

کاربرد مکسین (MXene) و کامپوزیت‌های مبتنی بر آن در حذف آلاینده‌های رنگی، فلزات سنگین و رادیو نوکلئیدها از پساب‌های صنعتی و هسته‌ای

میلاذ عتیقی^۱، مهدی حسن‌زاده^{۲*}

۱- کارشناسی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵.

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت زمین و گسترش صنایع مختلف، نگرانی‌ها و چالش‌هایی در حوزه آب و محیط‌زیست بوجود آمده است. بخش بزرگی از آلودگی آب‌ها توسط پساب‌ها و فاضلاب‌های صنایع گوناگون ایجاد می‌شود که این آلاینده‌ها شامل مواد رنگزا، فلزات سنگین، رادیونوکلئیدها و غیره هستند. مکسین‌ها (MXene) نانومواد دوبعدی نوظهوری هستند که اغلب از خانواده کاربیدها یا نیتراهای فلزات واسطه با فرمول عمومی $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1-3$) شناخته می‌شوند. سطح تماس بالای این نانومواد باعث بالا رفتن بازده جذب و حذف ترکیبات آلاینده شده‌است. همچنین مکسین‌ها به دلیل وجود گروه‌های مختلف بر روی سطح با انجام واکنش باعث حذف و جذب مواد رنگزا و فلزات سنگین می‌شوند. در برخی موارد نیز به کمک تابش پرتو فرابنفش، افزایش بازده و تجزیه کاتالیزور نوری مشاهده شده است. برخی از این مواد با جذب الکترواستاتیکی باعث حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شوند. یون‌های فلزات سنگین می‌توانند در فاصله بین لایه‌های نازک صفحات مکسین محبوس شوند. یک ویژگی بسیار خوب این مواد قابلیت بازیابی آنها است که اغلب برای چندین دوره مصرف قابل بازیابی و مصرف هستند. استفاده از مکسین‌ها به دلیل آب‌دوست بودن، سطح ویژه زیاد و همچنین خصوصیات مکانیکی و الکتریکی بسیار عالی، جهت استفاده در غشاهای تصفیه آب بسیار امیدوارکننده هستند. در این مطالعه سعی شده است ضمن معرفی این ترکیبات، کاربرد آنها در زمینه حذف مواد رنگزا، فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها مورد بررسی قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1400.11.4.2.6

واژه‌های کلیدی:

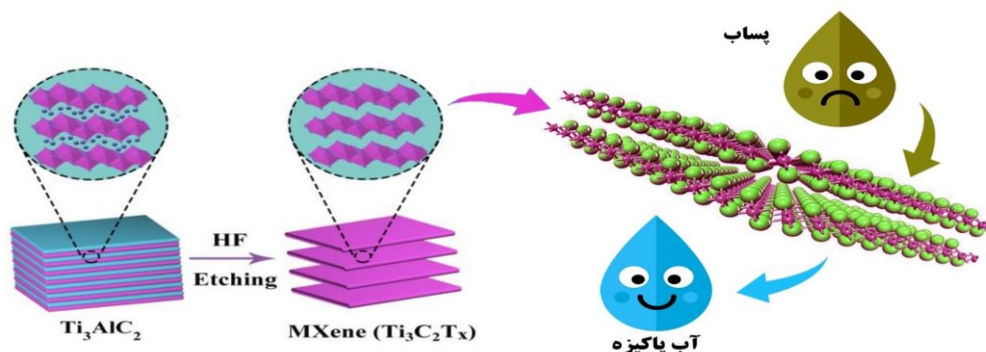
مکسین

جاذب

تصفیه پساب

ماده رنگزا

فلزات سنگین



*Corresponding author: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

Application of MXene and Its Composites in the Removal of Dyes, Heavy metals and Radionuclides Pollutant From Industrial and Nuclear Wastewater

Milad Atighi, Mahdi Hasanzadeh*

Department of Textile Engineering, Yazd University, P. O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21-11-2021

Accepted: 18-01-2022

Available online: 06-04-2022

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR:

Keywords:

