such as hydroxyl, carbonyl, and phenolic groups were more intense in orange peel than in lemon and tangerine peels. Under identical operational conditions, orange peel adsorbent achieved 65.5% turbidity removal from fig syrup and 36.8% from grape syrup. This performance difference was attributed to the nature and composition of turbidity-causing compounds in each syrup. Subsequently, the effects of operational variables—including contact time, adsorbent dosage, gelatin concentration, and solution pH—on the turbidity removal efficiency of fig syrup using orange peel biosorbent were examined through a one-factor-at-a-time

approach. Under optimal conditions (60-min contact time, 0.2 g adsorbent, 0.009 g gelatin, and acidic pH), the highest turbidity removal rate for fig syrup (70.4%) was recorded. The use of natural gelatin as a coagulant aid enhanced the interaction between turbidity particles and the adsorbent; however, excessive gelatin led to reverse turbidity.

Conclusion: These practical findings can inform the design of effective operational strategies to improve the visual quality and consumer acceptance of plant-based syrup processing. Overall, the results demonstrated that orange peel bio-adsorbent is a cost-effective, eco-friendly, and efficient option for clarifying plant-based syrup, paving the way for sustainable industrial methods in food product processing.

Keywords: Turbidity removal, Citrus peel, Grape syrup, Fig syrup, Optimization