

Smart Nanocomposites of Metal-organic Framework (MOF) and Their Applications in Removing Dye and Environmental Pollutants

Mehrnaz Gharagozlou^{*1}, Ali Mohammadsadegh²

1- Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

2- Mechanically Assisted Corrosion Lab. , School of Metallurgy and Materials Engineering, College Engineering, University of Tehran, P. O. Box: 11155 -4563, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17- 07- 2023

Accepted: 02- 10-2023

Available online: 21-05-2024

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

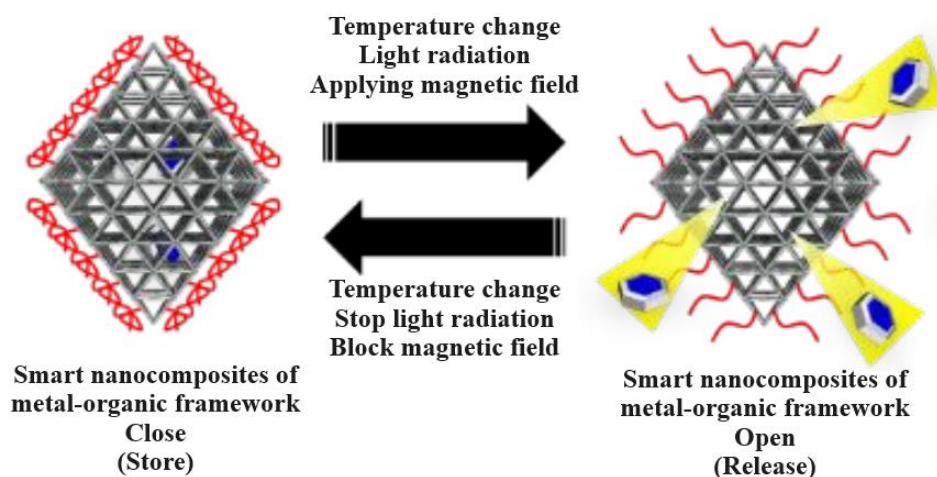
DOI: 10.30509/JSCW.2023.81974

Keywords:

Smart metal-organic framework
Light-responsive nanocomposites
Heat-responsive nanocomposites
Magnetic-responsive nanocomposites
Removal of dye and environmental pollutants

ABSTRACT

Environmental-related issues such as global warming, water pollution, and waste production are becoming increasingly urgent and endangering human lives. Developing new functional materials to deal with such environmental hazards is still an ongoing process. Metal-organic framework nanostructures, MOFs, are highly porous materials with generally high adsorption capacity for environmental pollutants. Incorporating stimuli-responsive moieties in their structures gives them more easily recovered and recyclable properties. Some researchers have successfully incorporated photoactive species into the structures of MOFs, forming light-responsive nanocomposites. Also, in smart heat-responsive nanocomposites, the presence of thermo-responsive polymeric units in the structure of an MOF gives it physicochemical properties that are sensitive to temperature changes. Recycling and separation of MOF nanocomposites can be facilitated by the incorporation of magnetic nanoparticles into their structures. This review investigates the applications of smart nanocomposites responsive to heat, light, and magnetism to remove dye and environmental pollutants. Also, this article discusses the challenges related to using smart nanocomposites as new compounds in environmental applications and their future prospects.



نانوکامپوزیت‌های هوشمند چارچوب فلزی-آلی MOF و کاربردهای آن‌ها در حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی

مهرناز قراگزلو^{۱*}، علی محمدصادق^۲

۱- دانشیار، گروه پژوهشی نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

۲- کارشناس ارشد، آزمایشگاه جنبه‌های مکانیکی خوردگی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵.

چکیده

مسائل مربوط به آلاینده‌های مواد رنگزا و محیط‌زیست مانند گرم شدن کره زمین، آلودگی آب و تولید زباله روزبه‌روز اهمیت بیشتری پیدا کرده و زندگی انسان‌ها را به خطر می‌اندازد. توسعه مواد کاربردی جدید برای مقابله با چنین مخاطرات زیست‌محیطی همچنان مورد توجه محققین است. نانوساختارهای چارچوب فلزی-آلی، MOF ها، نانومواد متخلخلی با ظرفیت جذب بالای آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند. با ترکیب بخش‌های پاسخگو به محرک‌ها در ساختارهایشان، می‌توان ویژگی‌هایی مانند باز یافت را به آن‌ها اضافه می‌کند. برخی از پژوهشگران با موفقیت گونه‌هایی فعال نوری را در ساختارهای MOF ها وارد کرده‌اند که منجر به تشکیل نانوکامپوزیت‌های هوشمند پاسخگو به نور می‌شود. همچنین در نانوکامپوزیت‌های هوشمند پاسخگو به حرارت وجود واحدهای پلیمری پاسخگوی حرارتی در ساختار MOF باعث می‌شود دارای خواص فیزیکی و شیمیایی حساس به تغییرات دما باشند. باز یافت و جداسازی نانوکامپوزیت‌های MOF را می‌توان با ترکیب نانوذرات مغناطیسی در ساختار آن‌ها و ساخت نانوکامپوزیت‌های هوشمند پاسخگو به مغناطیس تسهیل کرد. این پژوهش به بررسی کاربردهای نانوکامپوزیت‌های هوشمند پاسخگو به حرارت، نور و مغناطیس برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی می‌پردازد. همچنین در این مقاله، چالش‌های مرتبط با استفاده از نانوکامپوزیت‌های هوشمند به عنوان ترکیبات جدید در کاربردهای زیست‌محیطی و چشم‌انداز آینده آن‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/JSCW.2023.81974

واژه‌های کلیدی:

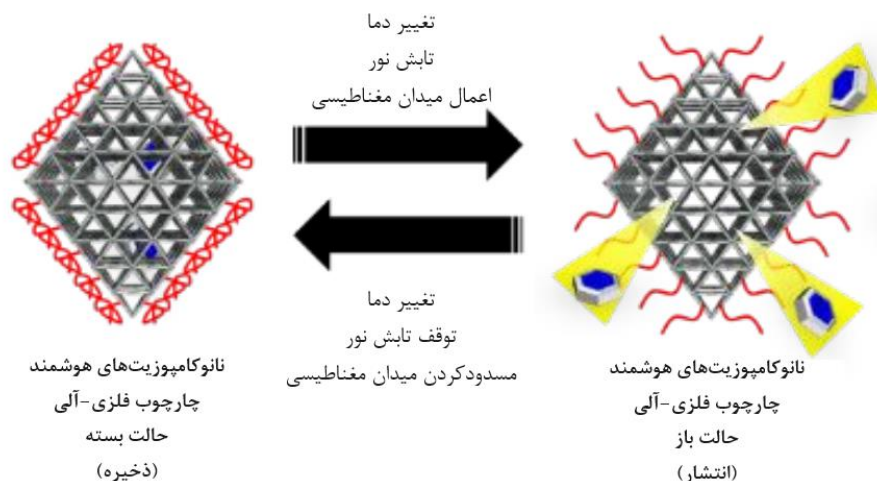
چارچوب فلزی-آلی هوشمند

نانوکامپوزیت‌های پاسخگو به نور

نانوکامپوزیت‌های پاسخگو به گرما

نانوکامپوزیت‌های پاسخگو به مغناطیس

حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی



Corresponding author: gharagozlou@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

رشد سریع جمعیت انسانی و صنعتی شدن جهان منجر به تخلیه مقادیر زیادی از آلاینده‌ها به محیط‌زیست در سال‌های اخیر شده است (۱،۲). این آلاینده‌ها شامل آلاینده‌های گازی نظیر CO_2 ، N_2 و غیره. آلاینده‌های معدنی مانند کروم، کادمیم، جیوه، آرسنیک، فلئور و همچنین آلاینده‌های آلی شامل مواد رنگزا، آفت‌کش‌های آلی، روغن‌ها، آلاینده‌های آلی پایدار و میکروپلاستیک‌ها می‌شوند (۳، ۴). بررسی‌ها نشان می‌دهد محیط‌زیست به شدت توسط این آلاینده‌ها آسیب‌دیده و سلامت انسان‌ها به خطر افتاده است (۴-۶)؛ بنابراین، لازم است اقدامات مؤثری برای تصفیه و حذف مناطق آلوده انجام شود تا اثرات زیست‌محیطی این آلاینده‌ها به حداقل برسد. روش‌هایی که به‌طور موفقیت‌آمیزی برای تصفیه محیط‌های آلوده استفاده شده‌اند عبارت‌اند از لخته‌سازی^۱ (۳، ۷)، انعقاد^۲ (۸، ۹)، صاف‌کردن (۱۰، ۱۱) و جذب (۱۲، ۱۳). در میان این روش‌ها، استفاده از جذب سطحی توسط نانوجاذب‌های جدید در سال‌های اخیر رواج بیشتری یافته است که این را می‌توان به اقتصادی بودن و سادگی روش به عنوان یک فرایند تصفیه نسبت داد (۱۷-۱۴).

در سال‌های گذشته تحقیقات زیادی برای جاذب‌های سازگار با محیط‌زیست و ظرفیت جذب بالا برای آلاینده‌های مواد رنگزا و محیطی صورت گرفته است (۲۱-۱۸)؛ بنابراین، برخی از محققان از جاذب‌های مبتنی بر پلی‌ساکارید (۲۳، ۲۲)، نانوکامپوزیت‌های پلی‌دوپامین (۲۵، ۲۴)، خاک رس طبیعی (۲۶)، چارچوب‌های فلزی-آلی^۳ (۲۷، ۲۸) و نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر حلال یوتکتیک عمیق استفاده کرده‌اند (۲۹). در همین راستا چارچوب‌های فلزی-آلی ترکیبات پلیمری هم‌آرایی^۴ هستند که از فلز به عنوان گره و پیوندهای^۵ آلی به عنوان ارتباط‌دهنده تشکیل شده‌اند (۳۰). به منظور حذف آلاینده‌های محیط‌های آلوده، MOF‌ها نظر بسیاری از محققین را برای تصفیه محیطی به خود جلب کرده است (۳۱-۳۳). این مشاهدات را می‌توان به کارایی بالای MOF‌ها و نانوکامپوزیت‌های آن‌ها به عنوان جاذب آلاینده‌های محیطی در نتیجه تخلخل، معماری منفذی و عملکرد بالا و همچنین وجود بسیاری از مکان‌های جذب فعال نسبت داد (۳۴، ۳۵). محققان از انواع بسیاری از MOF‌ها به منظور تصفیه محیط‌زیست استفاده کرده‌اند. بعضی از این موارد عبارت‌اند از چارچوب‌های زئولیتی ایمیدازولات^۶ (ZIF)، MOF‌های مبتنی بر کلسیم برای حذف ترکیبات مختل‌کننده غدد درون‌ریز از محیط آبی، MOF‌های کاربردی به عنوان جاذب برای غنی‌سازی انتخابی آلاینده‌های دارویی در نمونه‌های آبی. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از جاذب‌های مبتنی بر MOF معمولاً با بازیابی استخراج نسبتاً بالا و

همچنین ظرفیت‌های جذب بالا همراه است (۳۶، ۳۷).