MXene

Adsorbent

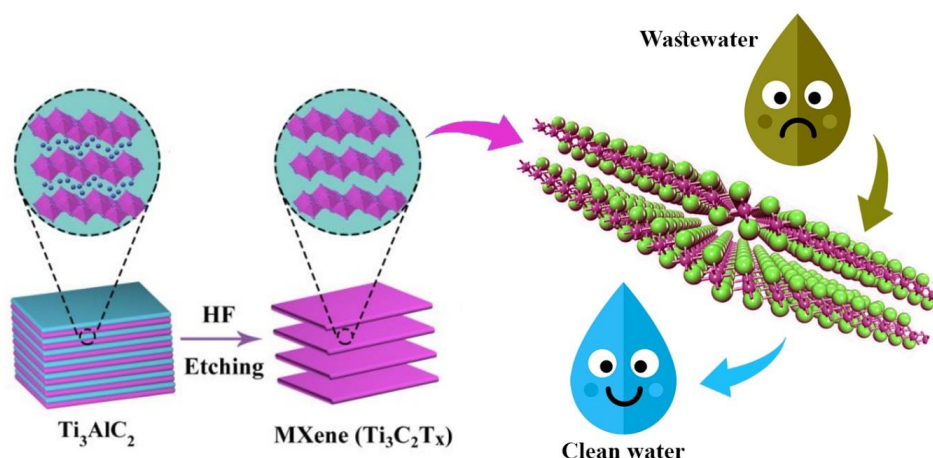
Wastewater treatment

Dye

Heavy metals.

ABSTRACT

Since the population has increased and various industries have developed in recent years, concerns and challenges related to water and the environment have been raised. A large part of water pollution is caused by effluents and sewage of various industries, including dyes, heavy metals, radionuclides, etc. MXenes are emerging two-dimensional nanomaterials, often known from the family of carbides or nitrides of intermediates with the general formula $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1-3$). The high surface area of these nanomaterials has increased the adsorption efficiency and removal of contaminants. Also, MXenes remove and absorb dyes and heavy metals due to different functional groups on the surface. In some cases, with the help of ultraviolet radiation, increased efficiency and photocatalytic degradation have been observed. Some of these materials remove environmental pollutants by electrostatic absorption. Heavy metal ions can be trapped in the space between the thin layers of MXene plates. The reusability of these materials is often a perfect feature, as they can often be recovered and used for several cycles. MXenes are promising for water treatment membranes due to their hydrophilicity, high specific surface area, and excellent mechanical and electrical properties. In this study, these materials are first introduced. Then the application of removing dyes, heavy metals, and radionuclides was investigated.



*Corresponding author: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir



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

۱- مقدمه

آب به‌عنوان یکی از ضروریات حیات، یک منبع مستعد و محدود می‌باشد که دارای آسیب‌پذیری کیفی و محدودیت‌های کمی است. پیش‌بینی می‌شود که ۶۰ درصد از کل جمعیت جهان تا سال ۲۰۲۵ با مشکل کمبود آب مواجه شوند [۱]. آلودگی آب تأثیر نامطلوبی بر محیط‌زیست دارد و همچنین می‌تواند منجر به آلودگی هوا و ایجاد مشکلات بسیار زیادی در سلامت انسان شود. آلودگی آب همچنین تأثیر نامطلوبی بر رشد اقتصادی و چشم‌اندازهای اجتماعی جوامع و کشورها دارد. بنابراین یکی از گزارش‌های سازمان ملل، موجودیت آب‌خالص و شیرین یک مسئله جهانی است و در قرن ۲۱ برای کل جهان به یک چالش تبدیل شده است. زیرا بقای موجودات زنده با آب آلوده ایمن نیست [۲، ۳]. میلیون‌ها تن فلزات سنگین، لجن سمی، حلال‌ها و سایر مواد زائد آلی هر ساله توسط گیاهان در سراسر جهان در محیط اطراف آنها رسوب می‌کنند. آب یکی از مهمترین مواد اولیه مورد استفاده در صنایع نساجی، غذایی، کاغذ و داروسازی است. پساب این صنایع معمولاً حاوی بقایای مواد رنگزا است که به راحتی توسط موجودات ذره‌بینی قابل تجزیه نیستند. پساب حاوی این بقایای مواد رنگزا تأثیرات منفی بر روی محیط‌زیست ایجاد می‌کند.

