

## تهیه و شناسایی آمیزه‌های اسفنجی چارچوب فلز-آلی روی/پلی‌اورتان به‌عنوان جاذب روغن‌ها

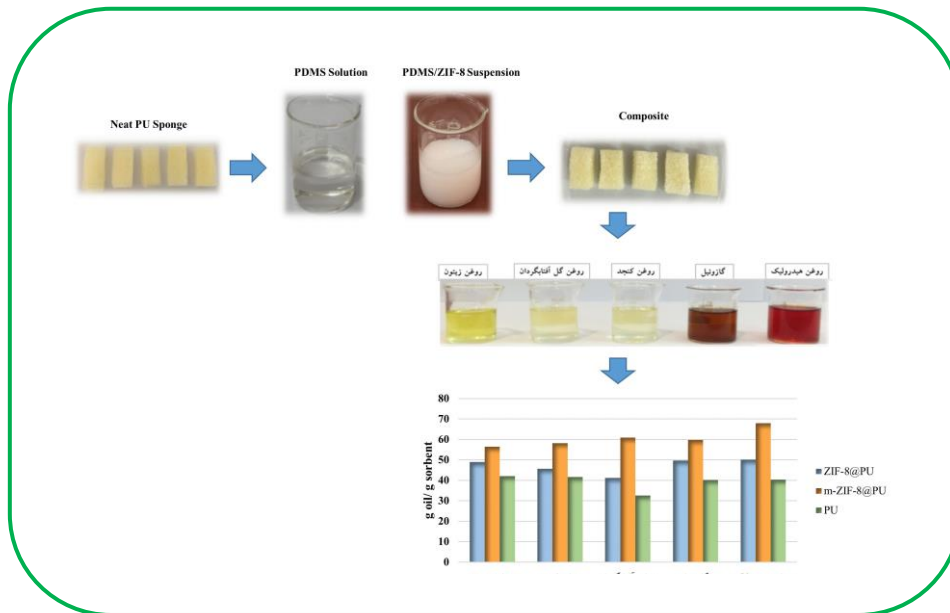
زینب انصاری اصل\*، یاسمین سعداوی

گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳ بهمن ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۸ فروردین ۱۴۰۳

**چکیده:** امروزه به دلیل توسعه بسیاری از صنایع و کارخانه‌ها، تخلیه فاضلاب روغنی، آلاینده‌های آلی و نشئت مکرر نفت، آلودگی‌های متعددی در آب‌ها به‌وجود آمده است. جذب سطحی (صاف‌کردن) یکی از موثرترین روش‌ها برای حذف آلاینده‌های روغنی است. در این پژوهش، ابتدا چارچوب فلز-آلی ZIF-8 تهیه، توسط اکتادسیل آمین عامل‌دار (m-ZIF-8) و سپس با استفاده از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به بستر پلی‌اورتان متصل شد. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به‌طور هم‌زمان به‌عنوان اتصال دهنده‌ی ZIF-8 به پلی‌اورتان عمل کرده و همچنین منجر به آب‌گریز کردن آمیزه شده است. مواد تهیه‌شده ابتدا با طیف‌سنجی زیرقرمز بررسی شدند. سپس با روش‌های پراش پرتو ایکس، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز نقشه‌بردار عنصری مشخصه‌یابی شدند. در پایان، کارایی جذب روغن‌های مختلف از جمله روغن زیتون، روغن آفتابگردان، روغن موتور و گازوئیل توسط جاذب‌های تهیه‌شده مطالعه شد. نتایج نشان داد، بارگذاری ZIF-8 و m-ZIF-8 منجر به افزایش خصلت آب‌گریزی اسفنج پلی‌اورتان و در نتیجه افزایش کارایی جذب روغن از ۴۲ درصد به ۶۸-۵۰ درصد شده است.

**کلید واژه:** اکتادسیل آمین، پلی‌اورتان، جذب روغن، چارچوب فلز-آلی روی، آمیزه



### ۱- مقدمه

با رشد شهرها و توسعه بسیاری از صنایع و کارخانجات، کیفیت منابع آب برای بقای حیات با مشکلات جدی روبه‌رو شده است [۱]. فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و انسانی جزء منابع اصلی آلودگی‌های آب به‌شمار می‌آیند [۲]. از آلودگی‌های آب می‌توان به آلودگی میکروبی، آلاینده‌های معدنی و آلی اشاره کرد. روغن‌ها دارای ترکیب‌های

سمی مختلفی از جمله بنزن و تولوئن می‌باشند که به‌عنوان آلاینده‌های آلی اثرات جبران‌ناپذیری در محیط زیست و ریست‌بوم ایجاد می‌کنند [۳]. بنابراین، مطالعه و تهیه جاذب‌های دارای خصلت آب‌گریزی مناسب، ظرفیت و سرعت جذب بالا، توجه بارزی را به خود معطوف کرده‌اند. فرایند جذب به‌دلیل هزینه‌های عملیاتی کم و سهولت کار به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های جداسازی