اگرچه زئولیت‌های مصنوعی (که فقط از اجزای غیرآلی مانند سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها تشکیل شده‌اند) از دهه ۱۹۴۰ به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، تا اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ اولین مواد متخلخل بلوری با اندازه منافذ بزرگ‌تر از ۱ و ۲ نانومتر بود، به ترتیب گزارش شدند. در سال ۱۹۹۵، یک طبقه منحصر به فرد از مواد متخلخل بلوری، به نام چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) توسط یاغی^۷، پدید آمد و از آن زمان به دلیل پیوندهای قوی بین یون‌های فلزی و پیوندهای آلی باردار، خود را با تخلخل دائمی و مساحت سطح بالا متمایز کرد اگرچه مفهوم اولیه تخلخل در مواد فلزی-آلی با ساختارهای گسترده در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ تصور شد، تا اواخر دهه ۱۹۹۰ اولین اندازه‌گیری‌های تجربی جذب گاز این مواد هیبریدی معدنی-آلی گزارش نشد. کیتاگوا^۸ ایزوترم‌های جذب گاز در دمای اتاق را در فشارهای بالا گزارش کرد و نشان داد که پلیمرهای فلز-آلی قادر به جذب مولکول‌های مهمان فاز گاز هستند. در سال ۱۹۹۸، یاغی اولین MOF را گزارش کرد که تخلخل دائمی را با ایزوترم‌های جذب/واجذب نیتروژن در دمای ۷۷ کلین و فشار کم نشان می‌داد (۳۸).

بالاین‌حال، استفاده از نانوجاذب‌های مبتنی بر MOF برای تصفیه محیط‌زیست معمولاً با وجود تعداد محدودی از فن‌ها برای بازیابی آن‌ها پس از فرایند جذب مختل می‌شود (۳۹، ۴۰). علاوه بر این، دفع MOF‌های غنی‌شده معمولاً با استفاده از حلال‌های آلی است که برخی از آن‌ها برای محیط‌زیست سمی هستند (۳۹، ۴۰). در نتیجه، محققان در تلاش هستند تا نانوکامپوزیت‌های MOF را بسازند که به راحتی بازیافت شوند. یکی از این راهبردها ساخت نانوکامپوزیت‌های چارچوب فلزی-آلی هوشمند است که به محرک‌هایی مانند دما، نور و میدان مغناطیسی پاسخ می‌دهند. استفاده از MOF‌های هوشمند پاسخگو به محرک‌ها در خلال تصفیه محیط‌زیست در سال‌های اخیر سرعت بیشتری به دست آورده است (۴۱-۴۳) (جدول ۱).

به عنوان مثال، وی و همکارانش (۴۴)، از MOF هوشمند پاسخگوی مغناطیسی مبتنی بر حلال عمیق یوتکتیک برای جذب مواد دارویی و محصولات مراقبت شخصی از فاضلاب استفاده کرد. موگل و همکارانش (۴۴) با موفقیت از MOF‌های هوشمند پاسخگو به نور برای حذف جذبی مواد رنگزا از فاضلاب استفاده کرد درحالی‌که ژانگ^۹ و همکارانش (۴۵) عملکرد جذب MOF‌های هوشمند پاسخگو به pH اصلاح‌شده با کیتوزان و آتاپولژیت^{۱۰} را در طی اصلاح آب آلوده به مواد رنگزا ارزیابی کرد.

¹ Flocculation

² Coagulation

³ Metal-organic framework

⁴ Coordination

⁵ Ligand

⁶ Zeolitic Imidazolate Frameworks

⁷ Yaghi

⁸ Kitagawa

⁹ Zhang

¹⁰ Attapulgitte

جدول ۱: استفاده از نانوکامپوزیت‌های MOF هوشمند پاسخگو به محرک برای اصلاح آلاینده‌های مواد رنگزا و محیط‌زیستی

Table 1: Application of stimuli-responsive MOF composites during environmental remediation

Analyte	Class of analyte	Matrix	Stimuli-responsive MOFs	Stimulus	Performance parameters	Reference
CO ₂ /N ₂ and SO ₂ /N ₂ gas separation	Gas	Gas	Light-responsive hierarchical metal organic frameworks constructed mixed matrix membranes	Light	CO ₂ (SO ₂)/N ₂ selectivity of 78(420)	(46)
Fluoroquinolones	Antibiotic	Water samples	pH/thermo dual-responsive microporous polymeric microspheres	pH and temperature	High recovery values (93.1–97.2%), a high enrichment factor (180), and good precision (RSD < 8%, n = 6)	(46)
Congo red	Dye	Wastewater	Microporous photoresponsive azobenzene dicarboxylate MOFs of Al ³⁺ (Al-AZB) and Zr ⁴⁺ (Zr-AZB)	Light	The maximum adsorption capacity of Al-AZB and Zr-AZB was 456.6 mg g ⁻¹ and 128.9 mg g ⁻¹ , respectively	(47)
Na ⁺ , K ⁺ and Li ⁺ ions	Monovalent metal ions	Water samples	Crosslinked poly(Nisopropylacrylamide-coacryloylamidobenz-18-crown-6) functionalized MOF-808	Temperature	High adsorption capacity of 1.04 mmol g ⁻¹ and excellent selectivity up to 29.4 for Na ⁺ /Li ⁺ and 34.4 for K ⁺ /Li ⁺	(48)
Chromium (VI) ions	Heavy metal ions	Wastewater	Visible- light responsive PPynt@NH2- MIL-125 nanocomposite	Light	99.02% Cr(VI) reduction	(49)
CO ₂ and N ₂	Gases	Air	UiO-66 frameworks with azobenzene functionalities	Light	High selectivity	(50)
Alkylphenols	Phytochemicals	Water	Thermo-responsive polymer PNIPAM tethered to Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @MOF coreshell magnetic microspheres	Temperature	High recoveries (78.7–104.3%) of alkylphenols	(50)
Methylene blue	Dye	Wastewater	Thermoresponsive ZIF-8@PNIPAm-coMAA microgel composites	Temperature	High extraction efficiency	(51)
Tetracycline	Antibiotic	Water	Temperature-responsive polymertethered Zr-porphyrin MOFs encapsulated carbon dot nanohybrids	Temperature	Removal efficiency for tetracycline was 90.93% in just 20 min	(43)
Fluoroquinolones	Antibiotic	Water samples	pH/thermo dual-responsive microporous polymeric microspheres	pH and temperature	High recovery values (93.1–97.2%), a high enrichment factor (180), and good precision (RSD < 8%, n = 6)	(52)
As(III) and As(V)	Heavy metal	Wastewater	magnetic zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8)	Magnetic field	Adsorption capacity was 30.87 and 17.51 mg g ⁻¹ , for As(III) and As(V), respectively	(53)
Fluoroquinolones	Antibiotics	Water	Core-shell titanium-based MOF functionalized magnetic microsphere	Magnetic field	Extraction recoveries in the range of 83.8–109.4% with the RSDs lower than 8.9%	(54)
Methyl orange	Dye	Wastewater	Zolitic imidazolate framework cobaltderived ZIF-67	Light	more than 88% of MO is degraded within 1 h	(55)
Sulfamethoxazole	Antibiotic	Water	UiO-66-NH2/Ag ₃ PO ₄ MOF-nanoparticle composites	Light	Adsorption capacity of 200 mg g ⁻¹	(42)
Tetracycline	Antibiotic	Water	MOFs composites based on TiO ₂ and MIL-53(Fe)	Light	Adsorption capacity of 287.18 mg g ⁻¹	(56)

اولادوی^۱ و همکارانش (۱۸) استفاده از آب آلوده به مواد رنگزا با استفاده از نانوکامپوزیت‌های MOF را بررسی کرد. راجپوت^۲ و همکارانش (۵۷) استفاده از MOFها برای تصفیه فاضلاب مواد رنگزا را مورد بررسی قرار داد. از سوی دیگر، عبدالحمید و متیو (۵۷) یک بررسی جامع در مورد کاربردهای چندوجهی نانوکامپوزیت‌های

MOFهای پاسخگو به محرک انواع مختلفی از برهم‌کنش‌ها را با آلاینده‌های محیطی تشکیل می‌دهند که شامل پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های π - π ، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی، کمپلکس شدن و برهم‌کنش‌های آب‌گریز است.

در سال‌های اخیر بررسی‌های زیادی در مورد استفاده از MOFها در طی تصفیه محیط‌زیست گزارش شده است. به عنوان مثال،

¹ Oladoye

² Rajput

پاسخگو به حرارت که معمولاً در ساختار نانوکامپوزیت‌های MOF محبوس می‌شوند را می‌توان به پلیمرهای دمای محلول بحرانی پایین^۱ (LCST) و دمای محلول بحرانی بالا^۲ (UCST) طبقه‌بندی کرد. دمای محلول بحرانی (CST) دمایی است که در آن جداسازی فاز اتفاق می‌افتد. پلیمرهای نوع LCST آب‌دوست هستند و در دمای کمتر از LCST خود با آب قابل امتزاج هستند در حالی که در دمای بالاتر از LCST خود آب‌گریز هستند (۵۹). از سوی دیگر، پلیمرهای نوع UCST در دماهای بالاتر از UCST خود آب‌دوست و در دمای زیر UCST خود آب‌گریز هستند (۴۳).

پلیمرهای پاسخگو به حرارت ترکیب شده با نانوکامپوزیت‌های MOF توسط برخی از محققین برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی استفاده شده است (جدول ۱). به عنوان مثال، ژانگ و همکارانش (۴۸)، از پلی شبکه‌ای متقابل N-isopropylacrylamide-co- (acryloylamidobenzo-18-crown-6 (pNCE/MOF-808) به عنوان یک جاذب انتخابی برای کاتیون‌ها در فاضلاب (MOF-808) به حذف آلاینده‌های مواد رنگزا استفاده کرد (شکل ۱). حضور PNIPAM به جاذب با واکنش دما و کمپلکس benzo-18-crown-6 آن را با میل اتصال ویژه کاتیونی اعطا کرد. جاذب pNCE/MOF-808 ترجیحاً می‌تواند به دلیل اثر تطابق اندازه، اثر کم‌آبی یون و ثابت پایداری مجموعه cation-benzo-18-crown-6، Na^+ و K^+ را جذب کند و Li^+ را در دمای محیط باقی بگذارد.

