

مروری بر کاربرد چارچوب های فلز-آلی (MOFs) در حذف آلاینده های محیط زیست و تولید انرژی های پاک

هانیه برقی جهرمی^۱، محمد صالح برقی جهرمی^{۲*}

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

چکیده

در آلودگی های محیطی، به ویژه آلودگی هوا و آب، از چالش های بزرگ بشریت در عصر حاضر هستند. افزایش روزافزون جمعیت، صنعتی شدن و مصرف بی رویه منابع طبیعی، به انتشار آلاینده های مختلف در محیط زیست منجر شده است. چارچوب های فلز-آلی (MOF) (ها) دسته ای از مواد نانوذره ای با ساختارهای متخلخل و سطح ویژه بالا هستند که به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود، به عنوان جاذب های نوین برای حذف آلاینده های محیطی مورد توجه قرار گرفته اند. MOF ها می توانند طیف وسیعی از آلاینده ها، از جمله گازهای گلخانه ای، فلزات سنگین، مواد آلی فرار و رنگ ها را از محیط زیست جذب کنند. استفاده از MOF ها برای حذف آلاینده های محیط زیست و نیز تولید انرژی های پاک، رویکردی نوین و پایدار به منظور حل چالش های زیست محیطی است. نوآوری این مقاله در آن است که برای نخستین بار، به صورت نظام مند ارتباط میان کارایی MOF ها در حذف آلاینده ها و ظرفیت بالقوه آن ها در تولید انرژی های پاک مورد تحلیل و مقایسه قرار می گیرد. این رویکرد، نه تنها مرور جامعی از پیشرفت های اخیر ارائه می دهد، بلکه با برجسته سازی چالش ها و فرصت های پیش رو، مسیرهای تحقیقاتی آینده را نیز روشن می سازد.

واژه های کلیدی: چارچوب های آلی فلزی، آلودگی های محیط زیست، جذب، کاتالیست، انرژی های پاک

ایمیل نویسنده مسئول: mshbarghijahromi@ujiroft.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۸

۱- مقدمه

در حال حاضر آلودگی محیط زیست ناشی از تولیدات صنعتی، فعالیت های انسانی و فرآیندهای طبیعی و مصنوعی به موضوعی جهانی تبدیل شده است که کل زیست کره را تحت تاثیر قرار داده است. بسیاری از آلاینده ها به راحتی تخریب یا از اکوسیستم حذف نمی شوند و در نتیجه برای مدت طولانی در محیط وجود دارند [۸-۱]. به عنوان مثال آلاینده های مختلف غیرآلی و آلی سمی از

طریق ضایعات صنعتی مانند پوشش، رنگ آمیزی، معدن، تولید صنایع شیمیایی، هسته ای و غیره منتشر شده اند و در نتیجه باعث ایجاد آلودگی در اکوسیستم می شوند، در مقایسه با آلاینده های آلی، آلاینده های معدنی به دلیل حلالیت بالا و فراهمی زیستی بالا معمولاً در اکوسیستم پایدارتر هستند. آلاینده های غیر آلی به دلیل تجمع ساده آنها در غلظت ppm یا حتی در غلظت ppb در بدن انسان و زنجیره غذایی، کانون اصلی نگرانی بشمار میروند [۹]. از طرفی

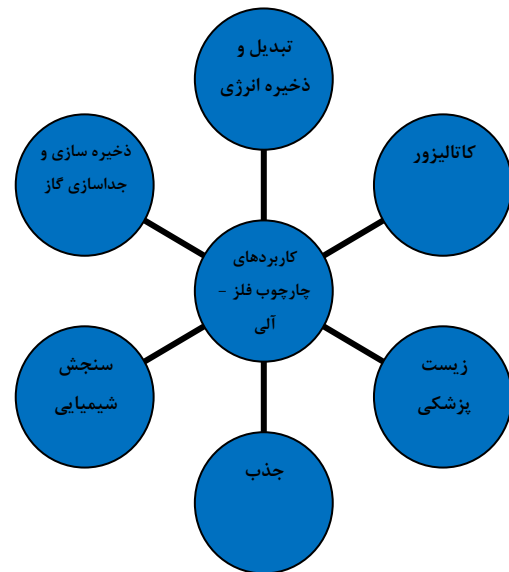
و مساحت سطح ویژه بالای آنهاست. گزارش شده است که مساحت سطح در آنها می تواند تا $10000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ نیز برسد [۱]. همچنین به عنوان پلیمرهای کئوردیناسیونی متخلخل ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی عالی دارند. پلیمرهای کئوردیناسیونی دارای مولکول‌های مهمان در حفره، از اوایل دهه ۱۹۵۰ معرفی شدند [۲]. در طول چند دهه گذشته، ظهور چارچوب‌های فلز-آلی که توسط یون‌ها یا خوشه‌های فلزی و پیوندهای آلی چند دندانه‌ای و از طریق پیوندهای کئوردیناسیونی (سنتز شبکه‌ای) ساخته می‌شوند، دامنه مواد متخلخل را به طور قابل توجهی غنا بخشیده است [۳]. انتخاب دقیق اجزای چارچوب‌ها می‌تواند کریستال‌هایی با تخلخل فوق العاده بالا و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا تولید کند. این ویژگی‌ها اجازه می‌دهند که فضای داخلی چارچوب‌ها برای استفاده در جداسازی گاز، ذخیره‌سازی گاز و کاتالیز و ... مناسب گردد [۴]. توانایی تغییر اندازه و ماهیت در چارچوب‌های فلز-آلی بدون تغییر توپولوژی، امکان ساخت سازه‌هایی با منافذ ۹۸ آنگستروم و با حداقل چگالی ۰/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب را میسر نموده است. این ویژگی‌ها امکان گنجاندن انتخابی مولکول‌های بزرگ به عنوان مثال ویتامین B12 و انواع پروتئین‌ها و بهره‌برداری از منافذ به عنوان واکنشگاهی کوچک را فراهم کرده است. پایداری حرارتی و شیمیایی چارچوب‌های فلز-آلی تا محدوده ۲۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش قابل توجه ذخیره‌سازی و جداسازی انواع گازها، کاتالیزور انواع واکنش‌های آلی و فعال‌سازی مولکول‌های کوچک نظیر هیدروژن شده است [۱ و ۴]. تهیه و توسعه و کاربرد چارچوب‌های فلز-آلی (شکل ۱) در طول سال‌ها به یکی از برجسته‌ترین دستاوردها در زمینه شیمی و علم مواد تبدیل شده است [۱].

احتراق سوخت‌های فسیلی برای برآوردن نیازهای جامعه در زمینه انرژی، مقادیر زیادی از آلاینده‌های گازی (COx، NOx، SO2، VOCs، و غیره) را به محیط زیست تخلیه می‌کند. علی‌رغم افزایش تولید انرژی تجدیدپذیر، منبع انرژی اولیه جهان همچنان بر اساس احتراق سوخت‌های فسیلی است. بر اساس گزارش ۲۰۱۷ جهانی انرژی و وضعیت گازهای گلخانه‌ای توسط آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، تقاضای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۷، ۲/۱ درصد افزایش یافته است و تقریباً سه چهارم (۷۵ درصد) آن با استفاده از سوخت‌های فسیلی تامین شده است [۱۰]. احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش حجم قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای (GHGs) و مواد خطرناک می‌شود. هزینه‌های خارجی نسبت داده شده به نیروگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ به عنوان مواد تامین کننده انرژی استفاده می‌کنند از ۴/۰ تا ۹/۵ سنت در هر کیلووات ساعت متغیر است که تقریباً سه برابر بیشتر از هزینه‌های نیروگاه‌های گازی و چندین برابر بیشتر از هزینه‌های مرتبط با فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و پاک است. جایگزینی سوخت‌های تجدیدناپذیر با منابع انرژی پاک به عنوان یک رویکرد کارآمد برای کاهش آلودگی جو و هزینه‌های خارجی همراه است. در مقیاس جهانی، صرفه جویی سالانه تا ۲۳۰ میلیارد دلار به طور بالقوه با دستیابی به سهم ۳۶ درصدی انرژی پاک در ترکیب انرژی جهانی تا سال ۲۰۳۰ قابل دستیابی است [۱۱]. در عصر حاضر، بخش قابل توجهی از تقاضای انرژی جهان را می‌توان از طریق استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک تامین کرد [۱۲]. یکی از راهکارهای موثر برای مقابله با چالش‌های آلودگی‌های محیط زیست، استفاده از موادی است که به حذف آلاینده‌های زیست محیطی و تولید انرژی‌های پاک کمک می‌کنند. چرا که انرژی و محیط زیست دو جنبه مهم جامعه بشری برای دستیابی به توسعه پایدار هستند [۱۳].

چارچوب‌های فلز-آلی بعنوان یک زیر طبقه از پلیمرهای کئوردیناسیونی، گروهی از ترکیبات نانو تا میکرومتر متخلخل متشکل از یون‌های فلزی یا خوشه‌هایی هستند که با لیگاندهای آلی کئوردینه شده و ساختارهای یک، دو یا سه بعدی ایجاد می‌کنند. مزیت چارچوب‌های فلز-آلی بر انواع ساختارهای کربن‌ها یا ژئولیت‌ها در تخلخل فوق العاده بالا

منظوره در حوزه محیط زیست و انرژی ارائه می‌شود. چارچوب‌های آلای-فلزی (MOFs) به عنوان راه حلی کارآمد برای پاکسازی محیط زیست از انواع آلاینده‌ها و تولید انرژی پاک به منظور کاهش معضلات و چالش‌های تهدید کننده جوامع بشری و دست یابی به توسعه پایدار انجام شده است.

۲- کاربرد چارچوب‌های فلز-آلی در حذف آلاینده‌های محیط زیست



شکل ۱. مروری بر کاربردهای مختلف چارچوب‌های فلز-آلی [۱].

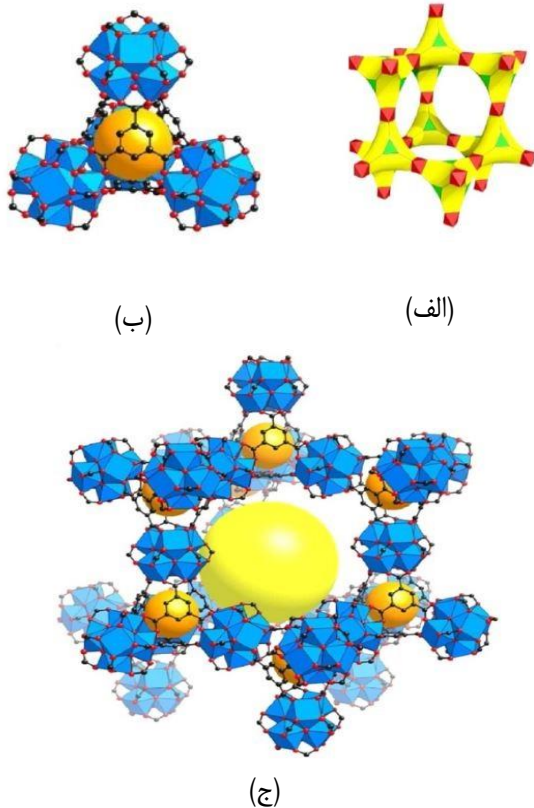
۲-۱- فلزات سنگین

فلزات سنگین به گروهی از فلزات سنگین اطلاق می‌گردد که دارای وزن مخصوص بیش از ۶ گرم بر سانتیمتر مکعب یا جرم اتمی بیشتر از ۵۰ می‌باشند، مانند آرسنیک، جیوه، کادمیم، مس، کروم، سرب و روی. فلزهای سنگین به شدت سمی هستند و از طریق عوامل مختلف از جمله آنتروپوژن (انسان زاد)، از طریق زباله‌های صنعتی و مصرفی، در اثر باران اسیدی و تجزیه خاک و آزادسازی فلزات سنگین به جویبارها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی و منابع آب وارد شوند [۱۸]. تجمع فلزات سنگین در بدن انسان و سایر موجودات زنده در طول زمان می‌تواند باعث بیماری‌های جدی مانند سرطان ریه و سرطان سایر اندام‌های تنفسی، کلیه و مثانه، آسیب به مغز و اندام‌های تولید مثل و اختلالات قلب و سیستم ایمنی شوند [۱۹،۲۰]. آرسنیک، سرب و جیوه معمولاً به عنوان سه رتبه اول در فهرست اولویت‌های سازمان‌های نظارتی به عنوان آلودگی‌های محیطی قرار می‌گیرند [۲۱]، از این رو بکارگیری روش‌هایی کارآمد جهت حذف آن‌ها ضروری است.

۲-۱-۱- آرسنیک

آرسنیک و تمامی ترکیبات آن بسیار سمی هستند. آرسنیک در چهار حالت اکسیداسیون وجود دارد، آرسنات، آرسنیت، آرسنیک عنصری و آرسین هم از طریق فرآیندهای طبیعی و هم از طریق فعالیت‌های انسانی در محیط زیست منتشر می‌شود [۲۲،۲۳]. تخمین زده می‌شود که در سراسر جهان بیش از ۲۰۰ میلیون نفر در معرض سطوح نایمن آرسنیک

چارچوب‌های فلز-آلی به عنوان عاملی امیدوار کننده در زمینه حذف آلاینده‌های زیست محیطی و نیز تولید انرژی پاک مورد بررسی و مطالعه گسترده واقع شده‌اند و مقالات متعددی به توانایی این مواد در این زمینه‌ها پرداخته‌اند، به عنوان مثال شیائوچی و همکاران، به بررسی فیلم‌های چارچوب فلز-آلی و کاربردهای آن‌ها در کنترل آلودگی محیطی پرداختند [۱۴]. راشد و همکاران، به بررسی جاذب‌های مبتنی بر چارچوب‌های فلز-آلی از دیدگاه حذف آلاینده‌های مختلف محیطی از فاضلاب پرداختند [۱۵]. ایمتاز و همکاران، کاربرد چارچوب‌های فلز-آلی در حذف جذبی آلاینده‌های آلی از آب، سوخت و هوا را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. ژانگ و همکاران، فیلترهای چارچوب فلز-آلی نانوالیافی برای کنترل موثر آلودگی هوا را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۷]. همچنین مقالات متعددی به خواص و توانایی‌های فوتوکاتالیستی و الکتروکاتالیستی MOFها در فرایند‌های مختلف تولید انرژی پاک مانند تولید هیدروژن و اتانول و متانول و غیره پرداخته‌اند. تفاوت این مقاله با مرورهای پیشین در آن است که به جای تمرکز جداگانه بر حذف آلاینده‌ها یا تولید انرژی، برای نخستین بار ارتباط میان این دو کاربرد کلیدی MOFها به طور هم زمان بررسی شده و بدین ترتیب، چشم‌انداز تازه‌ای برای توسعه مواد چند



شکل ۲. نانوذرات با چارچوب فلز-آلی

$Zr_6O_4(OH)_4(BTC)_2(HCOO)_6$ را نشان می دهد که به ترتیب (الف) MOF-808 دارای واحدهای هشت وجهی (قرمز) و مثلثی (سبز) است که قفس های چهاروجهی (ب) و منافذ بزرگ آدامانتان (ج) را تشکیل می دهند. رنگ اتم ها: C، سیاه؛ O، قرمز؛ Zr، چندوجهی های آبی. اتم های H برای وضوح حذف شده اند. توپ های زرد و نارنجی نشان دهنده فضای چارچوب هستند. [۲۸].