بطور کلی ماده رنگزا مانع نفوذ نور در آب می‌شود که به نوبه خود بر روند فتوسنتز در سیستم آب تأثیر می‌گذارد. تعداد زیادی از منابع مانند مواد شیمیایی، سوخت و آب در فرآیندهای تولید منسوجات مصرف می‌شوند (تقریباً به ازای ۱ کیلوگرم منسوج ۲۰۰ لیتر آب مصرف می‌شود) و مقدار زیادی پسماند و پساب را تولید می‌کنند. برای مثال در صنعت نساجی مواد رنگزا راکتیو می‌توانند از سیستم‌های تصفیه رایج و معمولی عبور کنند، بدون اینکه تغییر زیادی در مقدار آنها ایجاد کنند. بنابراین حذف این دسته از مواد رنگزا مشکل است. تخمین زده می‌شود که هر ساله حدود ۲۸۰۰۰۰ تن مواد رنگزای نساجی در پساب‌های صنعت نساجی در سراسر جهان تخلیه می‌شود. مقدار اکسیژن محلول توسط لایه نازکی از مواد رنگزا که در سطح آب (پساب) وجود دارد کاهش یافته و بر روی جانوران آبی تأثیر می‌گذارد. جدا از تأثیر رنگ آنها، جذب مواد رنگزا برای سلامت انسان نیز مضر است. محصولات تجزیه ماده رنگزا از طریق دستگاه گوارش بر هموگلوبین، پوست، ریه و تشکیل خون تأثیر می‌گذارد. با توجه به ماهیت مصنوعی و معطر، مواد رنگزا مصنوعی غیرقابل تجزیه و سرطان‌زا هستند و ممکن است منجر به درماتیت، حساسیت و تحریک پوست شوند. از اینرو، تصفیه فاضلاب و پساب قبل از تخلیه در محیط‌زیست از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۴، ۵].

روش‌های تصفیه پساب صنعتی دارای تنوع بالایی است. به طوری که هر یک از این روش‌ها با توجه به نوع مواد آلاینده موجود در فاضلاب طراحی شده و دارای ویژگی‌های خاصی هستند. در تعیین

مناسب‌ترین روش لازم است به چند عامل مهم توجه شود که برخی از آنها عبارتند از: مقدار چربی و ذرات کلوئیدی موجود در پساب، مقدار یون‌های سمی از قبیل روی، نیکل، کادمیم، و میزان بزرگی آنها، درجه تجدیدناپذیری پساب صنعتی، عواملی نظیر BOD، COD، TSS و pH، نوع مواد آلی و غیر آلی موجود در پساب، کیفیت مورد نیاز برای پساب خروجی به منظور استفاده مجدد در صنایع مختلف یا ورود به طبیعت و مقدار پساب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها. فرآیندهای مختلف تصفیه سنتی و پیشرفته در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و کارخانجات برای تصفیه آلاینده‌های معمولی استفاده شده است. از جمله این فرآیندها می‌توان به انعقاد، لخته‌سازی، رسوب‌گذاری، صاف‌کردن، کلرزنی، ازن‌زنی، جذب، غشایی و فراصوت اشاره کرد. در بین این روش‌ها، فرآیندهای غشایی و جذب به طور گسترده‌ای در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۶-۸]. این روش‌ها نیز در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی و انرژی در چند دهه گذشته به یک فناوری امیدوارکننده تبدیل شده است. جداسازی و تصفیه غشا به طور گسترده در صنایع شیمیایی، دارویی و آب مورد استفاده قرار گرفته و طیف وسیعی از ویژگی‌های مناسب نظیر کاهش اثر کربن، قابلیت اطمینان بالا، عملکرد ساده و کاهش آلودگی‌های بعدی را شامل می‌شود. با این حال فرآیندهای تصفیه به کمک غشاها به دلیل سعی و خطا بین شار یا فلاکس و گزینش‌پذیری غشا محدود شده‌اند. برای حل این مشکل، چندین مطالعه بر روی ساخت غشاهای جدید با نانومواد مختلف مانند نانولوله‌های کربنی، اکسید گرافن، کربن فعال، ژئولیت‌ها و چارچوب‌های آلی-فلزی صورت گرفته است [۹-۱۲].