^۱ Lower critical solution temperature

^۲ Upper critical solution temperature

سلولز-MOF از جمله تصفیه محیط‌زیست و مواد رنگزا منتشر نمودند. بیشتر این پژوهش‌ها کاربرد MOF‌های پاسخگو به محرک‌ها را در برای تصفیه محیط‌زیست آلوده بررسی نمی‌کنند. مقالات نسبتاً کمی در منابع وجود دارد که کاربرد MOF‌های هوشمند را در تصفیه محیط‌زیست و حذف آلاینده‌های مواد رنگزا بررسی کرده باشد؛ بنابراین، این مقاله با کاوش در استفاده از MOF‌های هوشمند برای تصفیه فاضلاب و حذف آلاینده‌های مواد رنگزا، قصد دارد این شکاف تحقیقاتی را پر کند.

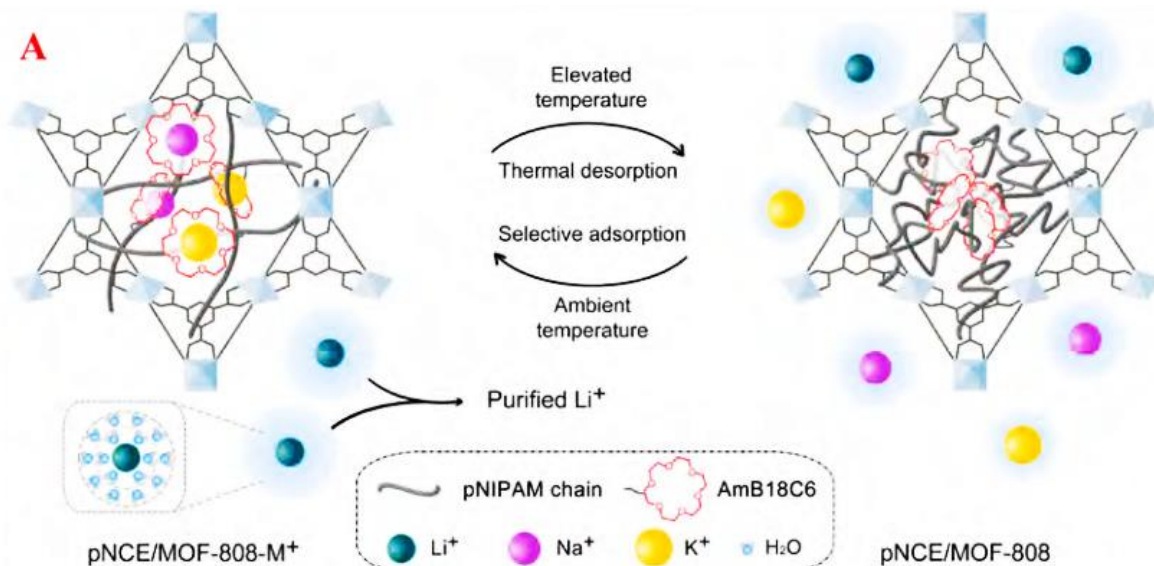
۲- کاربرد نانوکامپوزیت‌های MOF پاسخگو به

محرک برای تصفیه محیط‌زیست

MOF‌های هوشمند پاسخگو به دما، نور و واکنش مغناطیسی توسط بسیاری از محققین برای تصفیه محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این بخش به طور کامل کاربرد MOF‌های هوشمند پاسخگو حرارتی، MOF‌های پاسخگو به نور و MOF‌های پاسخگو به مغناطیسی را برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی بررسی می‌کند.

۲-۱- نانوکامپوزیت‌های MOF پاسخگوی حرارتی

نانوکامپوزیت‌های MOF هوشمند پاسخگو به حرارت با ترکیب پلیمرهای پاسخگو به حرارت در ساختار آن‌ها ساخته می‌شوند (۵۷، ۵۶). وجود ترموپلیمرهای پاسخگو باعث می‌شوند که خواص فیزیکی و شیمیایی نانوکامپوزیت‌های MOF به شیوه‌ای کنترل شده و برگشت پذیر در پاسخ به تغییرات دما تغییر کند (۵۸). پلیمرهای



شکل ۱: جذب انتخابی یون‌های فلزی تک‌طرفیتی و دما باعث دفع در برگشت‌پذیر حرارتی می‌شود (۴۸).

Figure 1: Selective adsorption of monovalent metal ions and temperature-triggered desorption in thermally reversible pNCE/MOF-808 (48)

نور استفاده کرده و از آن‌ها برای توسعه جاذب‌های کارآمد و غشاهایی برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی استفاده کرده‌اند (جدول ۱).

تاکنون، بسیاری از انواع مختلف MOF‌های پاسخگو به نور با موفقیت سنتز شده‌اند. به طور کلی می‌توان آن‌ها را در سه نسل دسته‌بندی کرد. MOF پاسخگو به نور نسل اول از مولکول مهمان پاسخگو به نور برای القای خاصیت پاسخگوی نور خود استفاده می‌کند. مثالی برای این MOF‌ها توسط یانی^۲ و همکارانش ارائه شده است که از نور مرئی برای تحریک انتشار CO₂ استفاده کرد. برخلاف نسل اول، MOF‌های نسل دوم و نسل سوم که به نور پاسخ می‌دهند از پیوندهای پاسخگو به نور برای القای خاصیت پاسخگو به نور استفاده می‌کنند. در نسل دوم، قسمت پاسخگو به نور به داخل منافذ MOF بیرون زده است. یکی از نمونه‌های معروف این MOF توسط ژو^۳ و همکارانش با سنتز یک MOF-57 ایزورتیکولار پاسخگو به نور ارائه شد. نقطه ضعف استفاده از MOF پاسخگو به نور نسل اول و نسل دوم این است که منافذ آن‌ها توسط مولکول‌های مهمان یا سایر بخش‌ها اشغال شده است. هنگامی که به عنوان جاذب استفاده می‌شود، این به طور بالقوه کارایی آن‌ها را کاهش می‌دهد. در حالی که در نسل سوم، پیوند پاسخگو به نور به عنوان چارچوب ستونی MOF عمل می‌کند. یک مزیت آشکار استفاده از MOF پاسخگو به نور نسل سوم وجود دارد: عدم وجود هر گونه مولکولی در منافذ آن. این باعث می‌شود که منافذ MOF پس از استفاده به عنوان جاذب کاملاً در دسترس باشد (۶۱).

غشاهای پاسخگو به نور توسط برخی از محققان برای تصفیه محیط‌زیست استفاده شده است. شین^۴ و همکارانش (۴۶)، یک غشای بستر مخلوط متشکل از یک MOF پاسخگو به نور و بستر Matrimid 5218 سنتز کرد. MOF پاسخگو به نور با استفاده از Co(NO₃)₃·6H₂O به عنوان نمک فلزی و اسید - 4,4'-azobenzene dicarboxylic به عنوان پیوند پاسخگو به نور با روش ماکروویو سنتز شد. آن‌ها از غشاء مبتنی بر MOF پاسخگو به نور برای جداسازی گازها (CO₂، SO₂ و N₂) استفاده کردند (شکل ۲). نتایج تجربی نشان داد که غشای مبتنی بر MOF پاسخگو به نور دارای گزینش‌گری (SO₂)/N₂ نسبتاً بالایی است. اثر الک اندازه غشاء مبتنی بر MOF پاسخگو به نور با اندازه منافذ ۰٫۳۵ نانومتر، گزینش‌گری را افزایش داد، در حالی که گروه N=N- تمایل بیشتری به مولکول‌های CO₂ به جای N₂ نشان داد. مکان‌های غشای بستر مخلوط به دلیل وجود بخش‌های آزو در ساختار آن، پاسخ‌دهی به نور را نشان دادند.

در دمای محیط، زنجیره‌های PNIPAM به دلیل این که دما کمتر از LCST آن‌ها بود، آب‌دوست هستند و به دلیل تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی بین گروه‌های آمید و مولکول آب، ساختارهای سیم‌پیچ متورم داشتند. این امر باعث می‌شود که شبکه پلیمری شل شود و باعث می‌شود که مجموعه cation-benzo-18-crown-6 در معرض یون‌های فلزی قرار گیرد و در نتیجه جذب را تسهیل کند. در مقابل، دماهای بالاتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد باعث تورم‌زدایی زنجیره‌های پلیمری شده و باعث می‌شود آن‌ها در حالت فروپاشی قرار بگیرند که باعث تغییر شکل مکان‌های جذب‌شده و در نتیجه باعث افزایش دفع می‌شود.

نانوکامپوزیت‌های MOF و پلیمرهای واکنش‌گر حرارتی توسط برخی از محققان برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی استفاده شده‌اند. به عنوان مثال، آلگرتو^۱ و همکارانش، از یک میکروژل MOF ZIF-8 و یک پلیمر PNIPAM پاسخگو به حرارت برای جذب ماده رنگزای متیلن آبی از فاضلاب استفاده کردند. آن‌ها متاکریلیک اسید را به عنوان یک مونومر در طول سنتز میکروژل ترکیب کردند. حضور بخش‌های کربوکسیلیک اسید از متاکریلیک اسید باعث ایجاد هسته‌های ناهمگن محدود از طریق پیش‌غلظت پیش‌سازهای MOF در نانوکامپوزیت می‌شود. نانوکامپوزیت دارای ترکیبی هم‌افزایی از خاصیت پاسخگوی حرارتی از PNIPAM و تخلخل بالا از MOF بود. آن‌ها با موفقیت از میکروژل برای جذب متیلن آبی از فاضلاب استفاده کردند و ظرفیت جذب نسبتاً بالایی و همچنین گزینش‌پذیری بالایی به دست آوردند که به دلیل ماهیت بسیار متخلخل میکروژل مبتنی بر MOF و وجود منافذ تنظیم‌شده حرارتی آن بود. علاوه بر این، میکروژل را می‌توان به راحتی با تغییر شرایط دما بازیابی کرد. از مزایای MOF‌های پاسخگوی حرارتی ظرفیت جذب بالا و سرعت جذب و دفع سریع‌تر آن است. همچنین از معایب آن به محدودیت استفاده شرایط دمایی به دلیل پاسخگویی به حرارت اشاره کرد (۳۸).