اسفنج پلی‌اورتان استفاده گردید. در نهایت، آمیزه اسفنجی ZIF-8@rGO@sponge به عنوان جاذبی با توانایی جذب بارز برای روغن‌ها و حلال‌های آلی تهیه شد. زنجیره بلند آلکیل اکتادسیل‌آمین با انرژی سطحی کم، به سطح چارچوب‌های فلز-آلی متصل و باعث مقاومت بالای این ترکیب‌ها در برابر آب شده و به آمیزه ویژگی فراآبگریزی ویژه‌ای داده است. علاوه بر این، تخلخل ذاتی چارچوب‌های فلز-آلی نیز حفظ شده است [۱۲]. در سال ۲۰۲۱ انصاری اصل و همکاران، اسفنج‌های جدید پلی‌اکریلونیتریل (PAN) و ZIF-8 را با نسبت‌های جرمی مختلف تهیه کردند. نتایج بررسی جذب روغن نشان داد اسفنج PAN/x%ZIF-8 کارایی مناسب‌تری برای تصفیه فاضلاب نسبت به پلی-اکریلونیتریل خالص دارد [۱۳].

اسفنج‌های تجاری پلی‌اورتان به دلیل سرعت جذب بالا، در دسترس بودن، پایداری مکانیکی خوب و قابلیت بازیابی عالی، به عنوان گزینه‌ی مناسبی برای جداسازی روغن از آب در نظر گرفته شده‌اند. با این حال، این اسفنج‌ها به طور طبیعی ویژگی آبدوستی/چربی‌دوستی دارند که منجر به جذب هم‌زمان روغن و آب می‌شود. بنابراین، اصلاح ویژگی آبگریزی این اسفنج حائز اهمیت می‌باشد [۱۴]. در این پژوهش، ابتدا چارچوب فلز-آلی ZIF-8 تهیه و توسط اکتادسیل‌آمین عامل‌دار شد. در نهایت، این ترکیب توسط پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به بستر پلی‌اورتان متصل و به کمک روش‌های شناسایی مختلف مانند طیف‌سنجی زیرقرمز، روش پراش پرتو ایکس، تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز نقشه‌بردار عنصری مشخصه‌یابی شدند و کارایی جذب روغن آن مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- روش‌های تجربی

مشخصات دستگاه‌های استفاده شده در این کار تحقیقاتی در قایل تکمیلی گزارش شده‌اند.

### ۲-۱- تهیه و عامل‌دار کردن ZIF-8

نانوذرات ZIF-8، طبق روش گفته شده در پژوهش قبلی تهیه شدند [۱۵]. این روش به طور کامل در فایل تکمیلی شرح داده شده است. به منظور عامل‌دار کردن این نانوذرات، ابتدا ۰/۵ گرم از پودر ZIF-8 به ۰/۳ گرم اکتادسیل‌آمین حل شده در ۳۰ میلی‌لیتر تولوئن، اضافه و به مدت ۲ دقیقه تحت تابش امواج فراصوت قرار گرفت. سپس، واکنش به مدت ۲۴ ساعت درون حمام روغن در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در گاز نیتروژن انجام شد. در پایان، رسوب به دست آمده سانتریفیوژ و جهت اطمینان از حذف اکتادسیل‌آمین اضافی، سه بار با تولوئن شسته و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

روغن از آب در نظر گرفته می‌شود. بیشتر جاذب‌ها مواد بسیار متخلخلی می‌باشند که فرایند جذب روی سطح خارجی، دیواره‌ی حفره‌ها و سطوح داخلی آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین، انتخاب جاذب با توانایی مناسب جذب روغن امری مهم تلقی می‌شود. به این منظور، مواد مختلفی از جمله جاذب‌های طبیعی معدنی، جاذب‌های طبیعی آلی و جاذب‌های سنتزی استفاده شده‌اند. چارچوب‌های فلز-آلی، دسته‌ای از جاذب‌های معدنی می‌باشند که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله تنوع ساختاری، تخلخل بالا و پایداری قابل قبول، توجه بارزی را به خود معطوف کرده‌اند [۴-۶].

چارچوب ایمیدازولات زئولیتی-۸ (ZIF-8)، ترکیبی از خانواده‌ی چارچوب‌های فلز-آلی می‌باشد که به علت پایداری شیمیایی و حرارتی مناسب، دارای کاربردهای بالقوه‌ای در زمینه جذب و جداسازی می‌باشد. کاربرد گسترده ZIF-8 را می‌توان به هزینه کم، آماده سازی آسان، سطح ویژه‌ی بزرگ و پایداری شیمیایی و حرارتی بالا نسبت داد [۷ و ۸]. اگرچه چارچوب‌های فلز-آلی کاربرد بالقوه‌ای در زمینه‌های مختلف از خود نشان داده‌اند؛ اما برخی ویژگی‌ها مانند داشتن ریخت پودری و ماهیت شکننده، به عنوان نقص اصلی این دسته از ترکیب‌ها در کاربردهای عملی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، شکل دادن به ذرات چارچوب‌های فلز-آلی و نیز حفظ ویژگی‌های ذاتی آن‌ها برای استفاده به عنوان جاذب، بسیار مهم است. به تازگی، برای غلبه بر این مشکلات، تهیه آمیزه‌های پلیمری (قرار دادن ذرات چارچوب‌های فلز-آلی در ماتریس‌های پلیمری) رایج شده است. بنابراین، چارچوب-های فلز-آلی با ماتریس پلیمری منجر به تولید محصولاتی با کاربرد و ویژگی‌های مختلف می‌شود [۹]. علاوه بر این، اغلب این ترکیب‌ها برای بهبود ظرفیت جذب روغن و آبگریزی بیشتر، نیازمند اصلاح با ترکیب-های آبگریز می‌باشند. به این منظور، پوشش پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان برای تشکیل یک لایه آبگریز محافظ روی سطح چارچوب‌های فلز-آلی برای بهبود پایداری آن‌ها استفاده شده است. چارچوب‌های فلز-آلی پوشش داده شده با پلی‌دی‌متیل-سیلوکسان به طور قابل توجهی خصلت آبگریزی و تحمل رطوبت عالی نشان داده و همچنین تخلخل ذاتی را به خوبی حفظ کرده‌اند. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان یکی از رایج‌ترین پلیمرهای مصنوعی است که به گروه الاستومرهای سیلیکونی تعلق دارد. زنجیره‌ی اصلی این ترکیب، Si-O می‌باشد که گروه‌های آلی با اتم سیلیکون در این زنجیره، پیوند Si-C را تشکیل می‌دهند [۱۰ و ۱۱].