در سال ۲۰۲۳ گوپی و همکاران یک جاذب جدید $CoxFe_3-xO_4$ از چارچوب های فلز-آلی با فرآیند کلسینه سازی استخراج کرده و به عنوان یک جاذب بسیار کارآمد و مقرون به صرفه برای حذف آرسنیک از آب معرفی نمودند [۲۹]. علاوه بر این، اثرات بارگیری جاذب، pH، بازیافت و زمان تماس را بر راندمان حذف آرسنیک $CoxFe_3-xO_4$ را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج کار آن ها مشخص کرد که استفاده از جاذب $CoxFe_3-xO_4$ برای حذف $As(III)$ می تواند دسترسی به آب آشامیدنی سالم به ویژه در مناطقی با سطوح بالای آلودگی

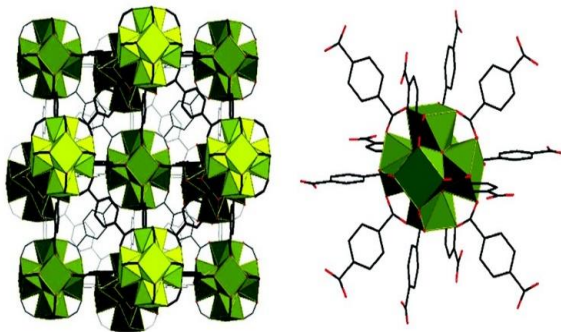
قرار داشته باشند. قرار گرفتن مزمن در برابر آرسنیک باعث ایجاد اختلالات متعدد در انسان از جمله شرایط پوستی، قلبی عروقی، عصبی، ریوی، کلیوی و متابولیک می گردد [۲۴]. آلودگی آرسنیک در آب های زیرزمینی عمدتاً نتیجه فرسایش سنگ، دفع صنعتی و فعالیت های کشاورزی است. قرار گرفتن انسان در معرض آرسنیک یک نگرانی مهم بهداشت جهانی است، زیرا بیش از نیمی از جمعیت جهان از آب های زیرزمینی برای آشامیدن، پخت و پز، کشاورزی و سایر مقاصد خانگی استفاده می کنند. آرسنیک همچنین در منابع غذایی رایج از جمله برنج و غذاهای دریایی وجود دارد [۲۴]. تا کنون فناوری های زیادی برای حذف آرسنیک در محیط آبی مورد بررسی قرار گرفته است. فن آوری های اصلی شامل انعقاد/لخته سازی، تبادل یونی، جداسازی غشایی، اکسیداسیون، روش های الکتروشیمیایی، گیاه پالایی، زیست پالایی و فیلترهای زیستی، جذب سطحی و اسمز معکوس می باشند [۲۴، ۲۵]، که در این میان جذب همیشه به عنوان یکی از موارد بسیار مناسب مطرح بوده است. به همین علت مواد مختلفی برای حذف آرسنیک ساخته شده است، مانند کربن فعال، TiO_2 ، CeO_2 ، ZrO_2 ، MgO ، Fe_3O_4 و خاک لاتریت [۲۵]. اما این مواد نرخ جذب بالایی از آرسنیک از خود نشان نمی دهند. اخیراً، چارچوب های فلز-آلی به عنوان یک جاذب برای حذف آرسنیک گزارش شده اند. به عنوان مثال، وو و همکاران نانوبلورهای ZIF-8 را به صورت سلسله مراتبی تهیه کرده و از آن برای حذف آرسنیک استفاده کردند [۲۶]. همچنین لی و همکاران نانوذرات با چارچوب آلی فلزی $Zr_6O_4(OH)_4(BTC)_2(HCOO)_6$ را با موفقیت با امواج ماکروویو در کمتر از ۵ دقیقه زمان تابش سنتز کردند و از نانوذرات MOF-808 به دست آمده برای حذف آرسنیک استفاده کردند (شکل ۲) [۲۷]. این سامانه با سوپر اسیدیته بالا به یک جاذب عالی برای حذف آرسنیک تبدیل شده است. ظرفیت جذب نانوذرات MOF-808 سنتز شده برای آرسنیک $24/83$ میلی گرم بر گرم بود. علاوه بر این، جاذب ها پس از پنج چرخه همچنان $82/10$ درصد راندمان حذف را حفظ کردند، که نشان می دهد ساختار MOF-808 می تواند به عنوان یک جاذب قابل بازسازی عمل نماید [۲۷].

AS را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. به دلیل مساحت سطح داخلی بزرگ، قابلیت تنظیم شیمیایی آسان، و توانایی عالی برای جذب انتخابی مقادیر زیادی از گونه‌های مهمان [۲۹]، نانوذرات با چارچوب فلز-آلی در مقایسه با جاذب‌های دیگر، جذب بالاتری را از خود نشان می‌دهند و ظرفیت حذف آرسنیک بیشتری را نسبت به این جاذب‌ها دارا می‌باشند و در همین حال، نانوذرات با چارچوب‌های فلز-آلی دارای پایداری شیمیایی عالی و قابلیت استفاده مجدد هستند.

۲-۱-۲- جیوه

جیوه یک عنصر کمیاب سمی است که معمولاً در سنگ معدن‌هایی مانند سینابار یافت می‌شود و می‌تواند به طور طبیعی توسط فوران-های آتشفشانی و هوازدگی سنگ‌ها تولید شود. با این حال، منابع اولیه آلودگی جیوه زیست‌کره، فعالیت‌های انسانی گذشته و فعلی، از جمله استخراج طلا، تولید فلزات غیرآهنی، احتراق زغال سنگ یا تولید سیمان و موارد دیگر هستند [۳۰]. مطالعات نشان می‌دهند که در نتیجه تماس مستقیم یا استنشاق بخارات جیوه، اختلالات مختلفی به وجود می‌آید که برخی از آن‌ها عبارتند از: اختلال دستگاه خود-ایمنی، اختلال در عملکرد کلیه، ناباروری، تأثیرات منفی روی جنین، مشکلات رفتاری عصبی، ناکارآمدی قلبی، آلزایمر، اثر بر روی غده تیروئید، تولید مثل و سمیت ژنی از جمله آنهاست [۳۱،۳۲]. چالش کنونی توسعه مواد و تکنیک‌های کارآمدی است که می‌توانند برای رفع آلودگی جیوه در آب و جو حتی در غلظت‌های پایین مورد استفاده قرار گیرند [۳۳]. تا کنون روش‌های متنوعی برای حذف جیوه از نمونه مختلف بررسی شده است مانند ترسیب انتخابی [۳۴]، استخراج مایع-مایع [۳۵]، روش تبادل یونی و روش الکترولیز [۳۶]. مشابه آرسنیک جذب یک روش کارآمد برای حذف جیوه می‌باشد اما ظرفیت جذب پایین، سرعت آهسته جذب یا گزینش پذیری ضعیف جاذب‌های سنتی مانند کربن‌های متخلخل، سیلیس متخلخل، ژئولیت‌ها و رزین‌ها این کار را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین توسعه جاذب‌های جدید با شاخص‌های ایده‌آل ضروری است [۳۷]. در مقایسه با غالب مطالعات چارچوب‌ها

بر پایه زیرکونیوم و روی بوده است [۳۸،۳۹]. در سال ۲۰۲۳ ژانگ و همکاران یک چارچوب فلز-آلی جدید بر پایه تیتانیوم تهیه کرده و از آن برای حذف جیوه استفاده نمودند [۳۹]. این یک جاذب جدید Ti-MOF-SH با ساختار اسید تیودی استیک به عنوان یک لیگاند آلی و خوشه یون Ti با یک روش سنتزی ساده تهیه شد. ساختار اسید دی کربوکسیلیک و محل فعال حاوی گوگرد، امکان افزایش پایداری و عملکرد جذبی را به این سامانه داده است. آنها همچنین عوامل تأثیر گذار نظیر pH، زمان واکنش، غلظت اولیه، اثر دماهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. انتخاب‌پذیری و قابلیت استفاده مجدد مطالعه و نتایج خوبی را نشان داد. در مقاله‌ای به سال ۲۰۲۱ ژائو و همکاران، چارچوب‌های فلز-آلی اصلاح شده با گوگرد (UiO-66) (S) بر روی غشاهای پلیمری (NHC(S)NHMe@NWF-g-MAH) مطالعه کردند (شکل ۳). گزینش پذیری، سرعت جذب مناسب و قابلیت بازسازی در جذب جیوه قابل توجه بود [۴۰].



شکل ۳. ساختار نظری UiO-66 [۴۱].

US-N گزینش پذیری بالایی برای جذب جیوه با عملکرد و جداسازی عالی در سیستم‌های آبی مختلف نشان داد. لایه نازکتر US-N سرعت جداسازی سریعتر و ظرفیت جذب تعادلی بالاتری دارد. نتایج کار آن‌ها نشان داد که US-N با یک لایه ۵۹/۳ نانومتری می‌تواند بیش از ۸۵ درصد جیوه را در ۲۰ دقیقه از محلول آبی حذف کند. علاوه بر این، US-N به سادگی می‌تواند چندین بار برای حذف جیوه

حذف سرب از نمونه‌های آبی استفاده شده است [۴۶]. لایه سیلیکازل با ایجاد تعداد زیادی از پیوندهای OH پایداری MOF-5 را در آب بهبود می‌بخشد. رفتارهای جاذب HS-mSi@MOF-5 از طریق داده‌های سینتیک جذب و ایزوترم مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین آزمایشات نشان داد که ظرفیت جذب اشباع HS-(qm) MOF-5 برای سرب ۳۱۲ میلی گرم در گرم است در حالی که این مقدار برای MOF-5 تنها ۲۱۱ میلی گرم در گرم است. در نهایت، مکانیسم‌های ممکن بین MOF-5 و عامل‌دار تیول و یون‌های سرب سبب شد که این جاذب به عنوان گزینه‌ی مناسب تری برای حذف سرب پیشنهاد شود [۴۶]. اگرچه چارچوب‌های متعدد فلز-آلی برای جذب Pb^{2+} بررسی شده‌اند، اما اکثر این مواد تک عاملی هستند. اما در سال ۲۰۲۳ کان و همکاران از ویژگی‌های ساختاری و هماهنگ لیگاندهای آدنین برای ساخت چارچوب فلز-آلی چند منظوره (JLU-MOF68) استفاده نمودند که برای جداسازی گاز C_3H_8/CH_4 و حذف همزمان Pb^{2+} کاربرد دارد [۴۸]. JLU-MOF68 فعال شده نه تنها ظرفیت جذب فوق العاده بالای سرب ۲+، یعنی ۸۰۵ میلی گرم در گرم را نشان داد، بلکه راندمان حذف فوق العاده بالای سرب را تحت شرایط مختلف pH مختلف و یون‌های همزیست نشان داد. علاوه بر این، جاذب را می‌توان حداقل پنج بار مورد استفاده مجدد قرار داد و راندمان حذف تقریباً پس از پنج چرخه ثابت می‌ماند. بنابراین، JLU-MOF68 کاربرد بالقوه و گسترده‌ای برای جداسازی انتخابی C_3H_8/CH_4 و حذف Pb^{2+} دارد و یکی از چارچوب‌های فلز-آلی‌های چند منظوره بسیار عالی است [۴۸].

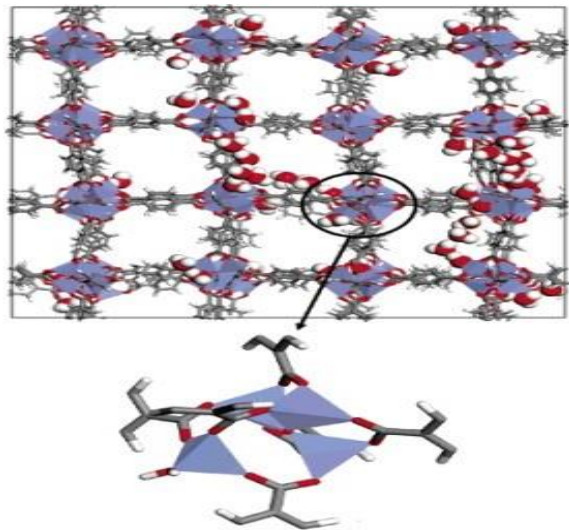
۲-۲- آلاینده‌های آلی

در جامعه مدرن امروزی، تعداد فزاینده‌ای از ترکیبات آلی خطرناک در محیط تخلیه می‌شود. بیشتر آنها قبل از رها شدن توسط روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تخریب یا سم‌زدایی می‌شوند. گرچه روش‌های بیولوژیکی یک فرآیند حذف برای برخی از ترکیبات آلی هستند، اما محصولات تجزیه زیستی آنها نیز ممکن است، خطرناک

بازسازی شود و عملکرد اولیه را حفظ کند (نسبت حذف $< 98\%$) که نشانگر دوام و پایداری عالی است [۳۹].

۲-۱-۳- سرب

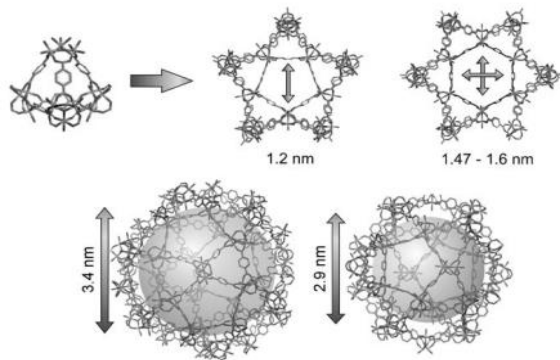
سرب، فلزی سمی است که حتی در غلظت‌های پایین به دستگاه عصبی آسیب رساند و موجب بیماری‌های خونی و مغزی می‌شود. تماس طولانی با این فلز یا نمک‌های آن مخصوصاً نمک‌های محلول یا اکسید غلیظ آن می‌تواند باعث بیماری‌های کلیه و دردهای شکمی شود [۴۲-۴۴]. به گزارش سازمان بهداشت جهانی حداکثر حد مجاز سرب در آب آشامیدنی ۰/۰۵ میلی گرم در لیتر است [۴۵]. برای کاهش آلودگی‌های محیطی از سرب بسیاری از فرآیندها مانند جذب، رسوب، انعقاد، تبادل یونی، الکترودیالیز، انعقاد الکتریکی و اسمز معکوس توسعه داده شده است [۴۵]. در میان روش‌های فوق جذب به وسیله چارچوب‌های فلز-آلی نتایج رضایت بخشی را به ارمغان آورده است. به عنوان مثال MOF-5 که از خوشه‌های $[Zn_4O]^{6+}$ ساخته شده و توسط گروه‌های بنزن-۴،۱-دی کربوکسیلات به هم متصل شده است شکل (۴) [۴۶].



شکل ۴. ساختار MOF-5 طرح رنگی بنفش (Zn)، قرمز (O)، خاکستری (C) و سفید (H) [۴۷].

در مطالعات ژانگ و همکاران از یک MOF-5 عامل دار شده با تیول تحت عنوان HS-mSi@MOF-5 برای

جاذب‌های با چارچوب‌های فلز-آلی است. مهرعلی پور و همکاران BiOI@NH₂-MIL125(Ti)/Zeolite را به عنوان یک چارچوب فلز-آلی جدید سنتز کرده و از آن برای حذف بنزن از جریان هوای آلوده استفاده نمودند. در این شرایط بیش از ۹۹ درصد بنزن جذب شده است [۵۷]. همچنین در مطالعه خوش اخلاق و همکاران جاذب MIL-101 (شکل ۵)، به عنوان یک ماده با چارچوب آلی فلزی، سنتز شد و برای حذف غلظت‌های نسبتاً کم بنزن (۲۰۰ ppm) از یک فاز گاز با یک سیستم جریان پیوسته آزمایش شد. نتایج کار آن‌ها نشان داد که MIL-101 یک جاذب برای بنزن است که پس از شش چرخه مصرف، درصد جذب ۷۶/۵ درصد را برای بنزن نشان می‌دهد [۵۸].



شکل ۵. ساختار، منافذ و حفره های MIL-101 [۵۹].

۲-۲-۲- فنل

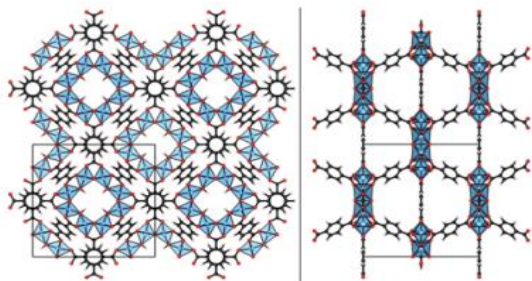
فنل در بسیاری از صنایع مانند پالایش نفت، پتروشیمی، داروسازی، پلاستیک، رنگ، رزین سازی، خمیر کاغذ و محصولات چوبی تولید می‌شود. قرار گرفتن در معرض فنل با غلظت کم می‌تواند منجر به بیماری‌هایی مانند دنا توره شدن پوست شود و قرار گرفتن در معرض طولانی مدت می‌تواند منجر به بیماری‌های مختلفی مانند فلج، بی‌ثباتی متابولیک، تخریب بافت و غیره شود [۶۰]. آلاینده‌های فنلی توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده به عنوان آلاینده های اولویت دار طبقه بندی می‌شوند زیرا دارای سمیت حاد، ماهیت بیولوژیک مقاوم و اثرات سمی بر حیوانات و انسان‌ها هستند و برای مدت طولانی در محیط

باشند. علاوه بر این، برخی از ترکیبات تجزیه ناپذیر که به همراه ترکیبات تخریب شده در محیط تخلیه می‌شوند، می‌توانند مشکلاتی ایجاد کنند زیرا معمولاً از طریق چندین کانال مانند تجمع زیستی به انسان بازمی‌گردند. در میان این آلاینده‌ها، رنگ‌ها، فنولیک‌ها و آفت‌کش‌ها اخیراً به دلیل سمیت ویا ماندگاری دراز مدت در محیط، نگرانی‌های زیادی داشته‌اند [۴۹]. همچنین آلاینده های آلی پایدار به دلیل ماندگاری طولانی به عنوان قاتل خاموش در نظر گرفته می‌شوند. این ترکیبات در همه جای محیط ما و از جمله درون بدن گیاهان، حیوانات و انسان‌ها وجود دارند. و مسئول بیماری‌های کشنده مختلف و مشکلات زیست محیطی هستند. بیماری‌های مختلف مانند دیابت، چاقی، اختلالات غدد درون ریز، سرطان، مشکلات قلبی عروقی و تولید مثل از جمله آنهاست [۵۰]. انواع آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربن‌ها (به عنوان مثال روغن)، ترکیبات معطر (مانند فنل‌ها، بی‌فنیل‌ها)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه-ای (مانند نفتالین، فنانترن، پیرن)، آفت-کش‌ها، علف‌کش‌ها، داروها، مواد شوینده و پروتئین‌های موجود در پلاستیک‌ها هستند [۵۱].