۲-۲- نانوکامپوزیت‌های MOF پاسخگوی نوری

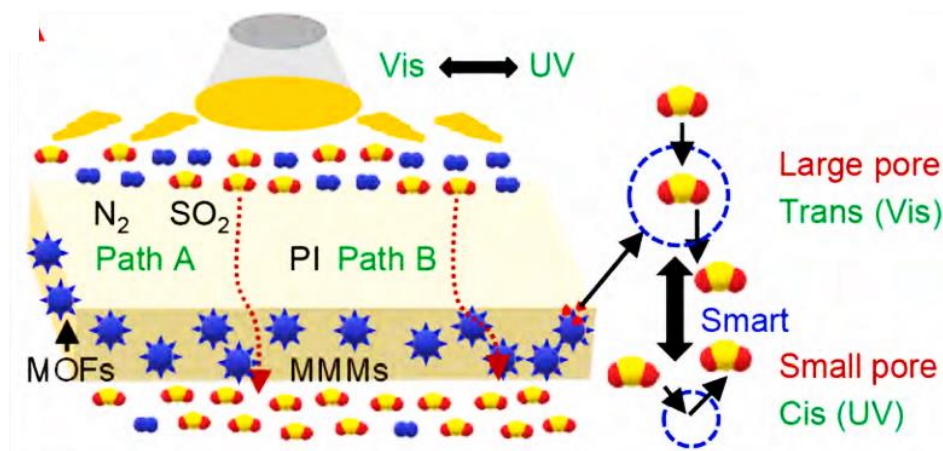
MOF‌های پاسخگو به نور دارای گونه‌های فعال نوری هستند که در ساختار خود تعبیه شده‌اند (۴۶، ۴۹، ۶۰). برخورد آن‌ها با نور دارای طول‌موج و شدت مناسب باعث ایجاد تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی می‌شود (۴۷). این تغییرات شامل برانگیختن الکترون‌ها از باندهای ظرفیت به باندهای رسانایی و همپاراش از سیس به ترانس و همچنین تغییرات در تخلخل، بافت یا ترکیب شیمیایی آن‌ها است (۴۲، ۵۵، ۵۶). برخی از محققان از این تحولات القاشده نوری MOF‌های پاسخگو به

² Yanai

³ Zhou

⁴ Xin

¹ Allegretto



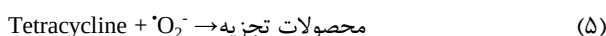
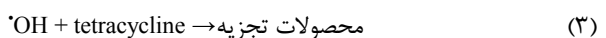
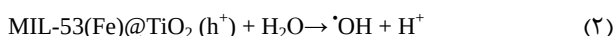
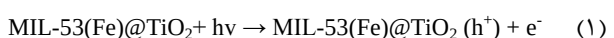
شکل ۲: چارچوب‌های آلی فلزی سلسله مراتبی پاسخگو به نور هوشمند، غشاهای بستر مخلوط را برای جداسازی گاز کارآمد ساخته‌اند (۴۶).
 Figure 2: Smart light-responsive hierarchical metal organic frameworks constructed mixed matrix membranes for efficient gas separation. (46).

گروه‌های آزو در غشا، هنگامی که در معرض نور مرئی قرار می‌گیرند، دارای یک پیکربندی ترانس بودند که مکان‌ها را گسترش می‌داد و در نتیجه نفوذپذیری SO_2 و CO_2 را افزایش می‌داد. از سوی دیگر، بخش‌های آزو هنگام تابش پرتو فرابنفش یک پیکربندی *cis* به خود گرفتند و این باعث کاهش قابل توجهی در اندازه منافذ غشاء و در نتیجه کاهش نفوذپذیری گازها شد (۴۶، ۶۲).

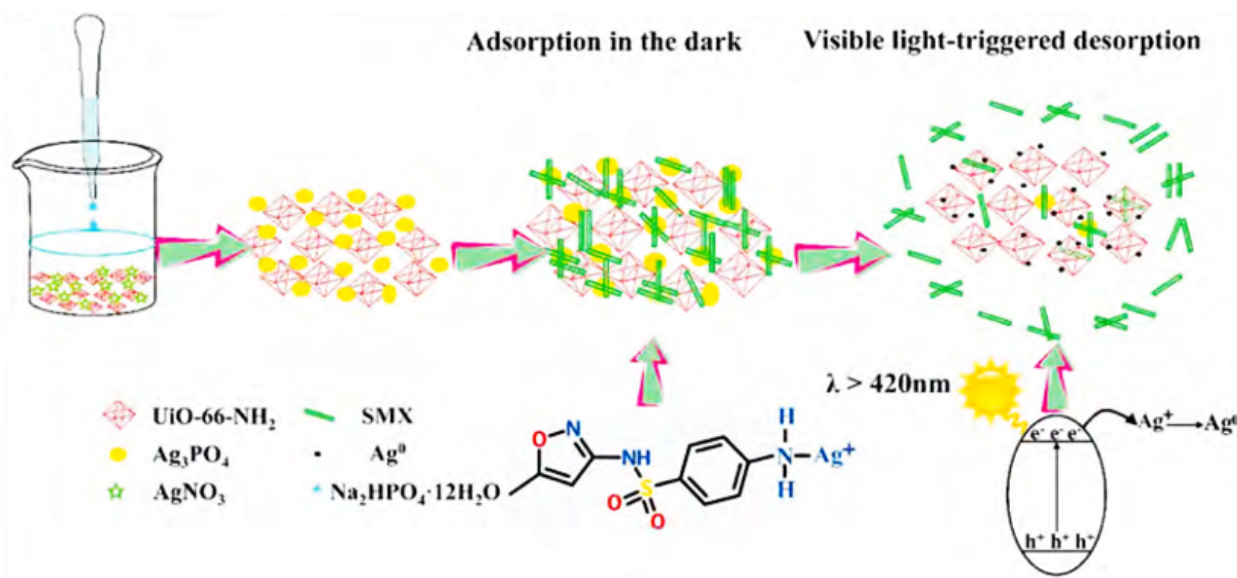
در مثال دیگری، خو^۱ و همکارانش (۴۲)، نانوکامپوزیت‌های MOF $\text{UiO-66-NH}_2/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ را سنتز کرد و با موفقیت از آن‌ها به عنوان جاذب سولفامتوکسازول در فاضلاب رنگی استفاده کرد (شکل ۳). حضور نانوذرات Ag_3PO_4 در جاذب به آن‌ها پاسخ‌دهی به نور می‌دهد. تبیین ساختاری نانوکامپوزیت $\text{UiO-66-NH}_2/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ با استفاده از آنالیزهای XRD، FT-IR، XPS، TGA، SEM، TEM و BET انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که جاذب عمدتاً به دلیل برهم‌کنش الکترواستاتیکی بین سولفامتوکسازول آنیونی و یون‌های Ag^+ از Ag_3PO_4 و به‌خوبی کمپلکس بین گروه‌های NH_2^- از سولفامتوکسازول و یون‌های Ag^+ است. هنگامی که از این نانوکامپوزیت به عنوان جاذب استفاده کردند، آن‌ها ظرفیت جذب نسبتاً بالایی (200 mg g^{-1}) برای سولفامتوکسازول به دست آوردند. تابش نانوکامپوزیت $\text{UiO-66-NH}_2/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ با نور مرئی باعث تحریک عکس نانوذرات Ag_3PO_4 شد و این منجر به شکافتن مولکول‌های آب شد. در طی تقسیم عکس مولکول‌های آب، Ag^+ به‌طور هم‌زمان به Ag^0 کاهش یافت. این تبدیل Ag^+ به Ag^0 باعث تضعیف برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی بین سولفامتوکسازول آنیونی و یون‌های نقره در نانوکامپوزیت شد. در نتیجه دفع نوری سولفامتوکسازول از نانوکامپوزیت $\text{UiO-66-NH}_2/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ رخ داد. انتشار سولفامتوکسازول از نانوکامپوزیت غنی‌شده $\text{UiO-66-NH}_2/$

Ag_3PO_4 بدون حلال و در نتیجه سازگار با محیط‌زیست بود (۴۶). در پژوهش دیگری، ژانگ و همکارانش (۵۶)، از یک فرایند حلال گرمایی تک‌مرحله‌ای برای سنتز یک نانوکامپوزیت MIL-53(Fe)@ TiO_2 که به نور پاسخگو است استفاده کرد و از آن برای تصفیه تتراسایکلین در فاضلاب رنگی استفاده کرد. نتایج تجربی نشان داد که نانوکامپوزیت MIL-53(Fe)@ TiO_2 سنتز شده دارای ظرفیت جذب افزایش یافته برای تتراسایکلین در هنگام تابش نور مرئی است. جاذب تتراسایکلین در نانوکامپوزیت MIL-53(Fe)@ TiO_2 عمدتاً از طریق برهم‌کنش π - π رخ داده است. آن‌ها ظرفیت جذب نسبتاً بالایی در شرایط بهینه به دست آوردند. وجود Ti در نانوکامپوزیت دلیل پاسخگویی به نور بود. تابش نانوکامپوزیت غنی‌شده با الکترون‌های برانگیخته با نور مرئی (e^-) در باند ظرفیت (VB) نانوکامپوزیت به نوار هدایت (CB) باعث ایجاد حفره‌های (h^+) در VB شد. در نتیجه، h^+ با H_2O واکنش نشان داد تا رادیکال‌های $\cdot\text{OH}$ و $\cdot\text{O}_2^-$ همان‌طور که در واکنش‌های ۱ تا ۵ نشان داده شده است، تولید کند.

در طول تجزیه عکس تتراسایکلین، n-n هتروجانکشن تشکیل شد و این فرایند تجزیه را افزایش داد زیرا از نوترکیبی حامل‌های فوتوژنیک جلوگیری کرد (واکنش‌های ۱-۵).



¹ Xu



شکل ۳: طرح‌واره سنتز نانوکامپوزیت‌های UiO-66-NH₂/Ag₃PO₄ MOF NP و سازوکار جذب و دفع آن‌ها برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی (۴۲).
Figure 3: The schematic diagram of the synthesis of UiO-66-NH₂/Ag₃PO₄ MOF NP composites and their adsorption-desorption mechanism. (42).

CO₂ است. در گزارش‌های اخیر جاذب‌های MOF پاسخگو به نور برای جذب CO₂ مناسب هستند. طول موج نور اثر تعدیل‌کننده متفاوتی بر روی جذب مولکول‌های مختلف گاز دارد. لذا انتخاب‌پذیری CO₂ می‌تواند پس از تغییر ایزومری شدن ترانس/سیس چارچوب فلزی-آلی ناشی از نور تغییر کند (۵۸).

MOFها به دلیل ویژگی‌های ساختاری ذاتی‌شان که شامل سطح بزرگ و ساختار متخلخل و ترکیبی قابل تنظیم بین گره‌های فلزی و پیوندهای آلی می‌شود، در کاتالیزور نوری مزایای زیادی دارند (۶۴). این MOFها دارای دقت بالا، جذب بسیار بالا و بازیافت‌پذیری هستند (۶۵). از معایب این MOFها می‌توان به روش مصنوعی طولانی و تهدیدات زیست‌محیطی ناشی از برخی از حلال‌های آلی مورد استفاده در طول سنتز آن‌ها اشاره کرد (۶۶).