در سال ۲۰۱۹، آمیزه MOF@rGO با ویژگی فراآبگریز و فراچربی دوست تهیه شد. در این بررسی، ابتدا نانوذرات ZIF-8 بین صفحه‌های گرافن اکسید قرار داده شد؛ سپس از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان برای اتصال آن به

اسیدی خارج و در آن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. تکه‌های آمیزه قبل از غوطه‌ور شدن در روغن به طور دقیق توزین شدند. برای انجام آزمایش جذب روغن، درون پنج بشر کوچک به صورت جداگانه ۷ میلی‌لیتر از روغن‌های گفته شده ریخته شد. قطعه‌های آمیزه به مدت ده دقیقه درون بشرهای حاوی روغن غوطه‌ور شدند. سپس از روغن‌ها خارج و برای پانزده ثانیه به حالت آزاد نگه داشته شدند تا روغن اضافی حذف شود. در پایان، وزن آمیزه‌های حاوی روغن مشخص و کارایی جذب بررسی شد. بررسی کارایی جذب روغن در محیط بازی، مشابه روش انجام‌شده در محیط اسیدی می‌باشد با این تفاوت که به جای محیط اسیدی از محیط بازی با  $pH=10$  استفاده شد.

#### ۲-۵- بررسی کارایی جذب روغن به‌وسیله آمیزه‌های ساییده شده

برای بررسی کارایی جذب روغن به‌وسیله آمیزه‌های ساییده شده، ابتدا آمیزه‌ها به صورت جداگانه روی سطح زبر سنباده کشیده و سطح آن‌ها ساییده شد. در ادامه، آزمایش جذب روغن آمیزه‌های تهیه شده مطابق بخش‌های قبلی انجام شد.

۲-۶- بررسی بازجذب روغن به‌وسیله آمیزه‌های تهیه‌شده  
برای بررسی بازجذب، ابتدا روغن جذب‌شده به‌وسیله آمیزه‌ها (مشابه روش گفته‌شده در بخش‌های قبلی) به طور کامل توسط دستمال گرفته شد. سپس جهت انجام آزمون دوباره جذب، آمیزه به مدت ده دقیقه در بشرهای حاوی روغن قرار گرفت و این آزمایش برای هفت بار پیاپی تکرار شد.

#### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آمیزه‌هایی از چارچوب فلز-آلی ZIF-8 و پلی‌اورتان برای بررسی کارایی جذب روغن‌های مختلف تهیه شد (طرح‌واره کلی تهیه‌ی این آمیزه در شکل ۱ فایل تکمیلی نشان داده شده است). از لیگاند ۲-متیل ایمیدازول در تهیه چارچوب‌های فلز-آلی ZIF-8 استفاده شد. سوسپانسیون استفاده‌شده برای تهیه این آمیزه‌ها حاوی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان چارچوب فلز-آلی ZIF-8 و حلال کلروفرم بود. برای جلوگیری از جداشدن چارچوب فلز-آلی از ساختار اسفنج و نیز افزایش خاصیت آبگریزی اسفنج از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان در تهیه آمیزه‌ها استفاده شد. روش مورد استفاده، روشی نسبتاً آسان برای تهیه آمیزه‌های مختلف با ویژگی فراآبگریزی/فراچربی دوستی می‌باشد. آمیزه‌های تهیه‌شده با روش‌های شناسایی مانند طیف‌سنجی زیرقرمز، روش پراش پرتو ایکس، تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز نقشه‌برداری عنصری مشخصه‌یابی شدند.

#### ۲-۲- تهیه آمیزه‌های اسفنجی ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU

ابتدا برش‌های کوچک اسفنج تجاری پلی‌اورتان با اتانول و استون شسته و در آن تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس به منظور تهیه آمیزه‌ها، مقدار جرمی ۱:۱ از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و ZIF-8 یا m-ZIF-8 استفاده شد. به این صورت که ابتدا ۰/۴ گرم پلی-دی‌متیل‌سیلوکسان در ۱۵ میلی‌لیتر کلروفرم حل، سپس ۰/۴ گرم از ZIF-8 یا m-ZIF-8 به آن اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه به کمک امواج فراصوت درون آن پراکنده شد. سپس تکه‌های اسفنج پلی‌اورتان به صورت جداگانه درون سوسپانسیون ZIF-8/PDMS یا m-ZIF-8/PDMS به مدت ۱ ساعت غوطه‌ور گردید. پس از یک ساعت، اسفنج‌های پوشش داده شده از محلول جدا و درون آن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.