در سال‌های اخیر، دسته جدیدی از نانومواد دوبعدی از خانواده کاربیدها یا نیترات‌های فلزات انتقالی، با عنوان مکسین^۱، مورد توجه بسیاری از محققان و دانشمندان قرار گرفته است. از جمله ویژگی‌های مکسین‌ها می‌توان به سازگار بودن با محیط‌زیست، سطح مخصوص بالا، پایداری شیمیایی بالا، رسانایی گرمایی و الکتریکی و آب‌دوست بودن اشاره کرد. با توجه به این ویژگی‌ها، مکسین‌ها می‌توانند به عنوان گزینه مناسب در کاربردهای مختلف از جمله در تصفیه پساب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرند [۱۳]. هدف اصلی این مقاله، ارزیابی یافته‌های فعلی در مورد کاربرد مکسین‌ها در حذف مواد رنگزا، فلزات سنگین و رادیونوکلوئیدها و تأثیر استفاده از این ترکیبات برای کاربردهای زیست‌محیطی و صنعتی می‌باشد. در ادامه نیز به بیان سازوکارهای جذب و واکنش بین مکسین‌ها و آلاینده‌های مختلف و همچنین پیش‌بینی آینده تحقیقات در این حوزه با شناسایی چالش‌ها و مشکلات موجود پرداخته شده است.

^۱ MXene

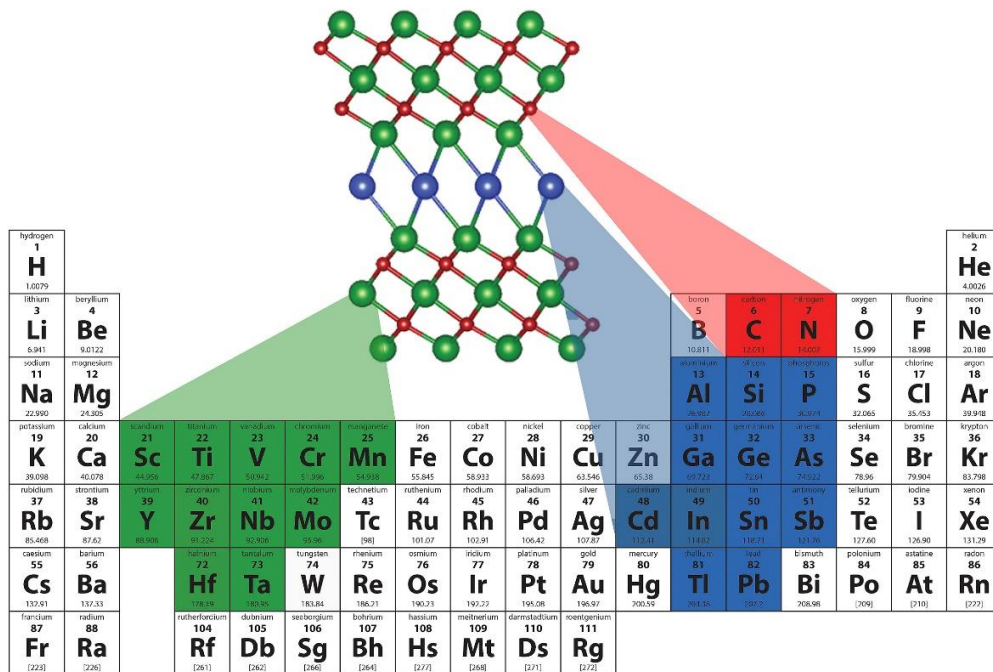
۲- مکسین‌ها

مکسین به‌عنوان دسته جدیدی از نانومواد دوبعدی، از خانواده بزرگی از کاربردهای فلزات انتقالی، نیتrideها و کربونیتrideها با فرمول عمومی $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1-3$) شناخته می‌شود که در آن M یک گروه فلزی از عناصر واسطه، X کربن، نیتروژن یا هردو و T_x گروه‌های عاملی مثل $(-OH, -O-, -F)$ هستند [۱۴]. تاکنون، نزدیک به ۳۰ نوع مکسین از جمله Ti_3CNT_x , $Nb_4C_3T_x$, [۱۵], Ti_2CT_x , $Ti_3C_2T_x$, [۱۶], Nb_2CT_x , V_2CT_x , $Ta_4C_3T_x$ [۱۷] با موفقیت سنتز شده‌اند. مکسین‌ها اولین بار در سال ۲۰۱۱ سنتز شدند. در این میان، مکسین‌های مبتنی بر تیتانیوم، مانند Ti_2CT_x و بخصوص $Ti_3C_2T_x$ به دلیل فراوانی عناصر و غیرسمی بودن محصولات جانبی، مناسب‌ترین گزینه برای کاربردهای زیست‌محیطی هستند. علاوه بر این، ترکیبات مختلف مکسین با دو یا چند فلز از عناصر واسطه در لایه‌های فاز M در ساختارهای مرتب و بی‌نظم وجود دارد که از آن جمله می‌توان به $(Mo_2Ti_2C_3, (Ti_{0.5}Nb_{0.5})_2C, (V_{0.5}Cr_{0.5})_3C_2)$ اشاره کرد [۱۸].