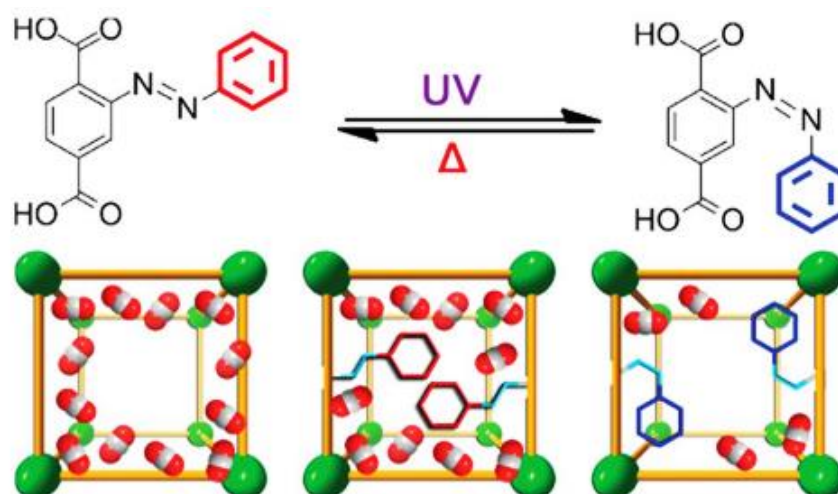
۲-۳- نانوکامپوزیت‌های MOF پاسخگوی مغناطیسی

ساخت MOFهای پاسخگو به مغناطیس می‌تواند به‌طور مؤثر برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی استفاده شوند (جدول ۱). MOFهای پاسخگو به مغناطیس غنی‌شده را می‌توان به راحتی پس از فرایند اصلاح با اعمال میدان مغناطیسی خارجی از نمونه انبوه بازیابی کرد (۶۴)؛ بنابراین، قابلیت بازیافت MOFهای پاسخگو به مغناطیس پس از استفاده، ویژگی اصلی آن‌هاست که توجه برخی از محققان را در طول تصفیه محیطی به خود جلب کرده است. تعداد زیادی از فعل‌وانفعالات بین MOFهای واکنش‌دهنده مغناطیسی و آلاینده‌ها در طول تصفیه محیطی رخ می‌دهد.

به منظور مقایسه کارایی نانوکامپوزیت چارچوب فلزی-آلی هوشمند در حذف آلاینده‌های مواد رنگزا با سایر آلاینده‌ها نظیر گازهای آلاینده، اثر همپاراش تصویری پیوند بر ظرفیت جذب CO₂ برای اولین بار توسط ژو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار گرفت (۶۳). در آن کار، یک MOF قابل تغییر عکس، PCN-123، با ترکیب گروه جانبی AB به ۲- (فنیل دیازنیل) ترفتالات به عنوان پیوند (شکل ۴) سنتز شد. پس از ۱ ساعت تابش پرتو فرابنفش، ظرفیت جذب CO₂ PCN-123 از ۲۲/۹ به ۱۶/۸ سانتی‌متر مکعب بر گرم کاهش یافت و سپس با اندازه‌گیری مجدد به ۱۰/۵ سانتی‌متر مکعب بر گرم کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش ۵۳/۹ درصدی در جذب CO₂ است. چنین کاهش قابل‌توجهی در جذب CO₂ به تغییر ساختاری ناشی از عکس واحدهای آزوینزن در منافذ MOF نسبت داده شد. ظرفیت جذب CO₂ می‌تواند با گرمایش حرارتی به ۱۳/۳٪ بیشتر از حالت اولیه برگردد که ناشی از افزایش محتوای ترانس و حذف حلال با گرم کردن است. علاوه بر این، چرخه دوم تابش پرتو فرابنفش ۴۶/۲٪ کاهش ظرفیت CO₂ را به دست آورد (۶۳).

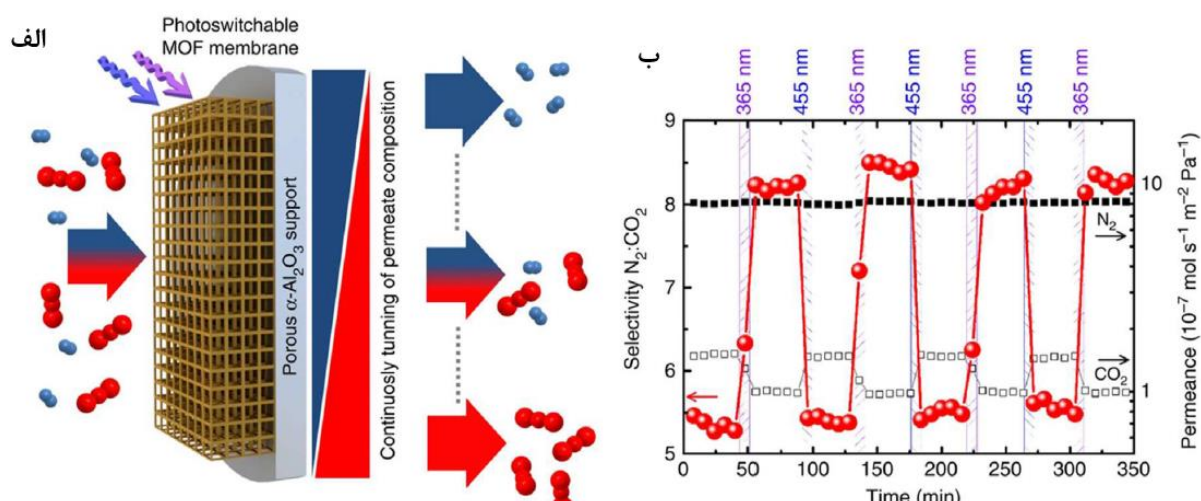
جداسازی غشایی قابل تعویض با گزینش‌پذیری مولکولی قابل تنظیم و کنترل از راه دور توسط یک غشای MOF در مخلوط N₂:CO₂ در شکل ۵ نشان داده شده است. نفوذ N₂ و CO₂ به ترتیب به صورت مربع‌های جامد سیاه و مربع‌های باز سیاه با مقیاس لگاریتمی در سمت راست نشان داده شده است (۵۸). به طور کلی، ظرفیت جذب CO₂ جاذب جامد وابسته به فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی بین نانوحفره‌ها یا مکان‌های فعال جهت جذب مولکول‌های

¹ Zhou



شکل ۴: ایزومری شدن ترانس به سیس پیوند PCN-123 (PCN نشان‌دهنده شبکه‌های هم‌آرایی متخلخل) ناشی از تابش UV و ایزومری شدن سیس به ترانس ناشی از عملیات حرارتی. طرح‌واره که جذب CO₂ پیشنهادی را در MOF-5، PCN-123 trans و PCN-123 cis نشان می‌دهد (۶۳).

Figure 4: Trans-to-cis isomerization of the ligand of PCN-123 (PCN represents porous coordination networks) induced by UV irradiation and the cis-to-trans isomerization induced by heat treatment. Schematic illustration showing the suggested CO₂ uptake in MOF-5, PCN-123 trans, and PCN-123 cis (63).



شکل ۵: الف) جداسازی غشایی قابل تعویض. تصویر از گزینش‌پذیری مولکولی قابل تنظیم و کنترل از راه دور توسط یک غشای MOF پاسخگو به نور، ب) جداسازی مخلوط CO₂: N₂ نفوذ N₂ و CO₂ به ترتیب به صورت مربع‌های جامد سیاه و مربع‌های باز سیاه با مقیاس لگاریتمی در سمت راست نشان داده شده است (۶۳).

Figure 5: a) Switchable membrane separation. Schematic illustration of tunable, remote-controllable molecular selectivity by a photoswitchable MOF membrane, b) The separation of N₂:CO₂ mixtures. The permeances of N₂ and CO₂ are shown as black solid squares and black open squares, respectively, with the logarithmic scale on the right-hand side (58).

این‌ها شامل پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های π - π برهم‌کنش‌های آب‌گریز و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و همچنین کمپلکس شدن هستند (۵۳، ۵۲).
برخی از محققان از MOF‌های واکنش‌دهنده مغناطیسی برای جداسازی فلزات سنگین از محیط‌های آلوده و رنگی استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، راغب^۱ و همکارانش (۶۷)، یک جاذب را با تثبیت تری‌پتیدگلوتاتیون بر روی سطح یک MOF مغناطیسی (Fe₃O₄)،

این‌ها شامل پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های π - π برهم‌کنش‌های آب‌گریز و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و همچنین کمپلکس شدن هستند (۵۳، ۵۲).

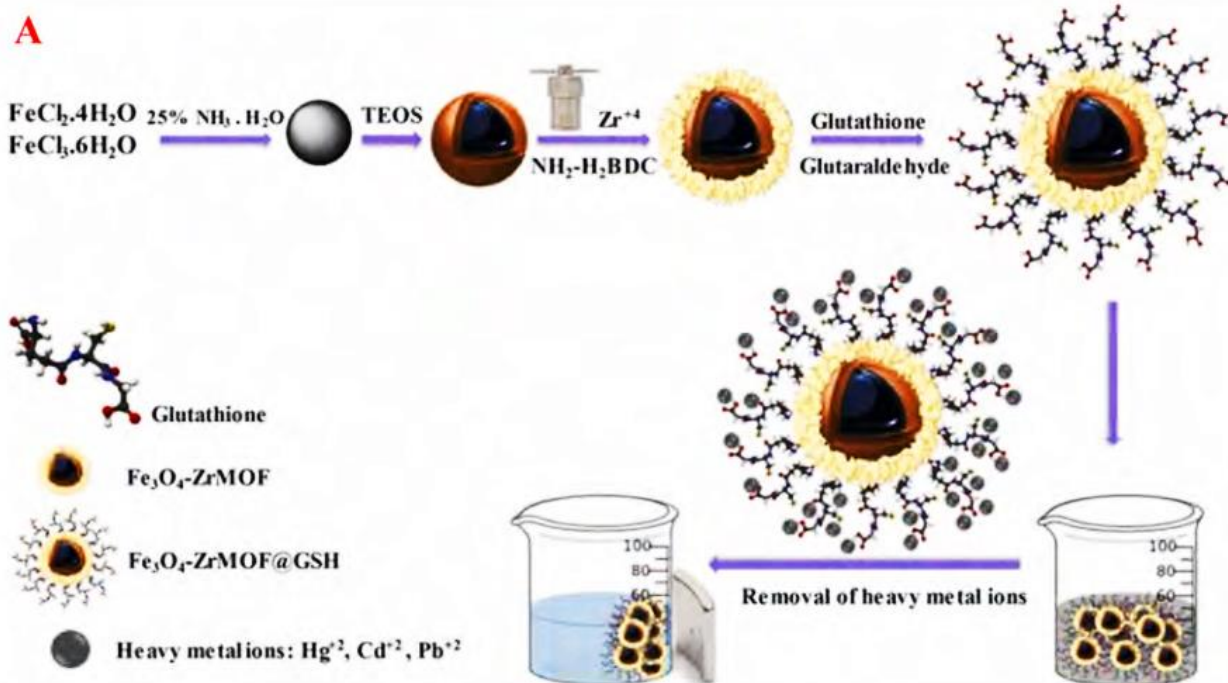
برخی از محققان از MOF‌های واکنش‌دهنده مغناطیسی برای جداسازی فلزات سنگین از محیط‌های آلوده و رنگی استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، راغب^۱ و همکارانش (۶۷)، یک جاذب را با تثبیت تری‌پتیدگلوتاتیون بر روی سطح یک MOF مغناطیسی (Fe₃O₄)،