#### ۲-۳- بررسی کارایی جذب روغن به‌وسیله آمیزه‌های تهیه‌شده

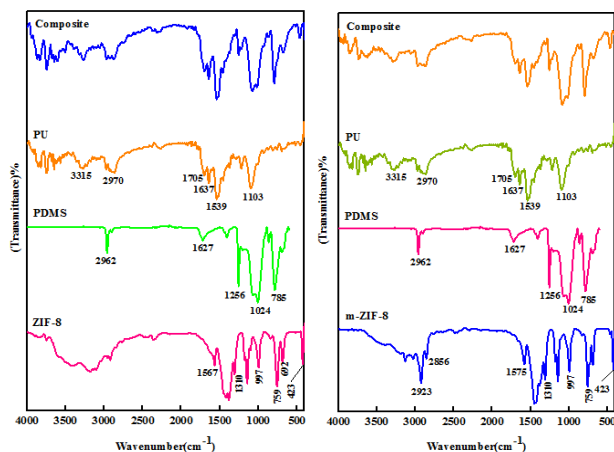
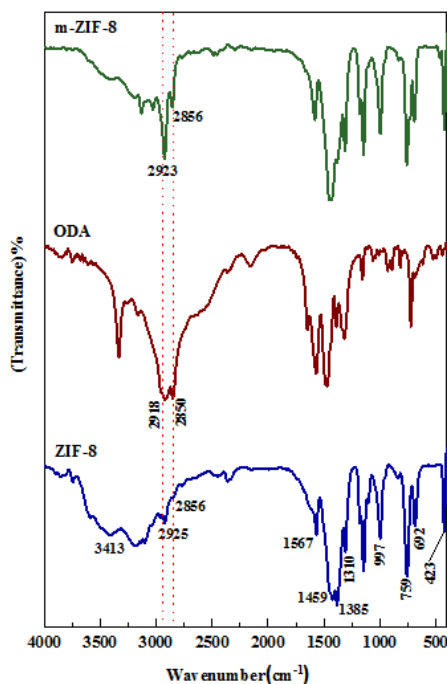
در این پژوهش میزان جذب انواع روغن‌ها از جمله روغن زیتون، روغن کنجد، روغن گل آفتابگردان، روغن هیدرولیک و گازونیل توسط آمیزه‌های اسفنجی پلی-اورتان/چارچوب فلز-آلی روی، مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی جذب انواع روغن‌ها، ابتدا تکه‌هایی در ابعاد کوچک از آمیزه‌های اسفنجی برش داده و به طور دقیق توزین شدند. سپس، در پنج بشر کوچک به میزان ۷ میلی‌لیتر روغن زیتون، روغن کنجد، روغن گل آفتابگردان، روغن هیدرولیک و گازونیل به صورت جداگانه ریخته شد. در ادامه برش‌های توزین‌شده به مدت ده دقیقه درون بشرهای حاوی روغن‌های گفته‌شده قرار داده شد. پس از گذشت مدت زمان لازم، برش‌های آمیزه از روغن‌ها خارج و برای پانزده ثانیه به حالت آزاد نگه داشته شدند تا روغن اضافی حذف شود. در نهایت، وزن آمیزه‌های حاوی روغن تعیین گردید. کارایی جذب روغن توسط آمیزه‌های تهیه شده از طریق رابطه‌ی زیر تعیین گردید.

$$M_{abs} = \frac{(m - m_0)}{m_0} \times 100$$

$m_0$  وزن اسفنج قبل از غوطه‌ور شدن در روغن و  $m$  وزن قطعه‌ها پس از جذب روغن است.

#### ۲-۴- بررسی کارایی جذب روغن توسط آمیزه‌ها پس از غوطه‌ور شدن آن‌ها در محیط اسیدی و بازی

برای بررسی جذب روغن توسط آمیزه‌ها پس از غوطه‌ور شدن آن‌ها در محیط اسیدی و بازی، ابتدا آمیزه‌ها در ابعاد کوچک برش داده و در محیط اسیدی با  $pH=4$  به مدت ۱۵ دقیقه غوطه‌ور شدند. سپس آمیزه‌ها از محیط



شکل ۱. طیف FT-IR ترکیب ها ZIF-8، m-ZIF-8، ODA، PU، PDMS و آمیزه‌های آن‌ها.