۲-۲-۱- بنزن

بنزن با تولید جهانی بیش از ۶۱ میلیون تن در یک ماده مصرفی ضروری در صنایع شیمیایی است [۵۴]. از طرف دیگر بنزن یک آلاینده زیست محیطی فراگیر است که توسط فرآیندهای طبیعی (به عنوان مثال، گاز طبیعی، نفت، فرآیندهای احتراق و غیره) و انسان زایی (مانند انتشارات صنعتی و وسایل نقلیه، فرآیندهای شیمیایی، دود سیگار و غیره) تولید می‌شود و از راه‌های استنشاقی وارد بدن انسان شده و می‌تواند بیان ژن را با مکانیسم های اپی ژنتیکی، از جمله تغییرات بیان miRNA تغییر دهد [۵۵]. بنزن یک عامل سرطان‌زا و خطرناک است و قرار گرفتن در معرض بنزن در طول رشد جنین باعث ناهنجاری های جنینی می‌شود. این پدیده خطر ابتلا به بیماری در مرحله جنینی، به ویژه سرطان زایی را که عمدتاً با بدخیمی های خونی مرتبط است، افزایش می‌دهد [۵۶]. یکی از بهترین روش‌ها برای حذف بنزن که در مقالات متعدد به آن اشاره شده استفاده از

یا تولید می‌شود، دیگر منابع اصلی انتشار تولوئن هستند. تولوئن یک عامل بازدارنده سیستم عصبی مرکزی است و دست زدن به مقدار کمی از این ماده باعث سرگیجه، سرخوشی و گیجی در انسان می‌شود. با این حال، تماس با غلظت‌های بالای تولوئن می‌تواند باعث آتاکسی، بیهوشی و حتی مرگ شود [۶۴،۶۵]. غلظت مجاز تولوئن برای محل کار ۵۰ ppm است. تولوئن معمولاً از طریق استنشاق در محل کار وارد بدن می‌شود [۶۶]. با توجه به اثرات مضر تولوئن بر سلامت کارگران و همچنین کاربرد گسترده آن در صنایع مختلف، حذف این آلاینده و جلوگیری از انتشار آن در محیط کار ضروری است. اخیراً محققان مشاهده کردند که چارچوب‌های فلز-آلی می‌توانند جذب گاز تولوئن و تخریب فوتوکاتالیز آنرا میسر سازد. به عنوان مثال در مطالع Jin و همکاران یک چارچوب فلزی آلی مبتنی بر تیتانیوم تحت عنوان MIL-125 (شکل ۶) را از یک کلاستر فلزی (Ti-oxo) و ۴،۱-بنزن دی کربوکسیلیک اسید تهیه کرده و از آن برای حذف تولوئن استفاده نمودند [۶۷].



شکل ۶. ساختار MIL-125 Ti، O، C و H به ترتیب با رنگ‌های آبی، قرمز، مشکی و بژ به تصویر کشیده شده اند [۶۸].

ولینجری و همکاران مکانیسم حذف جذبی تولوئن را در برابر چارچوب‌های فلز-آلی -UiO-66، UiO-66(NH₂) ZIF-67 MOF199, MOF-5, MIL-101(Fe) مورد بررسی قرار دادند UiO-66 (NH₂) و ZIF-67 دارای گروه‌های NH باند منفرد در چارچوبی هستند که امکان تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکول‌های مهمان را دارند. MOF-199 به دلیل سایت‌های فلزی باز و مساحت سطح بالا و UiO-66

آبی باقی می‌مانند. علاوه بر این، ترکیبات فنلی به طور منظم از فعالیت‌های خانگی، کشاورزی و صنعتی وارد آب‌ها می‌شوند. بنابراین، ترکیبات فنلی مانند فنل‌ها و کلروفنل‌ها به عنوان آلاینده‌های فنلی سمی طبقه بندی شده‌اند [۶۱]. بنابراین جداسازی و حذف فنل حائز اهمیت می‌باشد. مقالات متعدد به حذف فنل با استفاده از چارچوب‌های فلز-آلی پرداخته اند، به عنوان مثال بهادرا و همکاران به بررسی جذب فنل از یک سوخت توسط کربن فعال و یک چارچوب متخلخل فلزی-آلی معمولی (MOF، MIL-101) پرداختند. نتایج کار نشان داد که MIL-101 ظرفیت جذب فنل قابل توجه ۲/۷ برابری بیش از کربن فعال دارد [۶۲]. علاوه بر این، ظرفیت جذب با پیوند اتانول آمین در سایت‌های غیراشباع در MIL-101 تا حدود ۳/۷ برابر کربن فعال افزایش می‌یابد [۶۲]. همچنین ژی و همکاران از ترفالیک اسید-روی و MOF-5، به عنوان یک جاذب موثر برای جداسازی و حذف موثر فنل در فاضلاب‌ها استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که MOF-5 را می‌توان در تصفیه فاضلاب به دلیل کانال‌های فراوان، ساختار منظم، سهولت آماده سازی و کم بودن هزینه در تهیه آن، استفاده کرد. به طور کلی جذب فنل توسط MOF-5 در عرض ۳۰ دقیقه به پایان می‌رسد. غلظت اولیه محلول آبی فنل، دما، دوز جاذب و pH اولیه بر میزان حذف تاثیر می‌گذارد. وقتی که غلظت اولیه محلول آبی فنل در محدوده ۲۵ تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر، و مقدار pH بهینه شود، نرخ حذف به ۹۷٪ یا بیشتر می‌رسد. همچنین جاذب با خیساندن و شستشو با اتانول بازیافت شده و اثر جذب پس از شستشو جاذب هنوز خوب است به این ترتیب می‌توان از این جاذب بارها استفاده کرد [۶۳].

۲-۲-۳- تولوئن

تولوئن یک هیدروکربن معطر و فرار است و به عنوان حلال در صنایع مختلف مانند رنگ، تینر، درزگیر سیلیکونی، معرف‌های شیمیایی، پلاستیک، جوهر چاپ، چسب و ضد عفونی کننده استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از آن برای تهیه فوم و TNT استفاده کرد. وسایل نقلیه، هواپیما، بنزین پراکنده و سایر فرآیندهایی که در آنها تولوئن استفاده

MIL-101 (Fe) به دلیل منافذ و اندازه‌های حفره بزرگ خود شناخته شده‌اند، علاوه بر این، MOF-5 به دلیل فراوانی استفاده در مقالات به عنوان مرجع برای سایر چارچوب‌های فلز-آلی انتخاب شده‌اند. ظرفیت جذب تولوئن در آنها UiO-66 (NH₂)، UiO-66 (NH₂)، MOF-199، ZIF-67، MIL-101 (Fe) و MOF-5 به ترتیب ۲۵۲، ۲۲۴، ۱۵۹، ۹۸/۳ و ۳۲/۹ میلی گرم در گرم است [۶۹].

۲-۲-۴- استایرن

استایرن یک ماده شیمیایی پایه است که به عنوان ماده خام برای تهیه پلی استایرن و رزین‌های پلی استر غیراشباع و در تولید رزین‌های مصنوعی، لاستیک‌های مصنوعی، رنگ-ها و چسب‌ها استفاده می‌شود [۷۰]. سالانه مقادیر زیادی از ترکیب سمی استایرن توسط صنایع پتروشیمی و فرآوری پلیمر تولید و استفاده می‌شود و نتیجه مستقیم آن این است که حجم قابل توجهی از استایرن به دو شکل مایع و گاز در محیط منتشر می‌شود [۷۱]. سازمان ایمنی و بهداشت شغلی در سال ۲۰۱۹ انتشار مواد سرطان‌زا در هوا را گزارش کرد که ۴۷ درصد از انتشار سرطان‌زا در هوا مربوط به استایرن است. از طرف دیگر، قرار گرفتن کوتاه مدت در معرض بخارات استایرن ممکن است منجر به مشکلات تنفسی، سوزش چشم و عوارض گوارشی شود، در حالی که قرار گرفتن در معرض مزمن ممکن است بر سیستم عصبی مرکزی تأثیر بگذارد و باعث سردرد، خستگی، ضعف، افسردگی و کاهش شنوایی شود و بنابراین، استراتژی‌های جلوگیری از انتشار آن، حذف آن از محیط زیست و درک مسیر تخریب آن موضوعات تحقیقاتی مهمی هستند [۷۲، ۷۳]. یک دسته از موادی که به علت خواص منحصربه-فرد در حذف استایرن استفاده می‌شود چارچوب‌های فلز-آلی هستند که در مقالات زیادی به استفاده از آن‌ها پرداخته شده است به عنوان مثال وان و همکاران به طور ابتکاری توانایی ZIF-67، به عنوان یک ماده جدید با چارچوب فلز-آلی را برای جذب میکروپلاستیک‌های پلی استایرن از محلول‌های آبی و فاضلاب پرداختند. نرخ جذب پلی استایرن‌ها توسط ZIF-67 به ۹۲/۱ درصد می‌رسد و جذب

مطلوب طی ۲۰ دقیقه و در دمای ۲۹۸ کلونین و pH=8 حاصل شد. تجزیه و تحلیل‌های بیشتر نشان داد که برهمکنش‌های پیوند هیدروژنی، انباشته شدن π-π، و برهمکنش‌های الکترواستاتیکی نقش مهمی در جذب پلی استیرین توسط ZIF-67 در محلول‌های آبی ایفا می‌کنند. یافته‌های آن‌ها بینش مهمی در خصوص حذف پلی استیرین‌ها از محیط‌های آبی اسیدی و ضعیف قلیایی و فاضلاب‌ها فراهم می‌کند [۷۴]. همچنین مداک و همکاران یک چارچوب فلزی آلی مبتنی بر کروم (Cr-MOF/MIL-101) را جهت حذف پلی استایرن بررسی کردند-Cr MOF از طریق یک روش هیدروترمال با استفاده از نیترات کروم و اسید ترفتالیک سنتز شد و با روش‌های مختلف آنالیز و از آن برای حذف نانوپلاستیک‌های پلی استایرن در آب استفاده شد. راندمان حذف ۹۶ درصد و حداکثر ظرفیت جذب ۸۰۰ میلی گرم بر گرم به دست آمد. همچنین ظرفیت بازسازی قابل قبولی را برای حذف چرخه ای پلی استیرین‌ها از خود نشان داد [۷۵].

۲-۲-۵- هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای

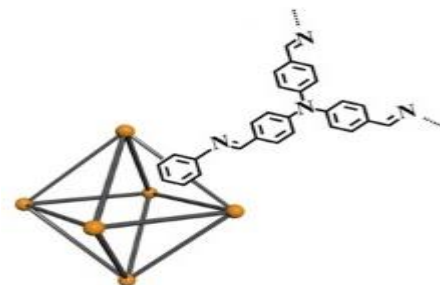
هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای آلاینده‌هایی از منابع متعدد طبیعی و انسانی به وجود می‌آیند و در همه جا در محیط وجود دارند. بسیاری از آنها برای انسان بسیار سمی با خواص سرطان‌زایی و جهش‌زایی بالا هستند [۷۶]. از انواع آن می‌توان آنتراسن، تتراسن، کریزین، تری‌فنیلن، پنتاسن و آلفا بنزو پیرین نام برد [۷۷]. هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای به دلیل خواص ذاتی خود مانند ساختارهای حلقه‌ای آروماتیک هتروسیکلیک، پایداری در برابر حرارت و آب‌گریزی در محیط مقاوم و بسیار پایدار می‌باشند. آن‌ها برای سیستم‌های مختلف بدن موجودات زنده بسیار سمی، سرطان‌زا، ایمونوتوکسیک، تراژورن و جهش‌زا هستند [۷۸-۸۱]. یکی از بهترین روش‌ها برای حذف آن‌ها استفاده از Co-MOF-74 برای حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای از محلول‌های آبی استفاده نمودند. راندمان حذف بیش از ۸۰٪ بود و قابلیت استفاده مجدد عالی را برای چرخه‌های بازسازی چندگانه نشان داد. علاوه بر این، ماده

خطرات بیشتری را در طبیعت ایجاد می‌کنند که برخی از آن‌ها حتی در غلظت‌های بسیار کم منجر به آسیب جدی می‌شوند. از این رو سازمان بهداشت جهانی دستورالعمل‌ها و برنامه ریزی‌هایی را برای حذف آلاینده‌ها در دستور کار بسیاری از سازمان‌ها و کشورها قرار داده است [۸۵]. مهم‌ترین آلاینده‌های معدنی عبارتند از نیترات‌ها (NO_3^-)، فسفات‌ها (PO_4^{3-}) و هالیدها می‌باشند [۸۶]. این آلاینده‌ها به راحتی تخریب یا از اکوسیستم حذف نمی‌شوند و در نتیجه برای مدت طولانی در محیط وجود دارند. چنین آلاینده‌هایی در محیط‌ها حتی در غلظت‌های بسیار کم برای سلامتی انسان سمی هستند، زیرا می‌توانند وارد بدن انسان شده و سپس در سراسر زنجیره غذایی در بدن انسان تجمع کنند و باعث ایجاد آسیب به عملکرد سیستم‌هایی مانند اسکلت، مشکلات کلیوی، آسیب به سیستم قلبی-عروقی و جمجمه شوند [۸۷]. روش‌های زیادی مانند غشاء، جذب، فیلتراسیون، تبادل یونی، رسوب همزمان، تجزیه، کاهش، تصفیه بیولوژیکی جهت حذف این آلاینده‌ها از محلول‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۸۷]. کامپوزیت‌های مبتنی بر چارچوب‌های فلز-آلی به دلیل ویژگی‌های بارز مانند طیف وسیعی از قابلیت‌ها، پایداری بالا و پتانسیل بالا برای اصلاح آسان، معمولاً به عنوان کاندیداهای عالی برای استفاده به عنوان جاذب برای حذف آلاینده‌های معدنی در نظر گرفته می‌شوند [۸۸].

۲-۳-۱- نیترات

نیترات یک ماده مغذی اصلی مورد نیاز برای رشد گیاه است و کودهای نیتروژن دار به طور معمول در زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شوند. در سراسر جهان برای افزایش تولید محصولات زراعی از نیترات استفاده می‌شود که در نتیجه آن، غلظت نیترات در آب‌های سطحی و زیرزمینی افزایش می‌یابد و استفاده بیش از حد از کودهای نیتروژن‌دار و همچنین دفع پسماندهای شهری و صنعتی تصفیه نشده مشکل جدی زیست محیطی جهانی را برای منابع آبی مانند خلیج‌ها، دریاچه‌ها داخلی، دریاچه‌ها و ... به وجود می‌آورد [۸۹]. سه منبع مهم نیترات در رژیم غذایی سبزیجات، گوشت و آب هستند [۹۰]. سبزیجات منبع اصلی نیترات رژیم

معرفی شده H-Co-MOF-74 دارای سطح بزرگ برابر با $633/6$ متر مربع بر گرم با ساختار و مکان‌های فعال جذب متعدد است. این سطح بزرگ متخلخل انتقال جرم را تسریع و زمان تعادل جذب را کوتاه می‌کند. با بارگذاری H-Co-MOF-74 در غشاهای نانوالیافی، H-NFM-ها آب گریزی بالا، پایداری مکانیکی و حرارتی خوبی دارند، و فیلترها و غشاهای ساخته شده از آنها را می‌توان به راحتی پس از تکمیل جذب به طور جداگانه بازیافت کرد [۸۲]. همچنین زانگو و همکاران به مقایسه‌ی چارچوب‌های فلز-آلی UiO-66 (Zr) و NH₂-UiO-66 (Zr) برای حذف آنتراسن و کریزین در محیط آبی پرداختند. نتایج کار آن‌ها درصد حذف ۹۸/۶ و ۹۶/۴ درصد از آنتراسن در ۲۵ دقیقه‌ای و نیز ۹۷/۹ و ۹۵/۷ درصد از کریزین به ترتیب با UiO-66 (Zr) و NH₂-UiO-66 (Zr) در زمان ۳۰ دقیقه‌ای را نشان می‌دهد. و مشخص شد که UiO-66 نسبت به NH₂-UiO-66 کاندیدای بهتری برای حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای می‌باشد [۸۳]. همچنین در سال ۲۰۲۳ ژو و همکاران یک کامپوزیت جدید MIL-88-NH₂@COF (شکل ۷) بر سطح چارچوب فلز-آلی تولید کردند و از آن برای جذب آنالیت‌های مختلف از جمله هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای موجود در چای به عنوان محیط آبی استفاده نمودند. نتایج این گونه بود که این کامپوزیت عملکرد استخراج و ظرفیت جذب عالی را برای آنالیت‌های مختلف به ویژه برای هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای را داراست [۸۴].