انباشته π - π ، پیوند هیدروژنی، چنگالش^۳ و برهم‌کنش آب‌گریز بود. حضور گروه‌های NH_2^- تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین PPCPs و جاذب DES-MUiO-66- NH_2 را تسهیل کرد. از سوی دیگر، مراکز فلزی باردار، جاذب PPCPs را از طریق کی‌لیت‌شدن و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک تسهیل کردند. DES-MUiO-66- NH_2 غنی‌شده را می‌توان به راحتی از نمونه انبوه از طریق اعمال میدان مغناطیسی خارجی بازیابی کرد. باین حال، استفاده از دمای بالا در طول سنتز آن، سازگاری با محیط زیست آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۴۴). این MOF ها را می‌توان با استفاده از آهنربا از محلول آبی یا خاک مخلوط جدا و بازیابی کرد و همچنین دارای انتخاب پذیری بالا، پراکندگی خوب و استفاده مجدد چندانگانه است و مطابق با مفهوم سبز است (۶۸). همچنین دارای ظرفیت زیاد، هزینه کم، حذف سریع و جداسازی آسان فاز جامد هستند (۶۹). استفاده از اتصال‌دهنده‌های کوتاه امکان اتصال مغناطیسی بزرگ بین مراکز فلزی را فراهم می‌کند، اما امکان تخلخل را محدود می‌کند، در حالی که ترکیب با سایر واحدهای بزرگ‌تر که تخلخل ایجاد می‌کنند، ابعاد چارچوب را (از نظر مغناطیسی) کاهش می‌دهد، در نتیجه مقادیر دمای بحرانی پائینی دارد اما بیشترین محدودیت در پایداری آن‌ها است.

¹ Ragheb² Wei³ Chelation

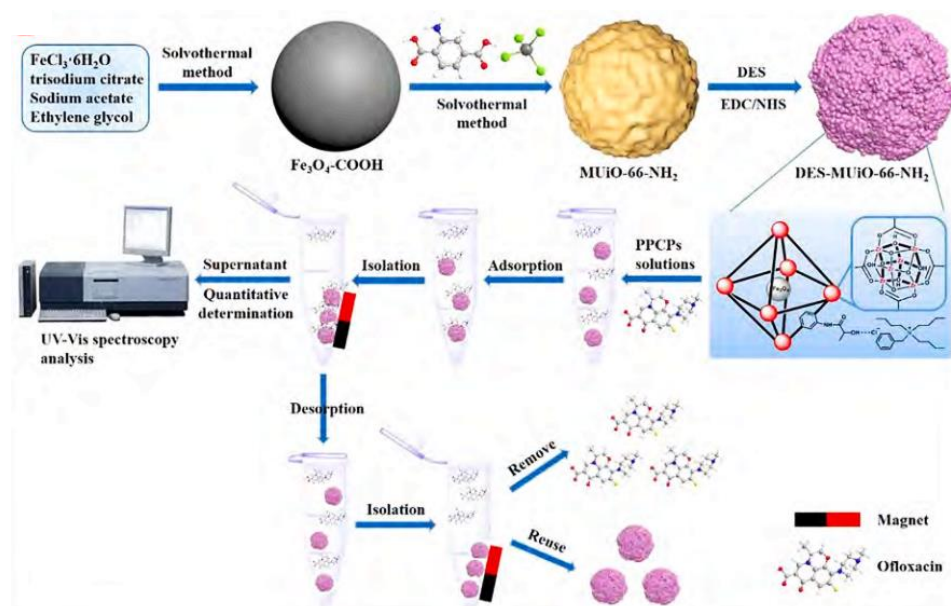
397 g^{-1} بود. ایزوترم و سینتیک جذب برای جذب این یون‌های فلزات سنگین در $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrMOF@GSH}$ به ترتیب با مدل لانگمویر و سینتیک شبه مرتبه دوم به خوبی توصیف شد. بازیابی استخراج برای این یون‌های فلزات سنگین نیز نسبتاً بالا بود و آن‌ها از ۹۵٪ تا ۹۸٪ متغیر بودند. جاذب $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrMOF@GSH}$ قابل بازیافت بود که با جذب بیش از ۸۰ درصد از فلزات سنگین پس از ۱۰ چرخه بازسازی مشهود است. بازیابی جاذب $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrMOF@GSH}$ با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی تسهیل شد. ظرفیت جذب بالای به دست آمده پس از ۱۰ چرخه جذب/واحد، نشان‌دهنده پتانسیل بزرگ بازیافت جاذب $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrMOF@GSH}$ بود (۶۷).

در مطالعه دیگری، وی^۲ و همکارانش (۴۴)، یک نانوکامپوزیت چارچوب فلزی آلی مبتنی بر حلال فرا زودگذار (DES) پاسخگوی مغناطیسی (DES-MUiO-66- NH_2) را سنتز کرد و با موفقیت از آن به عنوان جاذب برای داروها و محصولات مراقبت شخصی (PPCPs) استفاده کرد (شکل ۷). جذب و سینتیک را می‌توان با استفاده از مدل ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیک شبه مرتبه دوم به خوبی توصیف کرد. آن‌ها از دو PPCP، یعنی افلوکساسین و مفنمیک اسید، به عنوان آنالیت مدل استفاده کردند. تحت شرایط بهینه، آن‌ها ظرفیت جذب نسبتاً بالایی به ترتیب 97.60 mg g^{-1} و 22.79 mg g^{-1} برای افلوکساسین و مفنمیک اسید به دست آوردند. نتایج تجربی نشان داد که جاذب PPCP ها از طریق برهم‌کنش الکترواستاتیکی



شکل ۶: سنتز $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrMOF@GSH}$ و کاربرد آن در جذب فلزات سنگین از نمونه‌های آب های رنگی (۶۷).

Figure 6: Synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrMOF@GSH}$ and its application during adsorption of heavy metals from colored water samples (67).



شکل ۷: ساخت جاذب‌های DES-MUio-66-NH₂ و کاربرد آن‌ها در PPCP های جذب انتخابی (۴۴).

Figure 7: Fabrication of DES-MUio-66-NH₂ adsorbents and their application in selective adsorption PPCPs (44).

استفاده از MOF های هوشمند پاسخگو به محرک‌ها حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی با چالش‌های زیادی همراه است. به‌عنوان مثال، برخی از MOF های هوشمند پاسخگو به محرک‌ها فاقد ثبات در آب هستند و نمی‌توانند شرایط شیمیایی سخت ایجادشده توسط حضور آلاینده‌ها در محیط را تحمل کنند. فعل‌وانفعالات بین فلزات و پیوندهای آلی در MOFs به‌طور کلی ضعیف است. در نتیجه، برخی از MOF های پاسخگو به محرک‌ها می‌توانند هنگام قرار گرفتن در معرض رطوبت، آب زیادی را جذب کنند و این باعث فروپاشی ساختار آن‌ها می‌شود که منجر به کاهش قابل توجهی در ظرفیت جذب آن‌ها می‌شود. پایداری یک MOF را می‌توان با استفاده از مراکز فلزی با حالت‌های اکسیداسیون بالاتر در طول ساخت آن افزایش داد؛ بنابراین، تلاش‌های تحقیقاتی باید به سمت توسعه MOF های پایدارتر از طریق ادغام فلزات با حالت اکسیداسیون بالاتر در ساختار آن‌ها هدایت شود. چالش دیگر این است که ساخت MOF های پاسخگو به محرک‌ها اغلب شامل استفاده از روش‌های مصنوعی پیچیده است که گاهی اوقات شامل استفاده از حلال‌های آلی می‌شود. چنین رویه‌های پیچیده‌ای مانع تجاری‌سازی MOF های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی می‌شوند، زیرا این امر منجر به هزینه‌های تولید بالاتر می‌شود. استفاده از حلال‌های آلی در طول سنتز MOF های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها باعث می‌شود که از نظر محیطی جذابیت کمتری به عنوان جاذب داشته باشند. علاوه بر این، پیوندهای آلی مورد استفاده در طول سنتز MOF های هوشمند پاسخگو به محرک اغلب گران هستند.

در نهایت، استفاده از پیوندهای فلزی راحت‌ترین روش برای تهیه MOF های مغناطیسی با دمای بحرانی بالا به نظر می‌رسد، اگرچه تعداد محدودی از پیوندهای فلزی قادر به ترویج تبادل مغناطیسی وجود دارد (۷۰).

۳- نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت MOF هوشمند پاسخگو به محرک‌ها، جاذب‌های همه‌کاره‌ای برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی هستند. این ترکیبات جدید با موفقیت توسط پژوهشگران برای جذب آلاینده‌های مواد رنگزا و محیطی و همچنین در سامانه‌های غشایی به کار گرفته شده‌اند. نانوکامپوزیت‌های هوشمند MOF دارای خواص فیزیکی و شیمیایی قابل تنظیم هستند که در واکنش به محرک‌هایی مانند دما، نور و میدان‌های مغناطیسی برای تصفیه محیط‌زیست به شیوه‌ای کنترل شده تغییر می‌کنند. استفاده از آن‌ها در طول مطالعات جذب با ظرفیت‌های جذب بالا مشخص شده است و این را می‌توان به ماهیت بسیار متخلخل MOF های موجود در نانوکامپوزیت‌ها نسبت داد. همچنین تشکیل سامانه‌های غشایی هوشمند با اندازه منافذ قابل تنظیم توسط محرک را فعال کرده‌اند. وجود قسمت‌های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها در نانوکامپوزیت‌های MOF همچنین سبزی جاذب‌ها را از طریق ایجاد دفع بدون حلال افزایش می‌دهد؛ بنابراین، استفاده از حلال‌های آلی زمانی به حداقل می‌رسد که MOF های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها به عنوان جاذب برای تصفیه محیط‌زیست استفاده شوند. این ویژگی‌های جاذب MOF های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها، علایق بسیاری از محققین را برای تصفیه محیط‌زیست جلب کرد.