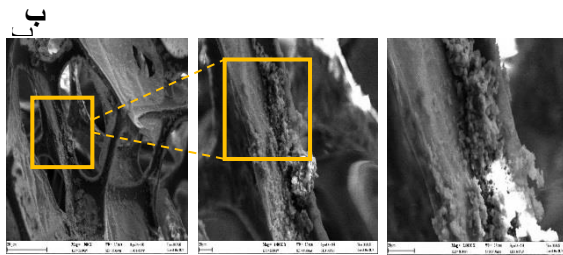
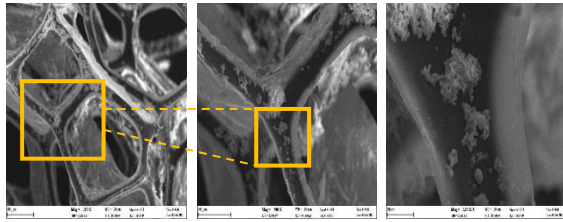
### ۲-۳- بررسی الگوی پراش پرتو ایکس ترکیب های تهیه شده

برای بررسی اتصال ذرات ZIF-8 و m-ZIF-8 درون اسفنج پلی‌اورتان از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شد. الگوی پراش پرتو ایکس پلی‌اورتان، پلی‌دی‌متیل-سیلوکسان و آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU در شکل ۲ نشان داده شده است. در الگوی پراش پرتو ایکس پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، پیک‌های پهن بیانگر خاصیت بی‌شکلی آن می‌باشد. این الگو دارای دو قله در حدود ۱۲/۸ درجه و ۲۲/۶ درجه می‌باشد. بیشینه پراش در محدوده  $2\theta = 16/77$  ظاهر شده است. الگوی پراش

### ۳-۱- بررسی طیف زیرقرمز ترکیب های تهیه شده

طیف زیرقرمز ترکیب های تهیه شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. در طیف مربوط به ZIF-8، نوار ظاهر شده در ناحیه  $3413 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی N-H می‌باشد. در اعداد موج  $2856 \text{ cm}^{-1}$  و  $2925 \text{ cm}^{-1}$ ، دو نوار ضعیف ظاهر شده است که به ترتیب به ارتعاش های کششی C-H حلقه ایمیدازول و ارتعاش های کششی C-H متیل حلقه ایمیدازول نسبت داده می‌شوند. نوار ارتعاشی ظاهر شده در عدد موج  $1567 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش های کششی C=N مرتبط است. نوارهایی که در ناحیه های  $1459 \text{ cm}^{-1}$  و  $1385 \text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده‌اند، مربوط به ارتعاش های کششی حلقه ایمیدازول می‌باشند. در محدوده  $1310 \text{ cm}^{-1}$  -  $799 \text{ cm}^{-1}$  نوار های مربوط به ارتعاش های خمشی خارج صفحه پیوند C-H آروماتیک ظاهر شده‌اند. نوار قوی در  $423 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش کششی Zn-N نسبت داده می‌شود. در طیف مربوط به اکتادسیل‌آمین، دو نوار در اعداد موج  $2850 \text{ cm}^{-1}$  و  $2918 \text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده است که از ارتعاش کششی پیوند C-H ناشی شده‌اند. در طیف مربوط به m-ZIF-8، دو نوار جدید در  $2856 \text{ cm}^{-1}$  و  $2923 \text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده‌اند که مربوط به ارتعاش کششی C-H زنجیره اکتادسیل‌آمین می‌باشند و تاییدی بر عامل‌دار شدن ZIF-8 با اکتادسیل‌آمین است. در طیف زیرقرمز پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، نوار جذبی ظاهر شده در  $1256 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش خمشی پیوند Si-CH<sub>3</sub> مربوط به ارتعاش کششی پیوند Si-O-Si می‌باشد. در طیف پلی‌اورتان، نوار جذبی در  $3315 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش کششی پیوند N-H اختصاص داده می‌شود. نوار ظاهر شده در  $1705 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش گروه کربونیل نسبت داده می‌شود. وجود نوارهای جذبی مربوط به ترکیب ها اولیه در طیف زیرقرمز آمیزه‌ها، تاییدی بر تهیه موفقیت-آمیز محصول نهایی می‌باشد [۱۶-۱۸].

### الف



شکل ۳. الف) تصاویر آمیزه ZIF-8@PU و ب) m-ZIF-8@PU در بزرگنمایی‌های مختلف.

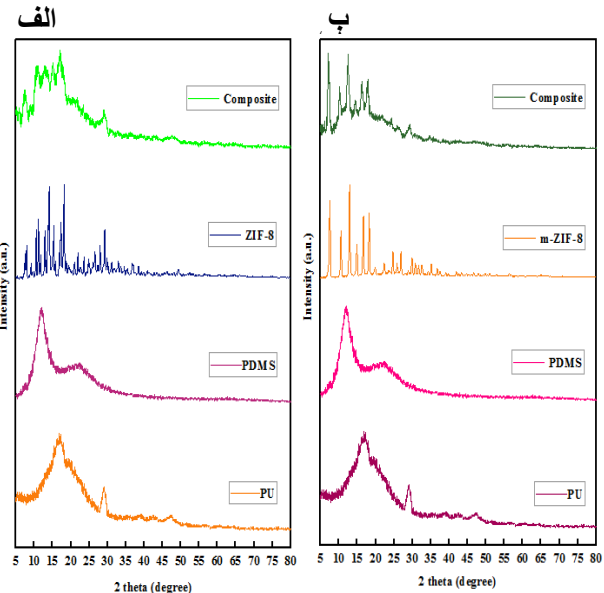
### ۳-۴- بررسی تصویرهای آنالیز نقشه‌برداری عنصری آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU

در آنالیز نقشه عنصری، پراکندگی عناصر موجود در این ترکیب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نقاط روشن در تصویرها بیانگر فراوانی عناصر مربوطه می‌باشد. حضور و پراکندگی عناصر روی، سیلیسیم، اکسیژن، نیتروژن و کربن در آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU به وضوح قابل مشاهده است. پراکندگی این عناصر در بستر پلیمری آمیزه‌های تهیه‌شده به صورت یکنواخت است (شکل ۴).