شکل ۷. ساختار MIL-88-NH₂@COF [۸۴].

۲-۳-۲- آلاینده‌های معدنی

آلاینده‌های معدنی ترکیبات غیر کربنی و اساساً حاوی کاتیون‌های فلزات سنگین هستند و به دلیل پراکندگی زیاد،

غذایی هستند. وجود نیترات در سبزیجات اغلب با اثرات مضر بر سلامت انسان همراه است، یعنی با اثرات سمی متاهموگلوبینی و ایجاد ترکیبات نیتروزو خاصیت سرطان-زایی دارد و قابلیت ایجاد بیماری‌های قلبی عروقی را به خصوص برای کودکان دارا می‌باشد [۹۰-۹۲]. مقالات زیادی به حذف نیترات به وسیله جاذب‌های فلز-آلی پرداخته اند به عنوان مثال محمد دوست و همکاران MOF-5 را با روش‌های محلول و حلال گرمایی با استفاده از استات روی و بنزن-۴،۱-دی کربوکسیلات در دو شرایط مختلف، دمای اتاق و دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و همراه با تری اتیل آمین یا بدون آن به عنوان عامل پوشش تهیه کرده و از آن به عنوان جاذب برای حذف نیترات از محلول آبی استفاده کردند. نتایج کار نشان داد که بیشترین جذب نیترات در $\text{pH} = 4$ و پس از ۶ ساعت مشاهده می‌شود [۹۳]. مهاجر و همکاران نیز UiO-66-Sal را از فرم اصلاح شده UiO-66-NH₂ با سنتز کرده و با دی متیل دودسیل [۳-تری متوکسی سیلیل] پروپیل کلرید آمونیوم به عنوان عامل کوآترنیم تهیه شده توسط واکنش بین (۳-کلروپروپیل) تری متوکسی سیلان و N⁻، N-دی متیل دودسیل آمین عامل‌دار شد. نتایج بدین صورت بود که UiO-66-Sal چهارتایی شده راندمان بالا و سرعت بالایی برای حذف نیترات نشان داد به طوریکه حداکثر راندمان با استفاده از ۱ گرم در لیتر از جاذب در pH خنثی پس از ۶۰ دقیقه ۹۶ درصد بود و بنابراین UiO-66-Sal گزینه بسیار خوبی برای حذف نیترات می‌باشد [۹۴].

۲-۳-۲- فسفات

فسفات که ارزیابی اولیه خطرات آن در سال ۲۰۰۹ با باتری کلسیم فسفات و در سال ۲۰۱۱ با هیدروژن نورتوفوسفات کلسیم انجام شد، نقش مهمی در سیستم‌های بیولوژیکی از نظر اکولوژیکی ایفا می‌کند [۹۵]. فسفات عامل مهمی است که به عنوان ماده مغذی محدود کننده رشد گیاهان در محیط‌های آب شیرین بر سرعت رشد موجودات تاثیر می‌گذارد [۹۶]. با این حال، فسفات با افزایش رشد جلبک‌ها در محیط‌های آبی می‌شود. اوتروفیکشن ممکن است با ورود فسفات بیش از حد به اکوسیستم آبی در حضور نور خورشید

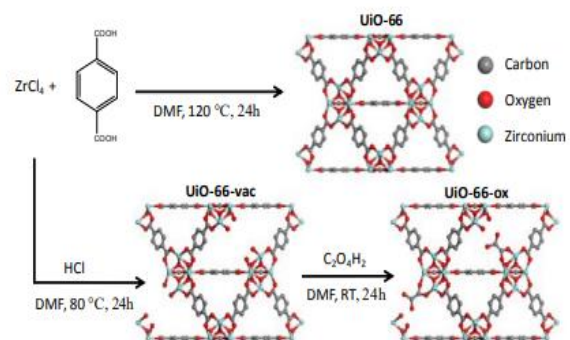
و نیتروژن رخ دهد. در نتیجه، باعث مرگ یا پوسیدگی موجودات آبی می‌شود. چنین اثرات سمی همچنین مربوط به انتشار محصولات پوسیدگی یا دفع مستقیم مواد سمی از منابعی مانند جلبک سبز آبی است. علاوه بر این، فسفات‌ها در محیط‌های آبی ممکن است به رشد گیاهان خاص کمک کرده و باعث آسیب به گیاهان بومی و در نتیجه تغییر توزیع گیاهان شوند [۹۶]. بنابراین کنترل میزان فسفات و مقادیر اضافی در محیط برای جلوگیری آسیب به بافت گیاهی و جانوران حائز اهمیت می‌باشد و حذف فسفات بیش از حد از آب برای جلوگیری از اوتروفیکشن بسیار مهم است. برای این منظور، چارچوب‌های فلز-آلی اخیراً به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی برجسته‌شان و نتایج قابل قبول، توجه زیادی را در جذب فسفات به خود جلب کرده‌اند [۹۷]. اکثر چارچوب‌های مورد استفاده در جذب فسفات از لیگاندهای آلی مشتق شده از منابع نفتی مانند تری کربوکسیلیک واسید دی-کربوکسیلیک سنتز شده اند، که می‌تواند بر محیط زیست تأثیر منفی بگذارند. در نتیجه، استفاده از چارچوب‌های پایدار سنتز شده از یک لیگاند دوستدار محیط زیست بسیار مورد نظر است. در سال ۲۰۲۲، مومن و همکاران از چارچوب فلز-آلی فومارات مبتنی بر آلومینیوم (Al-Fum) در جذب فسفات از آب استفاده کرده و متعاقباً با سایر اسیدهای دی کربوکسیلیک مشتق شده از آلومینیوم (Al-MOF) (BDC) و اسید تری کربوکسیلیک (Al-BTC) مقایسه و عملکرد جذب فسفات را با چارچوب‌های مختلف سنتز شده و اثر غلظت جاذب، زمان تماس، pH و دما را ارزیابی نمودند. نتایج جالب توجه بود به این صورت که Al-Fum بالاترین ظرفیت جذب (۶۷/۶۲ میلی گرم در گرم) را در مقایسه با Al-BDC (۴۷/۸۵ میلی گرم در گرم) و Al-BTC (۲۳/۱۷ میلی گرم در گرم) در دما یکسان نشان داد. همچنین بازسازی Al-Fum برای چندین چرخه آزمایش شد که ظرفیت جذب مداوم و پایداری را نشان می‌داد. این نتایج راه جدیدی را به سوی توسعه و استفاده از چارچوب‌های فلز-آلی و دوستدار محیط زیست و استفاده مجدد برای حذف فسفات از آب باز نموده است [۹۷]. همچنین در مطالعه ژای و همکاران یک چارچوب‌های فلزی آلی مبتنی بر آهن MIL-101 و NH₂-MIL-101

موجود در هوا می-باشند [۱۰۸]. این آلاینده‌های گازی عمدتاً از اگزواتوموبیل‌ها، نیروگاه‌های زغال‌سنگ، کوره‌های مختلف، وسایل نقلیه موتوری و سایر فرآیندهای تولیدی وارد هوا می‌شوند [۱۰۹]. قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های خطرناک هوا به عنوان بارزترین عوامل مرگ و میر زودرس در جهان شناخته می‌شود. مطالعات اپیدمیولوژیک متعدد تخمین زده‌اند قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های هوا ممکن است باعث مسمومیت ریوی و بروز بیماری‌های تنفسی از جمله بیماری انسدادی مزمن ریه، برونشیت مزمن و آسم شود [۱۱۰]. بنابراین حذف این آلاینده‌ها برای جلوگیری از آسیب رساندن آن‌ها به انسان و نیز محیط زیست و سایر جانوران الزامی است. چارچوب‌های فلز-آلی به دلیل توانایی بالا در جذب نمونه‌های گازی توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند.

۲-۴-۱- نیتروژن دی‌اکسید

با توجه به رشد سریع صنعتی شدن، منابع احتراق و حمل و نقل در اکثر کشورهای جهان، آلودگی هوا با گازهای سمی مختلف عمدتاً توسط گاز نیتروژن دی‌اکسید ایجاد می‌شود که باعث عدم تعادل در محیط می‌شود و در گرمایش جهانی شرکت می‌کند. مولکول‌های گاز نیتروژن دی‌اکسید موجود در محیط برای سیستم‌های تنفسی گیاهان، انسان‌ها و حیوانات بسیار کشنده است و حذف آن چالشی مهم در بین محققان است [۱۱۱]. این گاز در جراحی و دندانپزشکی به دلیل خواص بیهوشی و ضد درد آن استفاده می‌شود. تأثیری مشابه کلروفلوروکربن‌ها دارد و به طور قابل توجهی به گرمایش جهانی می‌افزاید. کارگران در صنایع دارای نیتروژن دی‌اکسید نیز در معرض بیماری ریوی صنعتی قرار دارند و در معرض خطر هستند [۱۱۲]. جذب یک روش کارآمد برای حذف نیتروژن دی‌اکسید در دمای محیط است که کارایی آن به شدت به طراحی جاذب‌ها بستگی دارد. جاذب‌های کربن فعال (جاذب‌های سنتی) گزارش شده به‌طور گسترده از ظرفیت جذب NO_2 کم و معمولاً برگشت‌ناپذیر رنج می‌برند، علاوه بر آن مقادیر قابل توجهی تا ۵۰ درصد نیتروژن دی‌اکسید جذب‌شده توسط این جاذب‌ها دوباره در اتمسفر آزاد می‌شود. اما در مقابل چارچوب‌های

یون کلرید نیز دارای عملکردهای فیزیولوژیکی مهم و مصارف صنعتی است. با این حال، محتوای بالای کلر در آب به محیط محیط زیست، سلامت انسان آسیب می‌رساند. مصرف بیش از حد آن باعث بیماری‌هایی مانند ضعف ایمنی، فشار خون بالا، تصلب شرایین، انفارکتوس مغزی و غیره خواهد شد [۱۰۶]. برای حذف ترکیبات حاوی کلرید نیز چارچوب‌های فلز-آلی توانایی جذب قابل قبولی داشته و در مقالات به آن پرداخته شده است. به دی کاست و همکاران یک آنالوگ جدید از UiO-66 اصلاح شده با اسید اگزالیک (UiO-66-ox) از طریق ترکیب لیگاند به کمک حلال را سنتز کرده (شکل ۹) و از آن برای حذف سیانوزن کلراید، حذف آمونیاک، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و اکتان استفاده نمودند و نتایج کار آن‌ها نشان داد که UiO-66-ox مقدار جذب در سطوح بیشتر یا مساوی با پایه UiO-66 را داراست. UiO-66-ox مقدار جذب $1/6 \text{ mmol.g}^{-1}$ را نشان می‌دهد و لذا یک کاندید مناسب برای حذف سیانوزن کلراید می‌باشد [۱۰۷].



شکل ۹. نحوه سنتز UiO-66 ، UiO-66-vac و UiO-66-ox [۱۰۷].

۲-۴-۲- آلاینده‌های گازی

آلاینده‌های گازی در سطح زمین به طور جدی محیط زیست، کیفیت هوای شهری و سلامت عمومی را تهدید می‌کند. سه گاز آلاینده اصلی محیطی NO_2 ، SO_2 و CO_2

معمولی گوگرد دی اکسید در آگروزهای صنعتی در سطح یک قسمت در یک میلیون است. با این حال، SO₂ اثرات قابل توجهی بر آلودگی محیطی (به عنوان مثال، باران اسیدی) دارد. در دهه گذشته، مطالعات اپیدمیولوژیک نشان می‌دهد که آلودگی SO₂ در محیط جوی با خطر و مرگ و میر ناشی از بیماری‌های دستگاه تنفسی و سرطان ریه مرتبط است همچنین مشخص شد که استنشاق SO₂ باعث ضخیم شدن لایه مخاطی دستگاه تنفسی می‌شود و باعث آسیب DNA می‌شود [۱۲۰-۱۱۶]. جذب سطحی گوگرد دی اکسید توسط چارچوب‌های فلز-آلی به خوبی عمل کرده و امیدواری زیادی را فراهم آورده است. رن و همکاران یک Zr(IV)-MOF متخلخل پایدار جدید (HBU-20) طراحی و سنتز کرده و از آن به عنوان جاذب جدیدی برای حذف SO₂ استفاده نمودند. از نتایج کار آن‌ها مشخص شد که HBU-20 ظرفیت جذب گوگرد دی اکسید بالای ۶/۶۹ میلی مول بر گرم در دمای ۲۹۸ K و فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال را دارا می‌باشد و دارای گزینش پذیری خوبی نیز هست [۱۲۱].

چارچوب‌های فلز-آلی برپایه زیرکونیوم که دارای مکان‌های قطبی قابل دسترسی هستند معمولاً ظرفیت جذب گوگرد دی اکسید بالایی دارند اما به دلیل رسوب سولفات اسیدی در کلاستر Zr-O در گوگرد زدایی جذب بادوام ضعیف دارند. در مطالعه ژانگ و همکاران یک روش اصلاح کلاستر Zr-O در یک چارچوب برپایه زیرکونیوم (MOF-808) با استفاده از اتیلن دی آمین تترا استیک اسید برای تشکیل EDTA-MOF-808 و برای حذف انتخابی و بادوام SO₂ معرفی شد. معرفی EDTA نه تنها ظرفیت جذب SO₂ را بهبود می‌بخشد، بلکه به شدت انتخاب پذیر نیز می‌باشد به طوری که ظرفیت جذب (۸/۹ در مقابل ۵۷/۲) را به ترتیب برای SO₂/CO₂ و نیز (۲۹۲/۷ در مقابل ۱۹۱۵/۸) را برای SO₂/N₂ نشان می‌دهد. علاوه بر این، اثرات هم افزایی تعامل دوقطبی و پیوند هیدروژنی بین SO₂ و EDTA در EDTA-MOF-808 باعث جذب SO₂ به روشی برگشت پذیر می‌شود که می‌تواند از تشکیل گونه‌های S(VI) در Zr-MOF جلوگیری کند.

فلز-آلی دارای ظرفیت جذب بالای نیتروژن دی اکسید همراه با حداقل انتشار و قابلیت استفاده مجدد فوق‌العاده تحت دمای محیط می‌باشند [۱۱۳]. پترسون و همکاران از چارچوب فلز-آلی UiO-66-NH₂ برای حذف نیتروژن دی اکسید استفاده نمودند. گروه آمین به طور قابل توجهی به حذف کمک می‌کند و منجر به ظرفیت حذف بی‌سابقه‌ای به میزان ۱/۴ گرم در یک اینچ از چارچوب فلز-آلی شد. علاوه بر این، در حالی که نیتروژن دی اکسید معمولاً مقادیر قابل توجهی NO را روی جاذب‌ها تولید می‌کند، اما مقدار تولید شده توسط UiO-66-NH₂ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که علت آن تشکیل یون دیازونیوم بر روی حلقه آروماتیک چارچوب فلز-آلی است [۱۱۴]. همچنین شانگ و همکاران چارچوب‌های فلز-آلی مبتنی بر پورفیرین چند متغیره با سایت‌های دو اتم فلز (Ni/Co، MTV-) برای جذب نیتروژن دی اکسید و نگهداری NO طراحی کردند. این چارچوب‌ها با نسبت مولی دقیق کنترل شده و سایت‌های Ni و Co به ترتیب محل جذب قوی برای NO و NO₂ بودند. از نتایج کار آن‌ها مشخص گردید که سایت‌های دو فلزی Ni/Co در MTV-PMOF عملکرد جذب NOx را بسیار افزایش می‌دهد. در شرایط خشک Al-PMOF (NiCo1) ظرفیت ۳/۶۶۶ mmol/g ظرفیت نیتروژن دی اکسید را به نمایش گذاشت و دارای توانایی حفظ NO بالا و قابلیت بازسازی خوب (۸۵٪) را دارا بود. در شرایط مرطوب نیز، ظرفیت حذف نیتروژن دی اکسید به بیش از ۵۰٪ افزایش یافت. این کار به عنوان اولین نمونه از جاذب‌های NO₂ مبتنی بر MTV-MOFs که جذب همزمان NO₂ و NO را به نمایش می‌گذارد، راه جدیدی را برای طراحی و توسعه جاذب‌ها برای حذف NOx باز کرد [۱۱۵].

۲-۴-۲- گوگرد دی اکسید

گوگرد دی اکسید از گازهای حاصل از احتراق سوخت فسیلی به خصوص زغال سنگ می‌باشد که وارد هوا می‌شود. گازهای حاوی گوگرد، حتی در غلظت‌های بسیار پایین، اثرات مضر متعددی بر سلامت انسان دارند. غلظت

بنابراین این چارچوب های فلز-آلی توانایی بالایی در جذب SO₂ خواهند داشت [۱۲۲].