راه‌های مناسب و ایمن‌تر برای دفع MOF‌های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها پس از استفاده انجام دهند. این امر به جلوگیری از تخلیه پلیمرهای پاسخگو به محرک در محیط کمک زیادی می‌کند. به علاوه، بیشتر محدودیت‌های مجاز MOF‌های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها در محیط، در مقالات وجود ندارد. این یکی دیگر از شکاف‌های تحقیقاتی است که باید توسط محققان برای مطالعات آتی بررسی شود. مقدار MOF‌های پاسخگو به محرک‌های مورد استفاده برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی را می‌توان با بهبود گزینش پذیری آن‌ها افزایش داد. یکی از راه‌های بهبود گزینش پذیری MOF‌های پاسخ‌دهنده به محرک، از طریق ادغام پلیمرهای حک شده مولکولی در ساختار آن‌ها است. این منجر به تشکیل MOF‌های هوشمند پاسخگو به محرک‌ها با حفره‌های شناسایی خاص برای آلاینده‌های خاص در محیط می‌شود و در نتیجه انتخاب پذیری را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، محققان باید در تلاش‌های آینده‌شان، استفاده از MOF‌های حک شده مولکولی پاسخ‌دهنده به محرک‌ها را برای حذف آلاینده‌های مواد رنگزا و زیست‌محیطی بررسی کنند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت پژوهشگاه رنگ تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سنتز نانوکامپوزیت‌های MOF هوشمند پاسخگو به محرک‌ها شامل استفاده از پیوندهای آلی، یون‌ها یا خوشه‌های فلزات واسطه و مواد فعال محرک است. پیوندهای آلی که در طول ساخت آن‌ها استفاده می‌شود، معمولاً از صنایع پتروشیمی مشتق می‌شوند. این پیوندهای آلی غیرقابل تجزیه زیستی و معمولاً برای محیط‌زیست سمی هستند؛ بنابراین، تلاش‌های تحقیقاتی باید به سمت ساخت MOF‌های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها با استفاده از پیوندهای جایگزین مانند مولکول‌های زیستی مانند پلی‌ساکاریدها هدایت شود. ادغام مولکول‌های زیستی در ساختارهای MOF‌های پاسخ‌دهنده به محرک‌ها، به آن‌ها قابلیت تجزیه زیستی و همچنین بخش‌های عملکردی اضافی را می‌دهد که حذف جذبی آلاینده‌ها از محیط را تسهیل می‌کند. ساخت MOF‌های هوشمند پاسخگو به محرک معمولاً شامل استفاده از فلزات سنگین به عنوان مراکز هم‌آرایی است. وجود فلزات سنگین در ساختار آن‌ها باعث می‌شود که MOF‌های پاسخگو به محرک‌ها ردپای محیطی نسبتاً بزرگی داشته باشند زیرا بیشتر این فلزات برای موجودات زنده سمی هستند؛ بنابراین، انتخاب یون‌های فلزی در طول ساخت MOF‌های هوشمند پاسخگو به محرک باید با دقت انجام شود تا در صورت امکان از یون‌های سمی کمتری استفاده شود.

MOF‌های هوشمند پاسخگو به محرک‌ها را می‌توان به راحتی از نمونه‌های محیطی با تغییر شرایط محرک‌ها بازیابی کرد. با این حال، برخی به ناچار به محیط‌زیست راه پیدا می‌کنند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برخی از MOF‌های پاسخگو به محرک برای محیط‌زیست سمی هستند؛ بنابراین، محققان باید تلاش‌های دیوانه‌واری برای ایجاد

۴- مراجع

- Peng XX, Gai S, Cheng K, Yang F. Roles of humic substances redox activity on environmental remediation. J Hazard Mater. 2022;435:129070. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129070>.
- Qu J, Shi J, Wang Y, Tong H, Zhu Y, Xu L, et al. Applications of functionalized magnetic biochar in environmental remediation: A review. J Hazard Mater. 2022;434:128841. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128841>.
- Tang F, Yu H, Yassin Hussain Abdalkarim S, Sun J, Fan X, Li Y, et al. Green acid-free hydrolysis of wasted pomelo peel to produce carboxylated cellulose nanofibers with super absorption/flocculation ability for environmental remediation materials. Chem Eng J. 2020;395:125070. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125070>.
- Xu H, Jia Y, Sun Z, Su J, Liu QS, Zhou Q, et al. Environmental pollution, a hidden culprit for health issues. Eco-Environment Heal. 2022;1(1):31-45. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.04.003>.
- Wang F, Wang R, He Z. The impact of environmental pollution and green finance on the high-quality development of energy based on spatial Dubin model. Resour Policy. 2021;74:102451. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102451>.
- Liu W, Xu Y, Fan D, Li Y, Shao XF, Zheng J. Alleviating corporate environmental pollution threats toward public health and safety: The role of smart city and artificial intelligence. Saf Sci. 2021;143:105433. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105433>.
- Jabbar KQ, Barzinjy AA, Hamad SM. Iron oxide nanoparticles: Preparation methods, functions, adsorption and coagulation/flocculation in wastewater treatment. Environ Nanotechnology, Monit Manag. 2022;17:100661. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100661>.
- Badawi AK, Zaher K. Hybrid treatment system for real textile wastewater remediation based on coagulation/flocculation, adsorption and filtration processes: Performance and economic evaluation. J Water Process Eng. 2021;40:101963. <https://doi.org/10.1016/>