### ۳-۵- نتایج جذب روغن به وسیله اسفنج پلی‌اورتان خالص، آمیزه ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU

نتایج به‌دست آمده از میزان جذب روغن‌های مورد مطالعه با آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU بر حسب گرم روغن بر گرم جاذب در شکل ۵ گزارش شده است. روغن هیدرولیک به دلیل گرانی‌تری بالا، بیشترین ظرفیت جذب را از خود نشان داده است و جذب آن با آمیزه m-ZIF-8@PU به علت عامل‌دار شدن چارچوب زئولیتی ایمیدازولات-۸ توسط اکتادسیل‌آمین و قرار دادن این ذرات در ساختار اسفنج نسبت به آمیزه ZIF-8@PU و اسفنج پلی‌اورتان خالص افزایش یافته است (۶۸ گرم روغن بر گرم جاذب). حداکثر ظرفیت جذب توسط اسفنج پلی‌اورتان خالص برای روغن زیتون به میزان ۴۲ گرم روغن بر گرم جاذب است. در آمیزه ZIF-8@PU و آمیزه m-ZIF-8@PU به علت بالا بودن گرانی‌تری روغن هیدرولیک نسبت به سایر روغن‌ها، ظرفیت جذب این روغن بیشتر از دیگر روغن‌ها است.

چارچوب فلز-آلی ZIF-8 مشابه الگوهای گزارش شده قبلی است. بنابراین الگوی پراش پرتو ایکس وجود این ذرات در ماتریس آمیزه‌های پلیمری را تایید می‌کند [۲۱-۱۹].



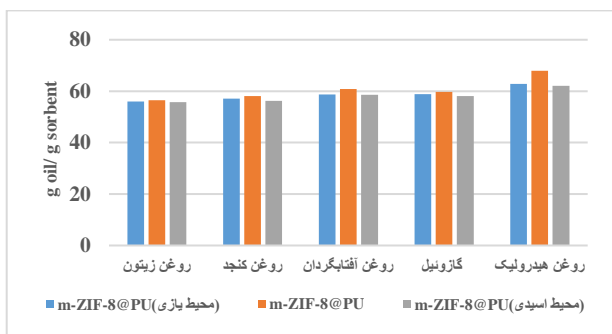
شکل ۲. الف) الگوی پراش پرتو ایکس PU، PDMS، چارچوب فلز-آلی ZIF-8 و آمیزه مربوط به آن، ب) الگوی پراش پرتو ایکس PU، PDMS، چارچوب فلز-آلی m-ZIF-8 و آمیزه مربوط به آن.

### ۳-۳- تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU

برای بررسی ریخت و پوشش‌دهی آمیزه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به این تصویرها، ریخت اسفنجی و متخلخل آمیزه‌ها توسط چارچوب‌های فلز-آلی و پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان کاملاً پوشانده شده است. چارچوب‌های فلز-آلی توسط پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به منافذ و ساختار سه بعدی و متخلخل اسفنج متصل شده‌اند. در تهیه آمیزه‌ها، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به عنوان یک چسب عمل کرده و مانع از جدا شدن چارچوب فلز-آلی از درون منافذ و ساختار اسفنج شده است. در نتیجه وجود چارچوب فلز-آلی و پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان منجر به ویژگی‌های فراابگریزی و فراچربی‌دوستی آمیزه‌های تهیه‌شده (شکل ۲ فایل تکمیلی) و بهبود کارایی آن‌ها برای جذب ناخالصی‌هایی از جمله انواع روغن‌ها و حلال‌های آلی شده است.

### ۶-۳- نتایج جذب روغن با آمیزه m-ZIF-8@PU غوطه‌ور شده در محیط اسیدی و بازی

ظرفیت جذب روغن برای آمیزه m-ZIF-8@PU غوطه‌ور شده در محیط بازی و اسیدی در دمای اتاق بررسی شد. نتایج حاصل از جذب در شکل ۶ ترسیم گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، غوطه‌ور شدن در محیط اسیدی و بازی منجر به تغییرات جزئی در میزان جذب روغن شده است.



شکل ۶. نمودار ظرفیت جذب روغن توسط آمیزه m-ZIF-8@PU غوطه‌ور شده در محیط اسیدی و بازی.

### ۷-۳- نتایج جذب روغن با آمیزه m-ZIF-8@PU ساییده شده

با ساییدن سطح آمیزه m-ZIF-8@PU با سنباده و غوطه‌ور کردن آن در روغن‌های مورد مطالعه، تغییر محسوسی در نتایج حاصل از جذب مشاهده نشد. نتایج به دست آمده از ظرفیت جذب توسط این آمیزه در جدول ۱ بر حسب گرم روغن بر گرم جاذب گزارش شده است.