۲-۴-۳- کربن دی اکسید

تغییرات طبیعی اقلیم ناشی از عوامل داخلی و خارجی مانند انتشار انسانی، احتراق سوخت های فسیلی، حمل و نقل و گرمایش که باعث انتشار CO₂ می شود، یکی از مسائل مهمی است که باعث گرم شدن کره زمین (افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای) شده است [۱۲۳]. با ادامه افزایش سطح دی اکسید کربن در جو و تغییرات آب و هوایی، موضوع سمیت کربن-دی اکسید به عنوان یک خطر جهانی شناخته شده است. اگرچه انسان ها و حیوانات قادر به مقابله با سطوح بالای CO₂ هستند اما در درازمدت ممکن است عواقب شدیدی داشته باشند و به عنوان یک تهدید جدی محسوب شوند که شامل التهاب مزمن، نارسایی کلیه، آتروفی استخوان شود [۱۲۴]. یکی از جاذب های مهم و پر کاربرد در زمینه حذف CO₂ چارچوب های آلی- فلزی بوده که استفاده از آنها توجه زیادی را به خود جلب کرده است و در مقالات به عنوان یک جاذب مناسب استفاده و معرفی گردیده اند. باهات و همکاران یک چارچوب فلز-آلی فلئوئوردار هیدرولیتیکی پایدار NbOFFIVE-1-Ni با منافذ مناسب (اندازه، شکل، و عملکرد)، ایده آل برای حذف موثر و کارآمد جهت حذف غلظت های پایین کربن دی اکسید را گزارش کردند. این چارچوب در جذب انتخابی کربن دی اکسید، جذب وزنی و حجمی حدود ۳ mmol/g و ۱/۳ cm³ در شرایط متعارف داراست. به این ترتیب NbOFFIVE-1-Ni به عنوان یک جاذب جدید برای فضاهای محدود مناسب است [۱۲۵]. در مطالعه لی و همکاران MOF-801 (Zr/Ce/Hf) بر اساس سنتز سبز تهیه شد. MOF-801 با تغییر انواع نمک های فلزی سنتز و تاثیر سه گره فلزی بر عملکرد جذب و جداسازی گاز کربن دی اکسید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که MOF-801 (Ce) دارای بهترین ظرفیت جذب ۳/۳ میلی مول بر گرم در ۲۹۸ K است، همچنین با نتایج طیفسنجی تبدیل فوریه مادون قرمز بازتابش منتشر در

محل CO₂/CH₄ جذب ایده آل به دست آمده است. بنابراین MOF-801 مبتنی بر Ce نیز پیشنهاد بسیار خوب در زمینه حذف کربن دی اکسید می باشد [۱۲۶].
جدول ۱: جاذب های چارچوب های فلز-آلی به کار گرفته شده به منظور حذف آلاینده های محیط زیست.

pollutant	Metal-Organic Framework (MOF)	Reference
Arsenic	CoxFe3-xO4, MOF-808	[27,31]
Mercury	US-N.UiO-66-S.Ti-MOF-SH	[39-41]
Lead	JLU-MOF68.HS-mSi@MOF-5	[46,49]
Benzene	BiOI@NH2-MIL-101.MIL125(Ti)/Zeolite	[57,58]
Phenol	MOF-5, MIL-101	[62,63]
Toluene	UiO-66(NH2), ZIF-67, MOF-199, UiO-66, MOF-5, MIL-101(Fe) MIL-125	[67-69]
Styrene	Cr-MOF/MIL-101, ZIF-67	[74,75]
PAHs	NH2-UiO-66 (Zr), H-Co-MOF-74 MIL-88-NH2@COF, UiO-66 (Zr)	[82-84]
NO ₃ ⁻	UiO-66-Sal, MOF-5	[93,94]
PO ₄ ³⁻	MIL-101 (Fe), Al-MOF (Al-BDC) NH2-MIL-101 (Fe)	[97,98]
Halides	UiO-66-ox, MOF-801, CaFu	[104-107]
NO ₂	MTV-PMOFs Al-UiO-66-NH2 PMOF(NixCoy)	[114,115]
SO ₂	EDTA-MOF-808, Zr(IV)-MOF	[121,122]
CO ₂	MOF-801, NbOFFIVE-1-Ni (Zr/Ce/Hf)	[125,126]

جدول ۲ مقایسه ای که کارایی انواع MOF ها را از نظر ظرفیت جذب، سرعت جذب، قابلیت بازیابی و شرایط عملیاتی

توزیع اندازه منافذ می‌تواند سرعت جذب را تحت تأثیر قرار دهد، زیرا منافذ یکنواخت باعث نفوذ سریع‌تر و جذب مؤثرتر گاز می‌شوند.

یکی دیگر از عوامل مهم، رطوبت محیط است که می‌تواند ظرفیت جذب بسیاری از MOF ها، به ویژه آن‌هایی که به آب حساس هستند، کاهش دهد. تماس با رطوبت ممکن است منجر به تخریب جزئی چارچوب یا رقابت جذب شود و کارایی حذف CO₂ یا سایر آلاینده‌ها را کاهش دهد. برای رفع این محدودیت، راهکارهایی مانند اصلاح سطح به صورت هیدروفوبیک، استفاده از گره‌های فلزی مقاوم به آب (مثلاً MOF های مبتنی بر Zr)، و عملکرد پسااستنزی به کار گرفته شده است تا مقاومت در برابر رطوبت افزایش یابد و کارایی جذب حفظ شود.

۴- کاربرد چارچوب های فلز-آلی در تولید انرژی های پاک

۴-۱- تولید هیدروژن

در سرتاسر جهان، انسان‌ها انرژی زیادی برای تولید گرما و برق، در بخش‌هایی مانند صنعت، ساخت و ساز، و کشاورزی مصرف می‌کنند. برای اطمینان از پایداری آینده، به ویژه در پی گرمایش جهانی و کمبود منابع فسیلی، کارهای تحقیقاتی تولید انرژی در حال پیشرفت و توسعه بیشتر هستند [۱۲۷]. هیدروژن به عنوان یک انرژی پاک کاربردهای زیادی دارد. به واسطه افزایش تقاضا برای انرژی پاک، پتانسیل مصرف هیدروژن قابل توجه می‌شود. بنابراین، مصرف آن توسط طیف متنوعی از کاربردها مانند صنایع الکترونیک، تولید مواد شیمیایی خوب و واسطه‌های دارویی، صنایع متالورژی، فرآوری مواد غذایی، حمل و نقل دریایی، سوخت مناسب برای سلول‌های سوختی و تحقیقات علمی، سال به سال افزایش می‌یابد [۱۲۸، ۱۲۹]. هیدروژن (H₂) که مقدار تقریباً نامحدودی در آب دریا ذخیره می‌شود، تنها سوخت جایگزینی است که فراوان‌تر و از نظر زیست‌محیطی پاک‌تر است و

مقایسه می‌کند تا برای انتخاب MOF ها در شرایط مناسب عملیاتی استفاده شود.

جدول ۲: عملکرد مقایسه‌ای MOF ها در حذف آلاینده‌ها

MOF	Pollutant	Adsorption Capacity	Adsorption Rate	Recyclability	Operating Conditions	Reference
MOF-808	Arsenic	150-200 mg/g	30-60 min	≥5 cycles	Neutral pH, room temp	[27,31]
UiO-66-S	Mercury	300-400 mg/g	Fast (<30 min)	≥6 cycles	pH 5-7	[39-41]
JLU-MOF68	Lead	~250 mg/g	1-2 h	4-5 cycles	pH 6-8	[46,49]
MIL-101	Benzene	200-300 mg/g	~1 h	≥3 cycles	Dry conditions, room temp	[57,58]
ZIF-67	Toluene	~400 mg/g	45 min	≥4 cycles	Neutral pH	[67-69]
UiO-66-NH ₂	NO ₂	High (ppm level)	Fast	≥5 cycles	Room temp, dry	[114,115]
MOF-801 (Zr/Ce/Hf)	CO ₂	3-5 mmol/g	Fast	5-10 cycles	1 bar, room temp	[125,126]

۳- تأثیر آلاینده‌های گازی بر پارامترهای ساختاری MOF ها

عملکرد جذب MOF ها در برابر آلاینده‌های گازی به شدت وابسته به ویژگی‌های ساختاری آن‌ها است. پارامترهای کلیدی شامل اندازه حفره‌ها، سطح ویژه، توزیع اندازه منافذ و گروه‌های عاملی می‌باشند. به عنوان مثال، در جذب CO₂، وجود گروه‌های آمینی باعث افزایش ظرفیت و گزینش‌پذیری جذب می‌شود؛ زیرا این گروه‌ها با مولکول‌های CO₂ تعامل قوی برقرار کرده و سایت‌های پایه‌ای را ایجاد می‌کنند. همچنین، ابعاد حفره‌ها باید به گونه‌ای تنظیم شوند که مولکول‌های هدف به راحتی وارد شوند و محدودیت‌های نفوذی ایجاد نشود.

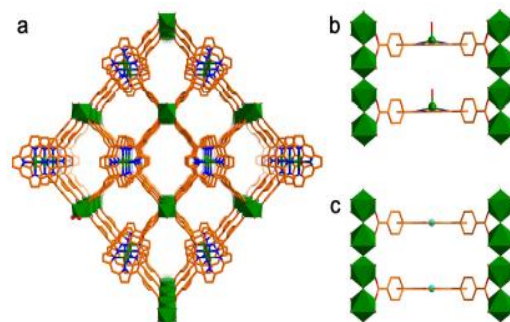
سطح ویژه و تخلخل به طور مستقیم بر تعداد سایت‌های قابل دسترسی برای جذب تأثیر می‌گذارد؛ MOF هایی با سطح ویژه بالاتر معمولاً ظرفیت جذب بیشتری دارند. علاوه بر این،

شکل ۱۰. (a) نمای شبکه سه بعدی USTC-8 (In) در امتداد یک محور. نمای جزئی ساختارهای USTC-8 (b) و USTC-8 (M) (M = Cu, Co, Ni) (c)، که محل فلز را در موتیف متالوپورفیرین درگیر در ساختار MOF برجسته می کند [۱۳۲].

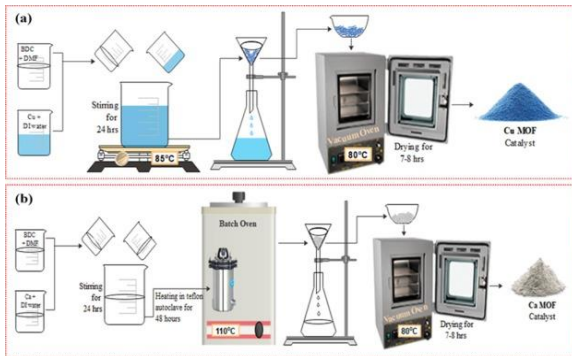
۴-۲- تولید اتانول

امروزه بسیاری از محققان توجه خود را بر منابع انرژی جایگزین سوخت های فسیلی، مانند اتانول، برای افزایش سلامت محیط و کیفیت زندگی متمرکز کرده اند. اتانول کاربرد گسترده ای به عنوان سوخت مکمل در کنار سایر مواد مانند بیودیزل ها، گازهای هیدروکسی، بنزین و ... می باشند و از آن جهت که اتانول عدد اکتان کمی دارد به کاهش آلاینده های ناشی از سوخت های همراه کمک کرده و بنابراین به عنوان یک سوخت پاک برای تولید انرژی معرفی می شود [۱۳۳، ۱۳۴]. همچنین اتانول سوخت بسیار مناسبی برای پیل های سوختی می باشد. استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای تبدیل CO₂ و سایر آلاینده های گازی به اتانول سوخت پاک نه تنها می تواند انتشار کربن را از طریق استفاده از CO₂ به عنوان ماده اولیه کاهش دهد، بلکه انرژی های تجدید پذیر را به عنوان سوخت شیمیایی پرمصرف و با چگالی انرژی بالا ذخیره می کند، به عنوان یک استراتژی عالی برای پاسخ به مسائل فعلی محیط زیست و انرژی می باشد. توسعه الکتروکاتالیست های کارآمد، فوتوکاتالیست ها و فوتوالکتروکاتالیست ها برای کاهش CO₂، مهم ترین کلید برای دستیابی به این هدف است [۱۳۵]. با توجه به فعالیت های الکتروکاتالیستی و فوتوکاتالیستی MOF ها، می توان گفت که این دسته از مواد گزینه ای مناسب برای کاهش آلاینده های گازی به اتانول می باشد. که مقالات پرتعدادی به استفاده از MOF ها برای انجام این کار پرداخته است، به عنوان مثال یوشی-مورا و همکاران یک مطالعه سیستماتیک بر روی اثر پشتیبانی چارچوب های فلزی-آلی (MOFs)، در مورد جذب بستر ارائه کردند. از نتایج کار آن ها مشخص گردید که افزایش قابل توجه فعالیت کاتالیزوری و گزینش پذیری برای واکنش تولید اتانول (EtOH) از طریق هیدروژناسیون اسید استیک (AH) (AcOH) بر روی نانوذرات پلاتین

پتانسیل هزینه کمتری نسبت به سوخت های فسیلی مبتنی بر کربن تجدید ناپذیر دارد، تحقیقات در مورد ذخیره سازی هیدروژن و سیستم های مولد مبتنی بر آب (H₂O) همچنان فعال است [۱۳۰]. در دو دهه اخیر به علت فعالیت فوتوکاتالیستی MOF ها، توجه زیادی را در زمینه تولید هیدروژن به خود جلب کرده اند. بررسی MOF ها به عنوان فوتوکاتالیست های کارآمد برای تولید هیدروژن از تجزیه آب تحت تابش نور UV، مرئی و حتی نور IR پیشرفت زیادی داشته است. و بنابراین مقالات متعددی به استفاده از MOF ها برای تولید هیدروژن پرداخته اند، به عنوان مثال شی و همکاران MOFs، کامپوزیت های MOFs و فوتوکاتالیست های مشتق شده از MOFs را برای راندمان تولید هیدروژن بالا و مکانیسم تولید هیدروژن احتمالی فوتوکاتالیست های مبتنی بر MOFs با جزئیات مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. از نتایج کار آن ها مشخص گردید که مواد مبتنی بر MOFs می توانند به طور موثر انرژی خورشیدی را به انرژی هیدروژن تبدیل کنند و در نهایت هیدروژن تولید شده جایگزین سوخت های فسیلی شود [۱۳۱]. همچنین لنگ و همکاران یک MOF بر پایه پورفیرین غیرمعمول (OOP خارج از صفحه) که با کنترل آزادسازی یون فلزی با یک پیش ساز بی سابقه In(OH)₃ سنتز کرده (USTC8(In) شکل ۱۰) و از آن برای بررسی تولید هیدروژن استفاده نمودند، از نتایج کار مشخص گردید که MOF سنتز شده دارای پایداری بالایی است و فعالیت تولید هیدروژن فوتوکاتالیستی غیرمنتظره بالایی را نشان می دهد، که بسیار فراتر از MOF هم ساختار مبتنی بر پورفیرین درون صفحه است [۱۳۲].



MOF و Zr-MOF در واکنش ترانس استریفیکاسیون منجر به افزایش بازده تولید بیودیزل و بهبود انتخاب پذیری فرآیند می‌شود. همچنین این کاتالیست‌ها قابلیت بازیافت و استفاده مجدد دارند که آن‌ها را از نظر اقتصادی و زیست محیطی نسبت به کاتالیست‌های سنتی برتر می‌سازد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که MOF ها علاوه بر بهبود سرعت واکنش، می‌توانند پایداری واکنش را نیز در دما و فشار پایین‌تر تضمین کنند و به این ترتیب نقش مؤثری در توسعه فناوری‌های سبز برای تولید سوخت‌های زیستی ایفا نمایند. شکل ۱۱ شماتیکی از سنتز کاتالیست MOF و فرآیند تولید بیودیزل را نشان می‌دهد [۱۴۸].



شکل ۱۱. مراحل سنتز کاتالیست MOF و فرآیند تولید بیودیزل [۱۴۸].

در جدول ۳ کاربرد و نتایج کلی MOF ها برای آلاینده‌های گازی و تولید انرژی‌های پاک نشان داده شده است.