- j.jwpe.2021.101963.
9. Kundu S, Karak N. Polymeric photocatalytic membrane: An emerging solution for environmental remediation. *Chem Eng J*. 2022;438:135575. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135575>.
 10. Liu Q, Luo Y, Shi J. Reagent elution combined with positive pressure filtration: A zero-discharge method for cyanide tailings remediation. *J Environ Sci*. 2022;113:376–84. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.06.028>
 11. Xiao H, Low ZX, Gore DB, Kumar R, Asadnia M, Zhong Z. Porous metal-organic framework-based filters: Synthesis methods and applications for environmental remediation. *Chem Eng J*. 2022;430:133160. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133160>
 12. Musarurwa H, Tavengwa NT. Application of carboxymethyl polysaccharides as bio-sorbents for the sequestration of heavy metals in aquatic environments. *Carbohydr Polym*. 2020;237:116142. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116142>
 13. Zhang N, Ishag A, Li Y, Wang H, Guo H, Mei P, et al. Recent investigations and progress in environmental remediation by using covalent organic framework-based adsorption method: A review. *J Clean Prod*. 2020; 277:123360. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123360>.
 14. Musarurwa H, Tavengwa NT. Sustainable extraction of pesticides in food and environmental samples using emerging green adsorbents. *Sustain Chem Pharm*. 2021;24: 100545. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100545>.
 15. Uriakhil MA, Sidnell T, De Castro Fernández A, Lee J, Ross I, Bussemaker M. Per- and poly-fluoroalkyl substance remediation from soil and sorbents: A review of adsorption behaviour and ultrasonic treatment. *Chemosphere*. 2021; 282:131025. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131025>.
 16. Qi X, Yin H, Zhu M, Yu X, Shao P, Dang Z. MgO-loaded nitrogen and phosphorus self-doped biochar: High-efficient adsorption of aquatic Cu^{2+} , Cd^{2+} , and Pb^{2+} and its remediation efficiency on heavy metal contaminated soil. *Chemosphere*. 2022;294:133733. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133733>.
 17. Navaie Diva T. Various Adsorbents for removal of rhodamine b dye: a review. *J Stud Color World*. 2023;12(4):387–404. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1401.12.4.6.7> [In Persian].
 18. Oladoye PO, Adegboyega SA, Giwa ARA. Remediation potentials of composite metal-organic frameworks (MOFs) for dyes as water contaminants: A comprehensive review of recent literatures. *Environ Nanotechnology, Monit Manag*. 2021;16:100568. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100568>.
 19. Pourebrahimi S, Pirooz M. Functionalized covalent triazine frameworks as promising platforms for environmental remediation: A review. *Clean Chem Eng*. 2022;2:100012. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100012>
 20. Rai PK. Novel adsorbents in remediation of hazardous environmental pollutants: Progress, selectivity, and sustainability prospects. *Clean Mater*. 2022;3:100054. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100054>
 21. He Y, Wang Y, Shi J, Lu X, Liu Q, Liu Y, et al. Incorporating metal-organic frameworks into substrates for environmental applications. *Chem Eng J*. 2022;446:136866. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136866>.
 22. Qi X, Tong X, Pan W, Zeng Q, You S, Shen J. Recent advances in polysaccharide-based adsorbents for wastewater treatment. *J Clean Prod*. 2021;315:128221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128221>.
 23. Musarurwa H, Tavengwa NT. Application of polysaccharide-based metal organic framework membranes in separation science. *Carbohydr Polym*. 2022;275:118743. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118743>
 24. Jian N, Dai Y, Wang Y, Qi F, Li S, Wu Y. Preparation of polydopamine nanofibers mat as a recyclable and efficient adsorbent for simultaneous adsorption of multiple tetracyclines in water. *J Clean Prod*. 2021;320:128875. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128875>.
 25. Musarurwa H, Tawanda Tavengwa N. Extraction and electrochemical sensing of pesticides in food and environmental samples by use of polydopamine-based materials. *Chemosphere*. 2021;266:129222. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129222>.
 26. Orta M del M, Martín J, Santos JL, Aparicio I, Medina-Carrasco S, Alonso E. Biopolymer-clay nanocomposites as novel and ecofriendly adsorbents for environmental remediation. *Appl Clay Sci*. 2020;198:105838. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105838>.
 27. Musarurwa H, Chimuka L, Tavengwa NT. Metal organic framework-based magnetic solid phase extraction of pesticides in complex matrices. *Microchem J*. 2021;171:106907. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106907>.
 28. Najafi M, Abednatanzi S, Gohari Derakhshandeh P, Mollarasouli F, Bahrani S, Behbahani ES, et al. Metal-organic and covalent organic frameworks for the remediation of aqueous dye solutions: Adsorptive, catalytic and extractive processes. *Coord Chem Rev*. 2022;454:214332. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214332>
 29. Sadiq AC, Olasupo A, Rahim NY, Ngah WSW, Suah FBM. Comparative removal of malachite green dye from aqueous solution using deep eutectic solvents modified magnetic chitosan nanoparticles and modified protonated chitosan beads. *J Environ Chem Eng*. 2021;9(5):106281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106281>
 30. Heydari M, Gharagozlou M, Ghahari M. An Overview of the Types of Edible Metal Organic Framework (MOF) Nanostructures as Biocompatible and Efficient Dye Adsorbent. *J Stud Color World*. 2020;9(4):29–41. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1398.9.4.5.5> [In Persian].
 31. Daglar H, Altintas C, Erucar I, Heidari G, Zare EN, Moradi O, et al. Metal-organic framework-based materials for the abatement of air pollution and decontamination of wastewater. *Chemosphere*. 2022;303:135082. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135082>.
 32. Peng H, Xiong W, Yang Z, Xu Z, Cao J, Jia M, et al. Advanced MOFs@aerogel composites: Construction and application towards environmental remediation. *J Hazard Mater*. 2022;432:128684. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128684>
 33. Gorky F, Nambo A, Carreon ML. Cold plasma-Metal Organic Framework (MOF)-177 breathable system for atmospheric remediation. *J CO2 Util*. 2021;51:101642. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101642>.
 34. Bhuyan A, Ahmaruzzaman M. Metal-organic frameworks: A new generation potential material for aqueous environmental remediation. *Inorg Chem Commun*. 2022;140:109436. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109436>.
 35. Khan S, Guan Q, Liu Q, Qin Z, Rasheed B, Liang X, et al. Synthesis, modifications and applications of MILs Metal-organic frameworks for environmental remediation: The cutting-edge review. *Sci Total Environ*. 2022;810:152279.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152279>.
36. Zhu L, Meng L, Shi J, Li J, Zhang X, Feng M. Metal-organic frameworks/carbon-based materials for environmental remediation: A state-of-the-art mini-review. *J Environ Manage.* 2019;232:964–77. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.004>
 37. Liu X, Shan Y, Zhang S, Kong Q, Pang H. Application of metal organic framework in wastewater treatment. *Green Energy Environ.* 2023;8(3):698–721. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.03.005>.
 38. Hayashi K, Matsuyama T, Ida J. A simple magnetite nanoparticle immobilized thermoresponsive polymer synthesis for heavy metal ion recovery. *Powder Technol.* 2019;355:183–90. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.007>
 39. Shamim MA, Zia H, Zeeshan M, Khan MY, Shahid M. Metal organic frameworks (MOFs) as a cutting-edge tool for the selective detection and rapid removal of heavy metal ions from water: Recent progress. *J Environ Chem Eng.* 2022; 10(1):106991. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106991>.
 40. Ahmad Isiyaka H, Jumbri K, Soraya Sambudi N, Uba Zango Z, Ain Fathihah Binti Abdullah N, Saad B. Effective adsorption of metolachlor herbicide by MIL-53(Al) metal-organic framework: Optimization, validation and molecular docking simulation studies. *Environ Nanotechnology, Monit Manag.* 2022;18:100663. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100663>.
 41. Musarurwa H, Tavengwa NT. Stimuli-responsive polymers and their applications in separation science. *React Funct Polym.* 2022;175:105282. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105282>
 42. Xu XY, Chu C, Fu H, Du XD, Wang P, Zheng W, et al. Light-responsive UiO-66-NH₂/Ag₃PO₄ MOF-nanoparticle composites for the capture and release of sulfamethoxazole. *Chem Eng J.* 2018;350:436–44. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.005>
 43. Xia Z, Shi B, Zhu W, Lü C. Temperature-responsive polymer-tethered Zr-porphyrin MOFs encapsulated carbon dot nanohybrids with boosted visible-light photodegradation for organic contaminants in water. *Chem Eng J.* 2021;426:131794. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131794>.
 44. Wei X, Wang Y, Chen J, Xu F, Liu Z, He X, et al. Adsorption of pharmaceuticals and personal care products by deep eutectic solvents-regulated magnetic metal-organic framework adsorbents: Performance and mechanism. *Chem Eng J.* 2020;392:124808. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124808>.
 45. Zhang W, Sun P, Wang X, zhang X, ran L, Zhao Q, et al. Elevating the stability and adsorption performance of metal-organic frameworks by chitosan and attapulgite for capturing methylene blue in the water. *Mater Today Commun.* 2022;31:103601. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103601>.
 46. Xin Q, Cao X, Huang D, Li S, Zhang X, Xuan G, et al. Smart light-responsive hierarchical metal organic frameworks constructed mixed matrix membranes for efficient gas separation. *Green Chem Eng.* 2022;3(1):71–82. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.09.004>
 47. Mogale R, Akpomie KG, Conradie J, Langner EHG. Dye adsorption of aluminium- and zirconium-based metal organic frameworks with azobenzene dicarboxylate linkers. *J Environ Manage.* 2022;304:114166. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114166>
 48. Zhang S, Ou R, Ma H, Lu J, Banaszak Holl MM, Wang H. Thermally regenerable metal-organic framework with high monovalent metal ion selectivity. *Chem Eng J.* 2021;405:127037. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127037>
 49. Choe J, Yang X, Yu J, Jang K, Kim M, An K. Visible-light responsive PPynt@NH₂-MIL-125 nanocomposite for efficient reduction of Cr(VI). *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp.* 2022;636:128147. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128147>
 50. Prasetya N, Ladewig BP. An insight into the effect of azobenzene functionalities studied in UiO-66 frameworks for low energy CO₂ capture and CO₂/N₂ membrane separation. *J Mater Chem A.* 2019;7(25):15164–72. <https://doi.org/10.1039/C9TA02096A>
 51. Allegretto JA, Giussi JM, Moya SE, Azzaroni O, Rafti M. Synthesis and characterization of thermoresponsive ZIF-8@PNIPAm-co-MAA microgel composites with enhanced performance as an adsorption/release platform. *RSC Adv.* 2020;10(5):2453–61. <https://doi.org/10.1039/C9RA09729E>.
 52. Li Z, Liu Q, Lu X, Deng C, Sun N, Yang X. Magnetic metal-organic framework nanocomposites for enrichment and direct detection of environmental pollutants by negative-ion matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Talanta.* 2019;194:329–35. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.10.058>
 53. Huo J bo, Yu G, Wang J. Magnetic zeolitic imidazolate frameworks composite as an efficient adsorbent for arsenic removal from aqueous solution. *J Hazard Mater.* 2021;412:125298. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125298>
 54. Lian L, Zhang X, Hao J, Lv J, Wang X, Zhu B, et al. Magnetic solid-phase extraction of fluoroquinolones from water samples using titanium-based metal-organic framework functionalized magnetic microspheres. *J Chromatogr A.* 2018;1579:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.10.019>
 55. Tran NT, Trung LG, Nguyen MK. The degradation of organic dye contaminants in wastewater and solution from highly visible light responsive ZIF-67 monodisperse photocatalyst. *J Solid State Chem.* 2021;300:122287. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122287>
 56. Zhang X, Yuan N, Li Y, Han L, Wang Q. Fabrication of new MIL-53(Fe)@TiO₂ visible-light responsive adsorptive photocatalysts for efficient elimination of tetracycline. *Chem Eng J.* 2022;428:131077. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131077>
 57. Rajput K, Sareen S, Saini S, Kumar N, Sharma V, Mehta SK, et al. Metal organic frameworks as versatile platforms for wastewater remediation. *Mater Today Proc.* 2022;57:846–50. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.457>.
 58. Yu H, Wang Z, Wu R, Chen X, Chan TWD. Water-dispersible pH/thermo dual-responsive microporous polymeric microspheres as adsorbent for dispersive solid-phase extraction of fluoroquinolones from environmental water samples and food samples. *J Chromatogr A.* 2019;1601:27–34. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.05.004>.
 59. Musarurwa H, Tavengwa NT. Thermo-responsive polymers and advances in their applications in separation science. *Microchem J.* 2022;179:107554. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107554>
 60. Hosseini Naeini A, Kalae M, Moradi O, Mahmoodi N. Investigating Factors Affecting the Removal of dyestuff from Wastewater Using Different Nanocomposites: A Review Study. *J Stud Color World.* 2023;12(4):343–368. [In Persian].

- <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1401.12.4.4.5>
61. Prasetya N, Ladewig BP. Dynamic photo-switching in light-responsive JUC-62 for CO₂ capture. *Sci Rep*. 2017;7(1):13355. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13536-4>.
 62. Hadavi Moghadam B, Hasanzadeh M. Enhancing Photocatalytic Activity by Piezoelectric Effect in Dye Removal from Wastewater. *J Stud Color World*. 2022;12(2):117–131. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1401.12.2.2.9> [In Persian].
 63. Park J, Yuan D, Pham KT, Li JR, Yakovenko A, Zhou HC. Reversible Alteration of CO₂ Adsorption upon Photochemical or Thermal Treatment in a Metal–Organic Framework. *J Am Chem Soc*. 2012;134(1):99–102. <https://doi.org/10.1021/ja209197f>.
 64. Khan MM, Rahman A, Matussin SN. Recent Progress of Metal-Organic Frameworks and Metal-Organic Frameworks-Based Heterostructures as Photocatalysts. *Nanomater* (Basel, Switzerland). 2022;12(16). <https://doi.org/10.3390/nano12162820>
 65. Zheng HQ, Zhang L, Cui Y, Qian G. Dynamically responsive photonic metal–organic frameworks. *Adv Photonics*. 2023;5(05):3–4. <https://doi.org/10.1117/1.ap.5.5.054001>
 66. Scandura G, Eid S, Alnajjar AA, Paul T, Karanikolos GN, Shetty D, et al. Photo-responsive metal-organic frameworks - design strategies and emerging applications in photocatalysis and adsorption. *Mater Adv*. 2023;4(5):1258–85. <https://doi.org/10.1039/d2ma01022d>.
 67. Ragheb E, Shamsipur M, Jalali F, Mousavi F. Modified magnetic-metal organic framework as a green and efficient adsorbent for removal of heavy metals. *J Environ Chem Eng*. 2022;10(2):107297. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107297>.
 68. Zhao G, Qin N, Pan A, Wu X, Peng C, Ke F, et al. Magnetic Nanoparticles@Metal-Organic Framework Composites as Sustainable Environment Adsorbents. *Fratoddi I, editor. J Nanomater*. 2019;2019:1454358. <https://doi.org/10.1155/2019/1454358>.
 69. Zhao X, Liu S, Tang Z, Niu H, Cai Y, Meng W, et al. Synthesis of magnetic metal-organic framework (MOF) for efficient removal of organic dyes from water. *Sci Rep*. 2015;5(1):11849. <https://doi.org/10.1038/srep11849>.
 70. Mínguez Espallargas G, Coronado E. Magnetic functionalities in MOFs: From the framework to the pore. *Chem Soc Rev*. 2018;47(2):533–57. <https://doi.org/10.1039/c7cs00653e>

How to cite this article:

Gharagozlou M, sadegh A M. Smart nanocomposites of metal-organic framework (mof) and their applications in removing dye and environmental pollutants, *Stud color world*. 2024;14(3):87-101. <https://doi.org/10.30509/JSCW.2023.81974> [In Persian].