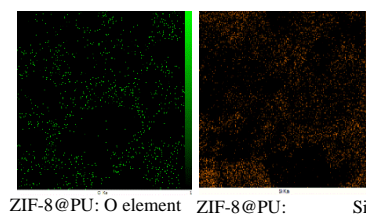
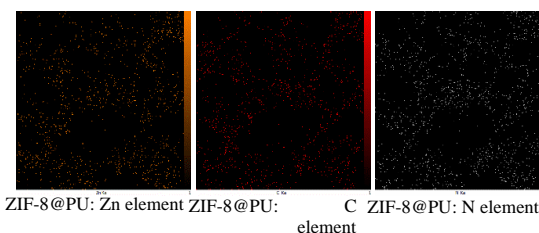
جدول ۱. ظرفیت جذب روغن (گرم روغن/گرم جاذب) توسط آمیزه m-ZIF-8@PU ساییده شده

ترکیب ها	روغن زیتون	روغن کنجد	روغن گل آفتابگردان	گازونیل	روغن هیدرولیک
m-ZIF-8@PU	۵۶	۵۸	۶۱	۶۰	۶۸
m-ZIF-8@PU (ساییده شده)	۵۵	۵۷	۵۸	۵۹	۶۶

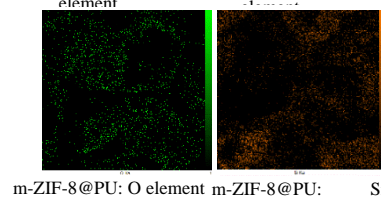
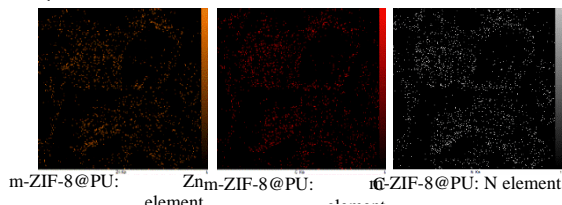
### ۸-۳- استفاده دوباره از جاذب

میزان آبگریزی و چربی‌دوستی، مقدار روغن جذب شده در واحد وزن جاذب، بازیابی روغن از جاذب و قابلیت استفاده دوباره از ویژگی‌های مهم برای یک جاذب مناسب تلقی می‌شوند. اسفنج تجاری پلی‌اورتان به علت ساختار متخلخل و به هم پیوسته گزینه‌ای مناسب برای جذب روغن بشمار می‌رود. در این پروژه استفاده دوباره از

### الف

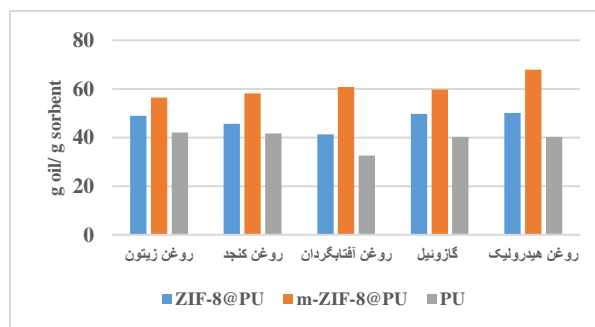


### ب



شکل ۴. الف) تصویرهای آنالیز نقشه‌برداری عنصری مربوط به آمیزه ZIF-8@PU. ب) تصاویر EDX-Mapping مربوط به آمیزه m-ZIF-8@PU.

مقایسه کارایی جذب آمیزه‌های تهیه شده در این پژوهش با نتایج گزارش شده قبلی در جدول ۱ فایل تکمیلی آورده شده است.



شکل ۵. ظرفیت جذب انواع روغن‌ها با اسفنج پلی‌اورتان، آمیزه ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU.

داد. استفاده دوباره از آمیزه‌های MOF@PU و m-MOF@PU برای روغن‌های خوراکی و صنعتی نیز بررسی شد. این نتایج برای هفت بار متوالی تکرار شد. ظرفیت و نگهداری روغن برای آمیزه‌ها سیر نزولی و کاهشی را نشان داد.

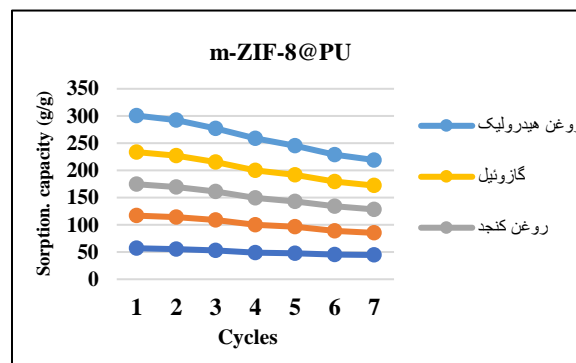
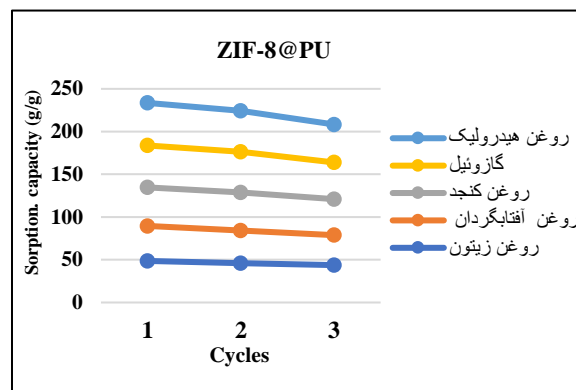
#### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر از دانشگاه شهید چمران اهواز بخاطر حمایت‌های معنوی و مادی (SCU.SC1401.29011) را اعلام می‌دارند.