جدول ۳: نتایج کلی از کاربرد MOF ها در آلاینده‌های گازی و تولید انرژی‌های پاک

کاربرد	نوع MOF	آلاینده و منبع انرژی	مکانیسم اصلی	مزایا	چالش و محدودیت
حذف آلاینده‌های گازی	MOF-235	CO ₂	جذب سطحی + برهم کنش الکترواستاتیک	ظرفیت بالای جذب	حساسیت به رطوبت
حذف آلاینده‌های گازی	UiO-66-NH ₂	SO ₂	واکنش شیمی جذب	پایداری بالا	کاهش ظرفیت پس از سیکل‌های متعدد
حذف آلاینده‌های گازی	MIL-101(Cr)	NO ₂	نفوذ در حفره‌ها + جذب شیمیایی	سطح ویژه بالا	سنتز پرهزینه

پشتیبانی شده بر روی MOFs مشاهده می‌شود. آن‌ها مطالعه سیستماتیک را بر روی کاتالیز با استفاده از کاتالیزورهای پلاتین با بار همگن، در تماس مستقیم با هفت ساپورت مختلف MOF (MIL-125-NH₂، UiO-66-NH₂، HKUST-1، MIL-101، Zn-MOF-74، Mg-MOF-74 و MIL-121) به اختصار (HPT/MOFs) انجام داده و دریافتند که MOF هایی که میل ترکیبی بالایی برای بستر (AcOH UiO-66-NH₂ و MIL-125-NH₂) دارند، فعالیت کاتالیزوری بالایی برای تولید اتانول نشان می‌دهند [۱۳۶]. همچنین بینگ و همکاران سایت‌های همکار CuI را در یک خوشه Zr₁₂ از یک چارچوب فلزی-آلی (MOF) برای هیدروژناسیون انتخابی CO₂ به اتانول گزارش کردند. آن‌ها با کمک یک کاتیون قلیایی، مراکز CuI با پشتیبانی از Zr₁₂ از نظر مکانی و هیدروژن را از طریق افزودن اکسیداتیو دو فلزی فعال کردند و جفت C-C را برای تولید اتانول تقویت کردند. از نتایج کار آن‌ها مشخص شد که کاتالیزورهای MOF اصلاح شده با Cs⁺، در ۱۰ ساعت، اتانول با گزینش پذیری بیش از ۹۹ درصد و عدد گردش (بر اساس تمام اتم‌های مس) ۴۰۸۰ در CO₂ فوق بحرانی، با ۳۰ مگاپاسکال و ۵ مگاپاسکال H₂ در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، یا عدد گردش ۴۹۰ در ۲ مگاپاسکال CO₂/H₂ (1/3) و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌کند. این نتایج پتانسیل استفاده از MOF ها را به عنوان یک پلت فرم قابل تنظیم برای طراحی کاتالیزورهای فلزی فراوان در زمین برای تبدیل CO₂ برجسته می‌کند [۱۳۷].

۴-۳- تولید بیودیزل با استفاده از MOFs

یکی از مهم‌ترین سوخت‌های تجدیدپذیر که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده، بیودیزل است. تولید بیودیزل معمولاً از طریق واکنش ترانس استریفیکاسیون روغن‌های گیاهی یا روغن‌های پسماند با الکل‌ها انجام می‌شود. در این فرآیند، کاتالیست‌ها نقش کلیدی دارند و MOF ها به دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و قابلیت اصلاح شیمیایی، به عنوان کاتالیست‌های ناهمگن نویدبخش معرفی شده‌اند. استفاده از MOF های فلزی مانند Cu-

کارایی محدود در نور مرئی	پایداری حرارتی خوب	کاتالیز سطحی	تولید H ₂ از آب کافت	ZIF-8	تولید انرژی (هیدروژن)
هزینه سنتز بالا	انتخاب پذیری بالا	واکنش‌های کاتالیستی	کاتالیزور در تبدیل زیست‌توده	MOF-808	تولید انرژی (اتانول)

تولید و دفع MOF های مصرف شده می‌تواند با مسائل زیست‌محیطی همراه باشد، به‌ویژه اگر از فلزات سنگین یا لیگاندهای سمی در سنتز استفاده شده باشد. مقایسه اقتصادی نیز نشان می‌دهد که جاذب‌های تجاری رایج (مانند زغال فعال، خاک دیاتومه و زئولیت‌ها) همچنان هزینه و دسترس پذیری پایین‌تری دارند.

مقیاس پذیری فرآیند:

بسیاری از روش‌های سنتز MOF ها در مقیاس آزمایشگاهی مناسب هستند اما در مقیاس صنعتی نیاز به تغییرات جدی در طراحی راکتور، کاهش مصرف حلال و بهینه‌سازی انرژی دارند.

برای غلبه بر این چالش‌ها، تحقیقات آینده باید بر توسعه روش‌های سنتز سبز و کم‌هزینه، افزایش پایداری ساختاری MOF ها، و ترکیب آن‌ها با مواد ارزان‌تر (مانند پلیمرها یا نانومواد کربنی) متمرکز شود. همچنین انجام تحلیل‌های هزینه-فایده و ارزیابی چرخه عمر (LCA) می‌تواند مسیر تجاری‌سازی این مواد را هموار سازد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، کاربرد چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) در دو حوزه مهم و مکمل شامل حذف آلاینده‌های محیطی و تولید انرژی‌های پاک مرور و تحلیل شد. نوآوری این مطالعه در آن است که برای نخستین بار این دو جنبه به صورت هم‌زمان و مقایسه‌ای بررسی شده‌اند تا ارتباط میان عملکرد زیست‌محیطی و انرژی‌زایی MOFs روشن گردد. این مرور با تحلیل نظام‌مند پژوهش‌های اخیر انجام شد. در بررسی حذف آلاینده‌ها، پارامترهایی مانند ظرفیت جذب، انتخاب‌پذیری، پایداری در شرایط مختلف و قابلیت بازیافت مورد توجه قرار گرفت. در بخش تولید انرژی، فعالیت کاتالیستی، بازده تولید، پایداری حرارتی و سازگاری با منابع تجدیدپذیر به عنوان شاخص‌های اصلی مقایسه شدند.

نتایج کلیدی این تحقیق شامل موارد ذیل است:

۵- چالش‌های عملیاتی و اقتصادی استفاده از MOF ها در مقیاس صنعتی

اگرچه چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) در سال‌های اخیر به دلیل سطح ویژه بالا، قابلیت تنظیم ساختار و کارایی مناسب در حذف آلاینده‌ها و تولید انرژی‌های پاک مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما انتقال این مواد از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی با چالش‌های متعددی روبه‌روست [۱۵۰-۱۴۹].

هزینه‌های تولید بالا:

سنتز بسیاری از MOF ها نیازمند لیگاندهای آلی گران‌قیمت، حلال‌های آلی خاص و شرایط دما-فشار کنترل شده است. این امر هزینه تولید در مقیاس انبوه را افزایش می‌دهد و رقابت‌پذیری MOF ها با جاذب‌های ارزان‌تر مانند کربن فعال یا زئولیت‌ها را کاهش می‌دهد.

پایداری در شرایط واقعی:

بسیاری از MOF ها در محیط‌های دارای رطوبت بالا، pH شدید (خیلی اسیدی یا بازی) و دمای متغیر دچار کاهش پایداری یا تخریب ساختاری می‌شوند. در نتیجه، عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی محیطی یا صنعتی همیشه مشابه نتایج آزمایشگاهی نیست.

قابلیت بازیابی و چرخه پذیری:

اگرچه برخی از MOF ها تا چندین چرخه جذب/واحد قابل استفاده هستند، اما در عمل بازده آن‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. این موضوع هزینه‌های عملیاتی را افزایش داده و نیاز به بهبود روش‌های باززنده‌سازی را برجسته می‌سازد.

ملاحظات اقتصادی-زیست محیطی:

- بهبود قابلیت بازیافت: MOFs توسعه ی روش های آسان و مقرون به صرفه برای بازیافت MOFs

با ادامه ی تحقیقات در این زمینه، MOFs به طور فزاینده ای در کاربردهای مختلف برای دستیابی به توسعه پایدار مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۸. منابع

[1] Iranmanesh M, Akhijahani HS, Jahromi MS. CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Renewable Energy*. 2020 Jan 1;145:1192-213.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.0>

[2] Jahromi MS, Kalantar V, Sefid M, Akhijahani HS, Iranmanesh M. Energy and exergy analysis of an unglazed transpired collector connected to a dryer with a porous plate and phase change material. *Journal of Energy Storage*. 2023 Apr 1;60:106693.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106693>

[3]. barghi jahromi, H., Rahmani, M., barghi jahromi, M. S. A review of the application of nanostructures based on metal-organic frameworks in hydrogen absorption and storage. *Nano World*, 2023; 19(71):

<https://doi.org/45-65>.

20.1001.1.24765945.1402.19.71.5.0

[4] Barghi Jahromi MS, Iranmanesh M, Samimi Akhijahani H. Thermo-Economic evaluation of a solar dryer with evacuated heat pipe collector and energy storage. *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*. 2021 Feb 19;32(1):39-58.

- MOFs ظرفیت بالایی برای جذب آلاینده های گازی از جمله CO_2 ، SO_2 و NO_2 دارند و در مقایسه با جاذب های سنتی عملکرد بهتری نشان می دهند.

- ویژگی قابلیت تنظیم در MOFs امکان طراحی هدفمند برای آلاینده ها یا واکنش های خاص را فراهم می سازد.

- در حوزه انرژی، MOFs به عنوان کاتالیست های نویدبخش در تولید هیدروژن، اتانول و سایر سوخت های پاک مطرح هستند.

- پایداری و قابلیت بازیافت بالا، MOFs را برای استفاده مکرر در فرآیندهای صنعتی مناسب می سازد.

۷- پیشنهادات آینده

با وجود مزایا، چالش هایی همچون هزینه بالای سنتز، حساسیت برخی ساختارها به رطوبت، و دشواری مقیاس پذیری صنعتی همچنان مطرح هستند. در تحقیقات آینده، پیشنهاد می شود:

- بررسی پایداری MOFs در شرایط واقعی و صنعتی (نه فقط آزمایشگاهی) گسترش یابد.

- ترکیب MOFs با سایر نانو مواد (مانند گرافن و نیمه هادی ها) برای افزایش کارایی در حذف آلاینده ها و تولید انرژی.

- سنتز MOFs ارزان قیمت: توسعه ی روش های سنتز جدید و ساده تر برای MOFs

- افزایش پایداری: سنتز MOFs با ساختارهای پایدارتر



CaO absorption cycle stability and progress of catalysts in Ca-based DFMs for integrated CO₂ capture-conversion: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023.Sep.19:111047..

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111047>.

[11] Shasavari A, Karimi A, Akbari M, Alizadeh Noughani M. Environmental Impacts and Social Cost of Non-Renewable and Renewable Energy Sources: A Comprehensive Review. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2024 Jan 1;11(1):12-27.

<https://doi.org/10.30501/jree.2023.382598.1545>.

[12] Ansari M MT. Analysis of Passive Partial Shading Mitigation Technique for PV Array. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2024 Jan 1;11(1):135-56.

<https://doi.org/10.30501/jree.2023.400223.1599>.

[13] Di J, Xia J, Li H, Guo S, Dai S. Bismuth oxyhalide layered materials for energy and environmental applications. *Nano Energy*. 2017 Nov 1;41:172-92.

<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.09.008>

:

[14] Ma X, Chai Y, Li P, Wang B. Metal-organic framework films and their potential applications in environmental pollution control. *Accounts of chemical research*..2019.May.10;52(5):146170.

<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00113>

[15] Rasheed T, Hassan AA, Bilal M, Hussain T, Rizwan K. Metal-organic frameworks based adsorbents: A review from removal perspective of various environmental contaminants from

<https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.56640.0>

[5] Akhijahani, H. S., Salami, P., Iranmanesh, M., & Jahromi, M. S. B. (2023). Experimental study on the solar drying of Rhubarb (*Rheum ribes L.*) with parabolic trough collector assisted with air recycling system, nanofluid and energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 60, 106451.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106451>

[6] Barghi Jahromi MS, Kalantar V, Sefid M, Iranmanesh M, Samimi Akhijahani H. Experimental study of phase change process of the paraffin as a PCM with copper foam and iron wool. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2023 Dec 1;10(4):59-65.

<https://doi.org/10.30501/jree.2023.365995.1483>

[7] Jahromi MS, Kalantar V, Omidpanah M. Numerical Simulation of Indirect Cabinet Solar Dryer by Spraying of Water Droplets in Yazd Climate. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2022;19(1):523-44.

<https://doi.org/10.48301/kssa.2021.292394.1594>

[8] Saleh Barghi Jahromi M. Exergy of Solar Dryer [Internet]. *Exergy - New Technologies and Applications*. IntechOpen; 2023. Available from:

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.109084435>.

[9] Jeong C, Ansari MZ, Anwer AH, Kim SH, Nasar A, Shoeb M, Mashkoo F. A review on metal-organic frameworks for the removal of hazardous environmental contaminants. *Separation and Purification Technology*..2023.Jan15;305:122416.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.12241>.

[10] Zang P, Tang J, Zhang X, Cui L, Chen J, Zhao P, Dong Y. Strategies to improve



global worst pollutants: astroglial involvement in arsenic, lead, and mercury intoxication. *Neurochemical Research*. 2023. Apr;48(4):104765..

<https://doi.org/10.1007/s11064-022-03725-7>

[22] Sorg TJ, Chen AS, Wang L. Arsenic species in drinking water wells in the USA with high arsenic concentrations. *Water Research*. 2014 Jan 1;48:156-69.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.016>.

[23] Sun HJ, Rathinasabapathi B, Wu B, Luo J, Pu LP, Ma LQ. Arsenic and selenium toxicity and their interactive effects in humans. *Environment international*. 2014 Aug 1;69:148-58.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.019>.

[24] Muzaffar S, Khan J, Srivastava R, Gorbatyuk MS, Athar M. Mechanistic understanding of the toxic effects of arsenic and warfare arsenicals on human health and environment. *Cell Biology and Toxicology*. 2023 Feb;39(1):85-110.

<https://doi.org/10.1007/s10565-022-09710-8>

[25] Singh R, Singh S, Parihar P, Singh VP, Prasad SM. Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2015 Feb 1;112:247-70.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>

[26] Wu YN, Zhou M, Zhang B, Wu B, Li J, Qiao J, Guan X, Li F. Amino acid assisted templating synthesis of hierarchical zeolitic imidazolate framework-8 for efficient arsenate removal. *Nanoscale*. 2014;6(2):1105-12.

<https://doi.org/10.1039/C3NR04390H>.

wastewater. *Chemosphere*. 2020 Nov 1;259:127369..

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127369>.

[16] Ahmed I, Mondol MM, Lee HJ, Jhung SH. Application of Metal-Organic Frameworks in Adsorptive Removal of Organic Contaminants from Water, Fuel and Air. *Chemistry–An Asian Journal*. 2021. Feb.1;16(3):185-96..

<https://doi.org/10.1002/asia.202001365>.

[17] Zhang Y, Yuan S, Feng X, Li H, Zhou J, Wang B. Preparation of nanofibrous metal-organic framework filters for efficient air pollution control. *Journal of the American Chemical Society*. 2016 May 11;138(18):5785-8.

<https://doi.org/10.1021/jacs.6b02553>.

[18] Singh R, Gautam N, Mishra A, Gupta R. Heavy metals and living systems: An overview. *Indian journal of pharmacology*. 2011 May 1;43(3):246-53.

<https://DOI: 10.4103/0253-7613.81505>.

[19] Lane TW, Morel FM. A biological function for cadmium in marine diatoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000 Apr 25;97(9):4627-31.

<https://doi.org/10.1073/pnas.090091397>.

[20] Velarde L, Nabavi MS, Escalera E, Antti ML, Akhtar F. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. *Chemosphere*. 2023 Mar 25:138508.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>.

[21] de Paula Arrifano G, Crespo-Lopez ME, Lopes-Araújo A, Santos-Sacramento L, Barthelemy JL, de Nazaré CG, Freitas LG, Augusto-Oliveira M. Neurotoxicity and the



mesoporous MOF-derived Cr₂O₃ nanoparticle with enriched metal sites and oxygen vacancy: Mechanism study on the role of oxygen species. *Chemical Engineering Journal*. 2023 Jul 1; 467:143402.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143402>.

[33] Goci MC, Leudjo Taka A, Martin L, Klink MJ. Chitosan-based polymer nanocomposites for environmental remediation of mercury pollution. *Polymers*. 2023 Jan 17; 15(3):482.

<https://doi.org/10.3390/polym15030482>.

[34] Mauchauffée S, Meux E. Use of sodium decanoate for selective precipitation of metals contained in industrial wastewater. *Chemosphere*. 2007. Oct. 1; 69(5):7638.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.05.006>

[35] Wang Y, Yan B, Liu J, Wang R, Rao P, Liu Y. Advances in MOF Membrane Strategies for Selective Lithium Extraction from Salt Lake Brine. *Advanced Membranes*. 2025 Jun 9:100156.

<https://doi.org/10.1016/j.advmem.2025.100156>

[36]. Da browski. A., Hubicki. Z., Podkościelny P, Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere*. 2004. Jul 1; 56(2):91106..

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.03.006>

[37] Gao X, Liu B, Zhao X. Thiol-decorated defective metal-organic framework for effective removal of mercury (II) ion. *Chemosphere*. 2023 Mar. 1; 317:137891..

[27] Li ZQ, Yang JC, Sui KW, Yin N. Facile synthesis of metal-organic framework MOF-808 for arsenic removal. *Materials Letters*. 2015 Dec 1; 160:412-4.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.08.004>.

[28] Furukawa H, Gándara F, Zhang YB, Jiang J, Queen WL, Hudson MR, Yaghi OM. Water adsorption in porous metal-organic frameworks and related materials. *Journal of the American Chemical Society*. 2014 Mar 19; 136(11):436981..

<https://doi.org/10.1021/ja500330a>.