#### مراجع

- [1] E. K. Sam, J. Liu, X. Lv, Ind. Eng. Chem. Res. **60**, 2353 (2021).
- [2] I. Ali, M. Asim, T. A. Khan, J. Environ. Manage. **113**, 170 (2012).
- [3] Z. Li, J. Chen, Y. Ge, J. Chem. Eng. **308**, 809 (2017).
- [4] C. Janiak, J. K. Vieth, New J. Chem. **34**, 2366 (2010).
- [5] J. -P. Zhang, Y. -B. Zhang, J. -B. Lin, X. -M. Chen, Chem. Rev. **112**, 1001 (2012).
- [6] H. Furukawa, N. Ko, Y. B. Go, N. Aratani, S. B. Choi, E. Choi, A. Ö. Yazaydin, R. Q. Snurr, M. O'Keeffe, J. Kim, Science **329**, 424 (2010).
- [7] O. Karagiari, M. B. Lalonde, W. Bury, A. A. Sarjeant, O. K. Farha, J. T. Hupp, J. Am. Chem. Soc. **134**, 18790 (2012).
- [8] L. S. Lai, Y. F. Yeong, N. C. Ani, K. K. Lau, A. M. Shariff, Part. Sci. Technol. **32**, 520 (2014).
- [9] W. Zhang, Y. Hu, J. Ge, H. -L. Jiang, S. -H. Yu, J. Am. Chem. Soc. **136**, 16978 (2014).
- [10] L. Liang, E. Ruckenstein, J. Membr. Sci. **114**, 227 (1996).
- [11] Y. He, D. Wu, M. Zhou, Y. Zheng, T. Wang, C. Lu, L. Zhang, H. Liu, C. Liu, ACS Appl. Mater. Interfaces. **13**, 15572 (2021).
- [12] J. Gu, H. Fan, C. Li, J. Caro, H. Meng, Angew. Chem. Int. Ed., **131**, 5351 (2019).
- [13] Z. Ansari-Asl, S. Darvish Pour-Mogahi, E. Darabpour, Appl. Nanosci. **13**, 369 (2023).
- [14] A. A. Nikkhah, H. Zilouei, A. Asadinezhad, A. Keshavarz, J. Chem. Eng. **262**, 278 (2015).
- [15] H. Kaur, G. C. Mohanta, V. Gupta, D. Kukkar, S. Tyagi, J. Drug Deliver. Sci. Technol. **41**, 106 (2017).
- [16] S. Mallakpour, V. Behranvand, New J. Chem. **44**, 15609 (2020).
- [17] Z. Ansari-Asl, Z. Shahvali, R. Sacourbaravi, E. Hoveizi, E. Darabpour, Microporous Mesoporous Mater. **336**, 11186 (2022).
- [18] T. Zhu, S. Xu, F. Yu, X. Yu, Y. Wang, J. Membr. Sci. **598**, 117681 (2020).

m-ZIF-8@PU و ZIF-8@PU پرداخته شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، آمیزه ZIF-8@PU فقط طی سه دوره قابلیت استفاده دوباره را دارد. ولی آمیزه m-ZIF-8@PU همانند آمیزه‌های گفته‌شده در بخش‌های قبلی، هفت مرتبه قابلیت استفاده دوباره را داشت. نتایج استفاده دوباره از آمیزه‌ها برای روغن کنجد، گازوئیل و روغن هیدرولیک نیز پس از هفت مرتبه در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودارهای استفاده دوباره از آمیزه‌های ZIF-8@PU و m-ZIF-8@PU.

#### ۴- نتیجه‌گیری

طیف زیرقرمز و الگوی پراش پرتو ایکس، تهیه موفقیت آمیز چارچوب‌های فلز-آلی ZIF-8، m-ZIF-8 و آمیزه آن‌ها را تایید کرد. نتایج به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز نقشه‌برداری عنصری پراکنندگی ذرات چارچوب‌های فلز-آلی در بستر پلیمری را نشان داد. مطالعه‌های جذب روغن و حلال‌های آلی نشان داد که آمیزه‌های تهیه‌شده می‌توانند روغن‌های خوراکی و صنعتی کنند. آمیزه‌های تهیه‌شده دارای کارایی مناسب در جذب روغن بر حسب گرم روغن بر گرم جاذب بودند که آمیزه m-ZIF-8@PU بهترین کارایی جذب روغن را برای روغن هیدرولیک به میزان ۶۸ گرم بر گرم جاذب نشان

- 
- [19] P. Ferreira, A. Carvalho, T. R. Correia, B. P. Antunes, I. J. Correia, P. Alves, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **14**, 05500 (2013).
- [20] Z. Rafiee, V. Keshavarz, *Prog. Org. Coat.* **86**, 190 (2015).
- [21] Y. Tamsilian, Z. Ansari-Asl, A. Maghsoudian, A. K. Abadshapoori, A. Agirre, R. Tomovska, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **125**, 204 (2021).