[29] Gopi S, Ramu AG, Yun K. A highly stable mesoporous spinel ferrite (CoFe_{3-x}O₄) derived from CoFe-MOF for efficient adsorption of ultratrace As (III) ions from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023 Jun 1; 11(3):110106.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110106>.

[30] Rodríguez-Viso P, Domene A, Sánchez A, Vélez D, Monedero V, Devesa V, Zúñiga M. Challenges and strategies for preventing intestinal damage associated to mercury dietary exposure. *Toxicology*. 2023 Jun 14:153580..

<https://doi.org/10.1016/j.tox.2023.153580>

[31] Singh AD, Khanna K, Kour J, Dhiman S, Bhardwaj T, Devi K, Sharma N, Kumar P, Kapoor N, Sharma P, Arora P. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. *Chemosphere*. 2023 Apr. 1; 319:137917.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137917>.

[32] Zhu X, Liu Y, Xiao Y, Zhong L, Wang T, Wang Y, Pan WP. Hg⁰ removal performance at low temperature by



lead toxicity in wheat.(*Triticum.aestivum.L.*).*Environmental Pollution*..2023Feb15;319:120979.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120979>

[44] Niu C, Dong M, Niu Y. Lead toxicity and potential therapeutic effect of plant derived polyphenol s..*Phytomedicine*..2023.Mar.29:154789..

<https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154789>

[45] Ahmadijokani F, Ghaffarkhah A, Molavi H, Dutta S, Lu Y, Wuttke S, Kamkar M, Rojas OJ, Arjmand M. COF and MOF hybrids: advanced materials for wastewater treatment. *Advanced Functional Materials*. 2024 Oct;34(43):2305527.

<https://doi.org/10.1002/adfm.202305527>

[46] Zhang J, Xiong Z, Li C, Wu C. Exploring a thiol-functionalized MOF for elimination of lead and cadmium from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*. 2016 Sep.1;221:43-50.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.05.054>

[47] Greathouse JA, Allendorf MD. The interaction of water with MOF-5 simulated by molecular dynamics. *Journal of the American Chemical Society*. 2006 Aug 23;128(33):10678-9..

<https://doi.org/10.1021/ja063506b>

[48] Kan L, Luo X, Yu X, Zhang L, Liu Y. A multi-functionalized MOF with unique molecular-sized pockets for excellent lead (II) removal and selective separation of C₃H₈/CH₄. *Separation and Purification Technology*. 2023 Nov15;325:124758.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124758>

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137891>

[38] Yan X, Li P, Song X, Li J, Ren B, Gao S, Cao R. Recent progress in the removal of mercury ions from water based MOFs materials. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021 Sep 15;443:214034..

<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214034>

[39] Zeng B, Lin G, Li J, Wang W, Li Y, Ding Z. Ti-based MOF derived by functionalization for selective removal of Pb (II) and Hg (II) from aqueous media. *Materials Science and Engineering: B*.2023.Apr.1;290:116337.

<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116337>

[40] Gao J, Li Z, Deng Z, Liu M, Wei W, Zheng C, Zhang Y, Chen S, Deng P. Rapid removal of mercury from water by novel MOF/PP hybrid membrane. *Nanomaterials*..2021.Sep.24;11(10):2488.

<https://doi.org/10.3390/nano11102488>

[41] Bůžek D, Adamec S, Lang K, Demel J. Metal-organic frameworks vs. buffers: case study of UiO-66 stability. *Inorganic Chemistry Frontiers*. 2021;8(3):720-34.

<https://doi.org/10.1039/D0QI00973C>

[42] Ernyasih AM, Palutturi S, Daud A. Calculating the Potential Risks of Environmental and Communities Health due to Lead Contaminants Exposure A Systematic Review. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*. 2023;14(1):6876..

<https://doi.org/10.47750/pnr.2023.14.01.01>

[43] Mahamood MN, Zhu S, Noman A, Mahmood A, Ashraf S, Aqeel M, Ibrahim M, Ashraf S, Liew RK, Lam SS, Irshad MK. An assessment of the efficacy of biochar and zero-valent iron nanoparticles in reducing



[55] Mozzoni P, Poli D, Pinelli S, Tagliaferri S, Corradi M, Cavallo D, Ursini CL, Pignini D. Benzene exposure and MicroRNAs expression: in vitro, in vivo and human findings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023 Jan 20;20(3):1920.

<https://doi.org/10.3390/ijerph20031920>.

[56] Yusoff NA, Abd Hamid Z, Budin SB, Taib IS. Linking benzene, in utero carcinogenicity and fetal hematopoietic stem cell niches: a mechanistic review. *International journal of molecular sciences*. 2023 Mar 28;24(7):6335.

<https://doi.org/10.3390/ijms24076335>.

[57] Mehralipour J, Jafari AJ, Gholami M, Esrafil A, Kermani M. Synthesis of BiOI@NH₂-MIL125 (Ti)/Zeolite as a novel MOF and advanced hybrid oxidation process application in benzene removal from polluted air stream. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2022.Dec;20(2):93752.

<https://doi.org/10.1007/s40201022008378>.

[58] Khoshakhlagh AH, Saadati Z, Golbabaie F, Morais S, Paiva AM, Shahtaheri SJ. Performance assessment of the MOF adsorbent MIL-101 for removal of gaseous benzene and toluene: kinetic column modeling and simulation studies of fixed-bed adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023 Jul;30(33):80791-806.

<https://doi.org/10.1007/s11356-023-28019-5>

[59] Hermannsdörfer J, Kempe R. Selective palladium-loaded MIL-101 catalysts. *Chemistry—A European Journal*. 2011 Jul 11;17(29):8071-7.

<https://doi.org/10.1007/s1135602328019-5>.

[49] Aksu Z. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process biochemistry*. 2005 Mar 1;40(34):9971026.

<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.04.008>.

[50] Alharbi OM, Khattab RA, Ali I. Health and environmental effects of persistent organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*. 2018 Aug;263:44253.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029>.

[51] Awad AM, Shaikh SM, Jalab R, Gulied MH, Nasser MS, Benamor A, Adham S. Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review. *Separation and Purification Technology*. 2019 Dec 1;228:115719..

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719>

[52] Singh NB, Nagpal G, Agrawal S. Water purification by using adsorbents: a review. *Environmental technology & innovation*. 2018 Aug 1;11:187-240.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.05.006>.

[53] Chatterjee N, Kim C, Im J, Kim S, Choi J. Mixture and individual effects of benzene, toluene, and formaldehyde in zebrafish (*Danio rerio*) development: Metabolomics, epigenetics, and behavioral approaches. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2023 Jan 1;97:104031.

<https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.104031>.

[54] Meng Q, Yan J, Wu R, Liu H, Sun Y, Wu N, Xiang J, Zheng L, Zhang J, Han B. Sustainable production of benzene from lignin. *Nature Communications*. 2021. Jul 26;12(1):4534..

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24780-8>.



oxidation. *Catalysis Today*. 2020 Sep.15;355:5806..

<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.05.062>.

[66]. Lowry LK. The biological exposure index: its use in assessing chemical exposures in the workplace. *Toxicology*. 1987 Dec 1;47(1-2):55-69.

[https://doi.org/10.1016/0300483X\(87\)90160-0](https://doi.org/10.1016/0300483X(87)90160-0)

[67] Jin J, Li P, Chun DH, Jin B, Zhang K, Park JH. Defect dominated hierarchical Ti-metal-organic frameworks via a linker competitive coordination strategy for toluene removal. *Advanced Functional Materials*. 2021 Aug;31(32):2102511.

<https://doi.org/10.1002/adfm.202102511>.

[68] Hendon CH, Tiana D, Fontecave M, Sanchez C, D'arras L, Sassoie C, Rozes L, Mellot-Draznieks C, Walsh A. Engineering the optical response of the titanium-MIL-125 metal-organic framework through ligand functionalization. *Journal of the American Chemical Society*. 2013 Jul 31;135(30):109425.

<https://doi.org/10.1021/ja405350u>.

[69] Vellingiri K, Kumar P, Deep A, Kim KH. Metal-organic frameworks for the adsorption of gaseous toluene under ambient temperature and pressure. *Chemical Engineering Journal*. 2017 Jan 1;307:111626.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.012>.

[70] Tanaka M, Inoue KI, Honda A, Miyasaka N, Koike E, Yanagisawa R, Takano H. Effects of styrene monomer on a mouse model of atopic dermatitis. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*. 2023 Jul 4;45(4):45560.

<https://doi.org/10.1080/08923973.2023.2165944>.

[60] Ma Q, Wang Y, Zhang X, Zhao Q, Guo J, Ren X, Huang J, Zhang Y, Xie Y, Hao J. Computational design of Metal-Organic Frameworks for sustainable energy and environmental applications: Bridging theory and experiment. *Materials Science and Engineering: B*. 2025 Jan 1;311:117765.

<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117765>

[61] Haydari I, Aziz K, Kaya S, Daştan T, Ouazzani N, Mandi L, Aziz F. Green synthesis of reduced graphene oxide and their use on column adsorption of phenol from olive mill wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023 Feb 1;170:107991.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.086>.

[62] Bhadra BN, Ahmed I, Jhung SH. Remarkable adsorbent for phenol removal from fuel: functionalized metal-organic framework. *Fuel*. 2016 Jun 15;174:438..

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.071>.

[63] Xie K, Shan C, Qi J, Qiao S, Zeng Q, Zhang L. Study of adsorptive removal of phenol by MOF-5. *Desalination and Water Treatment*. 2015 Apr 17;54(3):6549..

<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.88629>.

[64] Rangkooy HA, Mokaramian S, Zargar B. Photocatalytic Removal of Toluene Vapour Pollutant from the Air Using Titanium Dioxide Nanoparticles Supported on the Natural Zeolite. *Iranian Journal of Public Health*. 2023 Jan;52(1):184..

<https://doi.org/10.18502%2Fijph.v52i1.11681>.

[65] Sun H, Yu X, Ma X, Yang X, Lin M, Ge M. MnOx-CeO2 catalyst derived from metal-organic frameworks for toluene



[76] Barbosa Jr F, Rocha BA, Souza MC, Bocato MZ, Azevedo LF, Adeyemi JA, Santana A, Campiglia AD. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 2023 Jan 2;26(1):28-65.

<https://doi.org/10.1080/10937404.2022.2164390>

[77] Nam JJ, Song BH, Eom KC, Lee SH, Smith A. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea. *Chemosphere*. 2003 Mar 1;50(10):12819.

[https://doi.org/10.1016/S00456535\(02\)00764-6](https://doi.org/10.1016/S00456535(02)00764-6)

[78] Barathi S, Gitanjali J, Rathinasamy G, Sabapathi N, Aruljothi KN, Lee J, Kandasamy S. Recent trends in polycyclic aromatic hydrocarbons pollution distribution and counteracting bio-remediation strategies. *Chemosphere*. 2023 Jul 3:139396.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139396>

[79] Patel AB, Shaikh S, Jain KR, Desai C, Madamwar D. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches. *Frontiers in Microbiology*. 2020 Nov 5;11:562813.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>

[80] Adeniji AO, Okoh OO, Okoh AI. Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and sediment of Buffalo River Estuary, South Africa and their health risk assessment. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 2019 May 1;76:657-69.

<https://doi.org/10.1007/s00244-019-00617-w>

[71] Murata Y, Natsume M, Iso T, Shigeta Y, Hirose N, Umamo T, Horibata K, Sugiyama KI, Masumura K, Hirose A, Matsumoto M. In vivo mutagenicity assessment of styrene in MutaMouse liver and lung. *Genes and Environment*. 2023 Apr 11;45(1):12.

<https://doi.org/10.1186/s41021-023-00270-9>

[72] Mooney A, Ward PG, O'Connor KE. Microbial degradation of styrene: biochemistry, molecular genetics, and perspectives for biotechnological applications. *Applied microbiology and biotechnology*. 2006 Aug;72:1-0.

<https://doi.org/10.1007/s0025300604431>

[73] Candia-Lomeli M, Covarrubias-Garcia I, Aizpuru A, Arriaga S. Preparation and physicochemical characterization of deep eutectic solvents and ionic liquids for the potential absorption and biodegradation of styrene vapors. *Journal of Hazardous Materials*. 2023 Jan 5;441:129835..

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129835>

[74] Wan H, Wang J, Sheng X, Yan J, Zhang W, Xu Y. Removal of polystyrene microplastics from aqueous solution using the metal-organic framework material of ZIF67. *Toxics*. 2022 Feb 4;10(2):70.

<https://doi.org/10.3390/toxics10020070>

[75] Modak S, Kasula M, Esfahani MR. Nanoplastics removal from water using metal-organic framework: investigation of adsorption mechanisms, kinetics, and effective environmental parameters. *ACS Applied Engineering Materials*. 2023 Jan 27;1(2):744-55.

<https://doi.org/10.1021/acsaenm.2c00174>



Environmental technology & innovation.
2018 Aug 1;11:187-240.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.05.006>

[87] Chen Z, Li Y, Cai Y, Wang S, Hu B, Li B, Ding X, Zhuang L, Wang X. Application of covalent organic frameworks and metal-organic frameworks nanomaterials in organic/inorganic pollutants removal from solutions through sorption-catalysis strategies. Carbon Research. 2023 Feb 9;2(1):8.

<https://doi.org/10.1007/s44246-023-00041-9>

[88] Darabdharma J, Ahmaruzzaman M. Recent developments in MOF and MOF based composite as potential adsorbents for removal of aqueous environmental contaminants. Chemosphere. 2022 Oct 1;304:135261.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135261>

[89] Bhatnagar A, Sillanpää M. A review of emerging adsorbents for nitrate removal from water. Chemical engineering journal. 2011 Apr 1;168(2):493-504.

<https://doi.org/10.1016/j.ccej.2011.01.103>

[90] Bondonno CP, Zhong L, Bondonno NP, Sim M, Blekkenhorst LC, Liu A, Rajendra A, Pokharel P, Erichsen DW, Neubauer O, Croft KD. Nitrate: the Dr. Jekyll and Mr. Hyde of human health?. Trends in Food Science & Technology. 2023 Mar 21.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.014>

[91] Hmelak Gorenjak A, Cencič A. Nitrate in vegetables and their impact on human health. A review. Acta alimentaria. 2013 Jun 1;42(2):158-72.

<https://doi.org/10.1556/aalim.42.2013.2.4>

[81] Lu XY, Zhang T, Fang HH. Bacteria-mediated PAH degradation in soil and sediment. Applied microbiology and biotechnology. 2011 Mar;89:1357-71.

<https://doi.org/10.1007/s00253-010-3072-7>

[82] Huang P, Wang X, Zhao J, Zhang Z, Du X, Lu X. Hollow Co-MOF-74 incorporated electrospun nanofiber membranes with hierarchical structures for enhanced removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by drain-type adsorption. Chemical Engineering Journal. 2022 Dec 1;449:137759.

<https://doi.org/10.1016/j.ccej.2022.137759>

[83] Zango ZU, Sambudi NS, Jumbri K, Ramli A, Abu Bakar NH, Saad B, Rozaini MN, Isiyaka HA, Osman AM, Sulieman A. An overview and evaluation of highly porous adsorbent materials for polycyclic aromatic hydrocarbons and phenols removal from wastewater. Water. 2020 Oct 19;12(10):2921.

<https://doi.org/10.3390/w12102921>

[84] Xu L, Hu W, Luo X, Zhang J. Covalent organic framework in situ grown on the metal-organic framework as fiber coating for solid-phase microextraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in tea. Microchimica Acta. 2023 Sep;190(9):344.

<https://doi.org/10.1007/s00604-023-05915-8>

[85] Liu KG, Bigdeli F, Sharifzadeh Z, Gholizadeh S, Morsali A. Role of metal-organic framework composites in removal of inorganic toxic contaminants. Journal of Cleaner Production. 2023 Mar 14:136709.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136709>

[86] Singh NB, Nagpal G, Agrawal S. Water purification by using adsorbents: a review.



adsorbent for the removal of phosphate. Process Safety and Environmental Protection. 2022 Apr 1;160:502-12.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.034>

[98] Xie Q, Li Y, Lv Z, Zhou H, Yang X, Chen J, Guo H. Effective adsorption and removal of phosphate from aqueous solutions and eutrophic water by Fe-based MOFs of MIL-101. Scientific reports. 2017 Jun 12;7(1):3316.

<https://doi.org/10.1038/s41598-017-03526-x>

[99] Addis DR, Lambert JA, Ford DA, Jilling T, Matalon S. Halogen gas exposure: toxic effects on the parturient. Toxicology mechanisms and methods. 2021 May 4;31(4):27287.

<https://doi.org/10.1080/15376516.2020.1736702>

[100] Ottappilakkil H, Babu S, Balasubramanian S, Manoharan S, Perumal E. Fluoride induced neurobehavioral impairments in experimental animals: a brief review. Biological Trace Element Research. 2023 Mar;201(3):1214-36.

<https://doi.org/10.1007/s12011-022-03242-2>

[101] Bhattacharya S. A review on experimentally proven medicinal plants and their constituents against fluoride toxicity. Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology. 2023;42(1).

<https://doi:10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2022043545>

[102] Oyagbemi AA, Ajibade TO, Esan OO, Adetona MO, Awoyomi OV, Omobowale TO, Ola-Davies OE, Saba AB, Adedapo AA, Nkadimeng SM, McGaw LJ. Cardioprotective and renoprotective effects of melatonin and vitamin E on fluoride-induced hypertension and renal dysfunction

[92] Qasemi M, Darvishian M, Nadimi H, Gholamzadeh M, Afsharnia M, Farhang M, Allahdadi M, Darvishian M, Zarei A. Characteristics, water quality index and human health risk from nitrate and fluoride in Kakhk city and its rural areas, Iran. Journal of Food Composition and Analysis. 2023 Jan 1;115:104870.

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104870>

[93] Mehmandoust MR, Motakef-Kazemi N, Ashouri F. Nitrate adsorption from aqueous solution by metal-organic framework MOF-5. Iranian journal of science and technology, Transactions a: science. 2019 Apr 4;43:443-9.

<https://doi.org/10.1007/s40995-017-0423-6>

[94] Mohajer H, Toosi MR, Zardoost MR. Quaternary ammonium-functionalized UiO-66-Sal as an efficient and fast adsorbent for nitrate removal from water. Applied Surface Science. 2023 Apr 1;615:156391.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156391>

[95] Kratz S, Schick J, Schnug E. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. Science of the Total Environment. 2016 Jan 15;542:1013-9.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.046>

[96] Kim E, Yoo S, Ro HY, Han HJ, Baek YW, Eom IC, Kim HM, Kim P, Choi K. Aquatic toxicity assessment of phosphate compounds. Environmental health and toxicology. 2013;28.

<https://doi.org/10.5620%2Feht.2013.28.e2013002>

[97] Moumen E, Bazzi L, El Hankari S. Aluminum-fumarate based MOF: A promising environmentally friendly



[108] Wei J, Li Z, Wang J, Li C, Gupta P, Cribb M. Ground-level gaseous pollutants (NO₂, SO₂, and CO) in China: daily seamless mapping and spatiotemporal variations. *Atmospheric chemistry and physics*. 2023 Jan 26;23(2):1511-32.

<https://doi.org/10.5194/acp-23-1511-2023>

[109] Liu YZ, Guo RT, Duan CP, Wu GL, Miao YF, Gu JW, Pan WG. Removal of gaseous pollutants by using 3DOM-based catalysts: A review. *Chemosphere*. 2021 Jan 1;262:127886.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127886>

[110] Masroor K, Shamsipour M, Mehrdad R, Fanaei F, Aghaei M, Yunesian M. Exposure to ambient gaseous air pollutants and adult lung function: a systematic review. *Reviews on Environmental Health*. 2023 Mar 28;38(1):137-50.

<https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0135>

[111] Rajput K, Kumar V, Roy DR. Heterobilayer CaS/CaSe: A promising sensor for environmental toxic NO₂ gas with high selectivity and sensitivity. *Applied Surface Science*. 2020 Oct30;528:146996.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146996>

[112] Siddique SA, Sajid H, Gilani MA, Ahmed E, Arshad M, Mahmood T. Sensing of SO₃, SO₂, H₂S, NO₂ and N₂O toxic gases through aza-macrocycle via DFT calculations. *Computational and Theoretical Chemistry*. 2022 Mar 1;1209:113606.

<https://doi.org/10.1016/j.comptc.2022.113606>

[113] Sun M, Hanif A, Wang T, Gu Q, Shang J. Ambient temperature NO₂ removal by reversible NO₂ adsorption on copper-based metal-organic frameworks (MOFs)-

in rats. *Comparative Clinical Pathology*. 2024 Feb;33(1):33-45.

<https://doi.org/10.1007/s00580-023-03519-5>

[103] Ahmadijokani F, Molavi H, Rezakazemi M, Aminabhavi TM, Arjmand M. Simultaneous detection and removal of fluoride from water using smart metal-organic framework-based adsorbents. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021 Oct 15;445:214037.

<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214037>

[104] Ke F, Peng C, Zhang T, Zhang M, Zhou C, Cai H, Zhu J, Wan X. Fumarate-based metal-organic frameworks as a new platform for highly selective removal of fluoride from brick tea. *Scientific reports*. 2018 Jan 17;8(1):939.

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-19277-2>

[105] Pambudi FI, Pratiwi NS, Chusnawati U. First-principle study on the lattice-directed missing linker defect in zirconium based metal-organic framework (MOF-801): electronic properties and interaction with hydrogen. *Materials Today Communications*. 2023 Jun 1;35:105967.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105967>

[106] Wu D, Hu Y, Liu Y, Zhang R. Review of chloride ion detection technology in water. *Applied Sciences*. 2021 Nov 24;11(23):11137.

<https://doi.org/10.3390/app112311137>

[107] DeCoste JB, Demasky TJ, Katz MJ, Farha OK, Hupp JT. A UiO-66 analogue with uncoordinated carboxylic acids for the broad-spectrum removal of toxic chemicals. *New Journal of Chemistry*. 2015;39(4):2396-9.

<https://doi.org/10.1039/C4NJ02093F>



cell lung cancer A549 via ROS-mediated NF- κ B activation. *Journal of Environmental Sciences*. 2015 May 1;31:146-53.

<https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.041>

[120] Kaminski J. Technologies and costs of SO₂-emissions reduction for the energy sector. *Applied Energy*. 2003 Jul 1;75(3-4):165-72.

[https://doi.org/10.1016/S03062619\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S03062619(03)00029-1)

[121] Ren YB, Xu HY, Gang SQ, Gao YJ, Jing X, Du JL. An ultra-stable Zr (IV)-MOF for highly efficient capture of SO₂ from SO₂/CO₂ and SO₂/CH₄ mixtures. *Chemical Engineering Journal*. 2022 Mar 1;431:134057.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134057>

[122] Zhang Z, Yang B, Wu Y, Zhang W, Ma H. Post modification of Oxo-clusters in robust Zirconium-Based metal organic framework for durable SO₂ capture from flue gas. *Separation and Purification Technology*. 2021 Dec 1;276:119349.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119349>

[123] Singh SP, Singh P. Effect of CO₂ concentration on algal growth: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Oct 1;38:172-9.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.043>

[124] Kabir M, Habiba UE, Khan W, Shah A, Rahim S, De los Rios-Escalante PR, Farooqi ZU, Ali L, Shafiq M. Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University-Science*. 2023 Jul 1;35(5):102693.

<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>

derived nanoporous adsorbents. *Separation and Purification Technology*. 2023 Jun 1;314:123563.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123563>

[114] Peterson GW, Mahle JJ, DeCoste JB, Gordon WO, Rossin JA. Extraordinary NO₂ Removal by the Metal-Organic Framework UiO-66-NH₂. *Angewandte Chemie*. 2016 May 17;128(21):6343-6.

<https://doi.org/10.1002/ange.201601782>

[115] Shang S, Yang C, Tian Y, Tao Z, Smith M, Zhang H, Zhang L, Li L, Gu Q, Zhou HC, Ok YS. Designing multivariate porphyrin-based metal-organic frameworks with Ni/Co dual-metal atom sites for cooperative NO₂ capture and NO retention. *Separation and Purification Technology*. 2023 Sep 1;320:124080.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124080>

[116] Najjar YS. Gaseous pollutants formation and their harmful effects on health and environment. *Innovative energy policies*. 2011 Jan;1(1).

<https://doi:10.4303/iep/E101203>

[117] Khan MA, Rao MV, Li Q. Recent advances in electrochemical sensors for detecting toxic gases: NO₂, SO₂ and H₂S. *Sensors*. 2019 Feb 21;19(4):905.

<https://doi.org/10.3390/s19040905>

[118] Hadjiaghaie Vafaie R, Hosseinzadeh G. Using a Photoacoustic Cell for Spectroscopy of Toxic Air Pollutants including CO₂, SO₂ and NO Gases. *Sustainability*. 2023 Jun 7;15(12):9225.

<https://doi.org/10.3390/su15129225>

[119] Yun Y, Gao R, Yue H, Li G, Zhu N, Sang N. Synergistic effects of particulate matter (PM₁₀) and SO₂ on human non-small



[130] Jahromi MS, Kalantar V, Akhijahani HS, Kargarsharifabad H, Shoeibi S. Performance analysis of a new solar air ventilator with phase change material: Numerical simulation, techno-economic and environmental analysis. *Journal of Energy Storage*. 2023 Jun 1;62:106961.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106961>

[131] Jahromi MS, Kalantar V, Samimi-Akhijahani H. Evaluation of performance, energy, and exergy analysis of a solar parabolic dish collector connected to a dryer with nanofluid and PCM. *Journal of Energy Storage*. 2024 Sep 15;98:112969.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112969>

[132] Jahromi MS, Kalantar V, Samimi-Akhijahani H. Design and performance analysis of new flat solar heating porous collector equipped with vertical copper pipe and porous medium for medicinal plant drying. *Energy*. 2025 Jul 28:137653.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137653>

[133] Salami P, Safvati M, Jahromi MS, Kalantar V, Samimi-Akhijahani H. Classification of fruit solar dryers and the role of phase change materials in enhancing performance: A review. *Solar Energy*. 2025 Sep 1;297:113570.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113570>

[134] Patil KR. Experimental Investigation into the Combustion, Performance, and Emission Characteristics of Oxygenated DEE and Ethanol Blending with KOMÉ Biodiesel Fuelled CI Engine. *Journal of Renewable Energy and Environment*. 2023 May 1;10(2):1-8.

<https://doi.org/10.30501/jree.2022.328607.1330>

[125] Bhatt PM, Belmabkhout Y, Assen AH, Weseliński ŁJ, Jiang H, Cadiou A, Xue DX, Eddaoudi M. Isoreticular rare earth fcu-MOFs for the selective removal of H₂S from CO₂ containing gases. *Chemical Engineering Journal*. 2017 Sep 15;324:392-6.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.008>

[126] Li CN, Wang SM, Tao ZP, Liu L, Xu WG, Gu XJ, Han ZB. Green synthesis of MOF-801 (Zr/Ce/Hf) for CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ separation. *Inorganic Chemistry*. 2023 May 11;62(20):785360.

<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c00560>

[127] Jahromi MS, Kalantar V, Akhijahani HS, Kargarsharifabad H. Recent progress on solar cabinet dryers for agricultural products equipped with energy storage using phase change materials. *Journal of Energy Storage*. 2022 Jul 1;51:104434.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104434>

[128] Jahromi MS, Kalantar V, Akhijahani HS, Salami P. Application of artificial neural network, evolutionary polynomial regression, and life cycle assessment techniques to predict the performance of a new designed solar air ventilator with phase change material. *Applied Thermal Engineering*. 2025 Mar 6:126117.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126117>

[129] Jahromi MS, Iranmanesh M, Akhijahani HS. Thermo-economic analysis of solar drying of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) integrated with evacuated tube solar collector and phase change material. *Journal of Energy Storage*. 2022 Aug 1;52:104688.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104688>



Magnetic Nanoparticles Containing Methotrexate and Tamoxifen. *BioNanoScience*. 2021 Sep;11(3):667-77.

<https://doi.org/10.1007/s12668-021-00877-8>

[141] Mahmoudi F, Shahraki M. Encapsulating and decontaminating of sarin by heptakis (2, 3, 6-tri-O-methyl)- β -cyclodextrin: MD simulations and QM calculations. *Molecular Systems Design & Engineering*. 2021;6(8):643-53.

<https://doi.org/10.1039/D0ME00173B>

[142] Ghodsi F, Shahraki M, Habibi-Khorassani SM, Omidikia N, Majd MH. Kinetic modeling on mitoxantrone release from hyaluronic MNP as a drug delivery system. *Chemical Methodologies*. 2021;5(1):30-4.

<https://doi.org/10.22034/chemm.2021.118506>

[143] Mahmoudi F, Shahraki M. Host-Guest interactions between nerve agent sarin and β -Cyclodextrin: A theoretical investigation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2020 Nov 1;116:178-87.

<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.11.022>

[144] Shahbakhsh Y, Habibi-Khorassani SM, Shahraki M. Potassium Iodide as a New Nucleophilic Catalyst for the Novel Synthesis of Ionic Vinyl Compounds: Experimental and Theoretical Kinetic Approaches. *ChemistrySelect*. 2020 Jul 31;5(28):8806-13.

<https://doi.org/10.1002/slct.202002224>

[145] Habibi-Khorassani SM, Shahraki M, Mostafa B. Kinetics and Mechanism of the Formation of Ylides, 1, 4 or 1, 5-Diionic Organophosphorus and Phosphonate Esters: A Review. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*. 2019 Feb 1;16(1):5977.

[135] Song Y, Chen W, Wei W, Sun Y. Advances in clean fuel ethanol production from electro-, photo-and photoelectrocatalytic CO₂ reduction. *Catalysts*. 2020 Nov 5;10(11):1287.

<https://doi.org/10.3390/catal10111287>

[136] Yoshimaru S, Sadakiyo M, Maeda N, Yamauchi M, Kato K, Pirillo J, Hijikata Y. Support effect of metal-organic frameworks on ethanol production through acetic acid hydrogenation. *ACS applied materials & interfaces*. 2021 Apr 20;13(17):1999220001.

<https://doi.org/10.1021/acsami.1c01100>

[137] An B, Li Z, Song Y, Zhang J, Zeng L, Wang C, Lin W. Cooperative copper centres in a metal-organic framework for selective conversion of CO₂ to ethanol. *Nature Catalysis*. 2019 Aug;2(8):709-17.

<https://doi.org/10.1038/s41929-019-0308-5>

[138] Mahmoudi F, Shahraki M. Computational study of inclusion complexes of V-type nerve agents (VE, VG, VM, VR and VX) with β -cyclodextrin. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2024 Mar 23;42(5):2681-97.

<https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2208226>

[139] Shahraki M, Rezaei Kahkha MR, Piri J, Sharafi A, Kaykhani M. Microplastics in atmospheric dust samples of Sistan: sources and distribution. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2022 Dec;20(2):931-6.

<https://doi.org/10.1007/s40201-022-00833-y>

[140] Habibi Khorassani SM, Ghodsi F, Arezomandan H, Shahraki M, Omidikia N, Hashemzadei M, Heidari Majd M. In Vitro Apoptosis Evaluation and Kinetic Modeling onto Cyclodextrin-Based Host-Guest



<https://doi.org/10.1002/adfm.202309089>

<https://doi.org/10.2174/1570193X15666180612085855>

[146] Mohtaram MS, Abolghasemi A, Sayahi S, Rajabi H, Mohtaram S, Long M, Sabbaghi S. MOF-derived nanomaterials: Transformative innovations for renewable energy and environmental sustainability. *Coordination Chemistry Reviews*. 2026 Jan 1;546:217083.

<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217083>

[147] Darijani M, Shahraki M, Habibi-Khorassani SM. Theoretical study on the mechanism and kinetics of the formation β -carotene epoxides from the oxidative degradation of β -carotene. *Food Chemistry*. 2022 Sep 30;389:133082.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133082>

[148] Jamil U, Khoja AH, Liaquat R, Naqvi SR, Omar WN, Amin NA. Copper and calcium-based metal organic framework (MOF) catalyst for biodiesel production from waste cooking oil: A process optimization study. *Energy Conversion and Management*. 2020 Jul 1;215:112934.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112934>

[149] He Q, Zhan F, Wang H, Xu W, Wang H, Chen L. Recent progress of industrial preparation of metal-organic frameworks: synthesis strategies and outlook. *Materials Today Sustainability*. 2022 Mar 1;17:100104.

<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100104>

[150] Chakraborty D, Yurdusen A, Mouchaham G, Nouar F, Serre C. Large-scale production of metal-organic frameworks. *Advanced Functional Materials*. 2024 Oct;34(43):2309089.



A review on the use of metal organic frameworks (MOFs) in removing environmental pollutants and producing clean energy

Hanieh Barghi Jahromi¹, Mohammad Saleh Barghi Jahromi^{2*}

¹ Department of Chemistry, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Jiroft University, Jiroft, Iran

Abstract:

Environmental pollution, especially air and water pollution, is one of the great challenges of humanity today. The increasing population, industrialization and excessive consumption of natural resources have led to the release of various pollutants in the environment. Metal-organic frameworks (MOFs) are a class of nanoparticle materials with porous structures and high specific surface area, which have been considered as novel adsorbents for the removal of environmental pollutants due to their unique properties. MOFs can adsorb a wide range of pollutants from the environment, including greenhouse gases, heavy metals, volatile organic compounds, and dyes. Using MOFs to remove environmental pollutants and produce clean energy is a new and sustainable approach to solve environmental challenges. The innovation of this paper is that, for the first time, the relationship between the efficiency of MOFs in pollutant removal and their potential for clean energy production is systematically analyzed and compared. This approach not only provides a comprehensive review of recent advances, but also illuminates future research directions by highlighting the challenges and opportunities ahead.

Keyword:

Organometallic frameworks, Environmental pollution, absorbent, Catalyst, Clean energy