فاز MAX به‌عنوان استوکیومتری پیش‌ساز مکسین‌ها، با فرمول کلی $M_{n+1}AX_n$ است که در آن $n=1, 2, 3$ و "M" یک فلز انتقالی است. همچنین "A" عناصر گروه ۱۳ و ۱۴ (به‌عنوان مثال، Al, Si, Ge یا Sn) و "X" کربن، نیتروژن یا هر دو است. همان‌طور که در شکل ۱ ارائه مشاهده می‌شود، این فازها دارای ساختار شش ضلعی هستند و لایه‌هایی از "M" و "A" در هم تنیده می‌شوند. اتم‌های "X" در مکان‌های هشت ضلعی تشکیل شده توسط عناصر "M" قرار

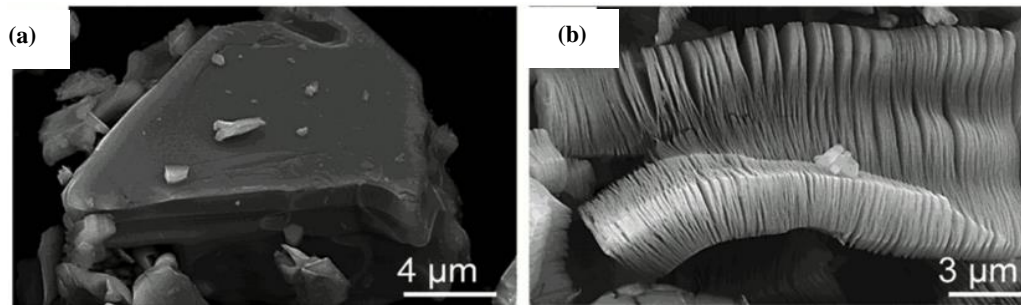
دارند. خواص فاز MAX برگرفته از خواص سرامیک‌ها و فلزات می‌باشد؛ بطوریکه خواص سرامیکی این فازها شامل چگالی کم، سختی بالا، مقاومت عالی در برابر خوردگی بوده و خواص فلزی این فازها شامل رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا و ماشین‌کاری خوب همانند مواد فلزی است. پیوندهای M-X معمولاً ترکیبی از نوع یونی، فلزی و کووالانسی هستند و پیوندهای M-A نیز کاملاً فلزی هستند [۲۳-۱۹]. در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های Ti_3AlC_2 (فاز MAX) و $Ti_3C_2T_x$ نشان داده شده است.

برخلاف دیگر ترکیبات سه‌بعدی مثل گرافیت که از طریق پیوندهای ضعیف واندروالسی به هم متصل هستند، فاز MAX از پیوندهای قوی برخوردار است [۲۸-۲۶، ۱۶]. براین اساس، برای اولین بار، روش لایه‌برداری شیمیایی سنتز مواد دوبعدی مکسین از جامدات پیوند خورده اولیه (فاز MAX) را ممکن ساخت [۲۹، ۱۶]. همانطور که اشاره شد، نقاط قوت M-X و M-A عمده‌ترین تفاوت فازهای MAX هستند. با این حال، در مقایسه با M-X، پیوندهای M-A ضعیف‌تر بوده و می‌توانند شکسته شوند [۳۲-۳۰، ۲۶]. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در سنتز مکسین‌ها، بدست آوردن کاربردها، نیتrideها یا هر دو از طریق حذف لایه‌های ضعیف پیوندی اتم‌های A است [۳۳، ۳۴]. در حقیقت، به دلیل حذف لایه اتم‌های A از فاز MAX، این خانواده از کاربردها و نیتrideهای فلزی دو بعدی سنتز شده مکسین نامیده شده است [۱۶].



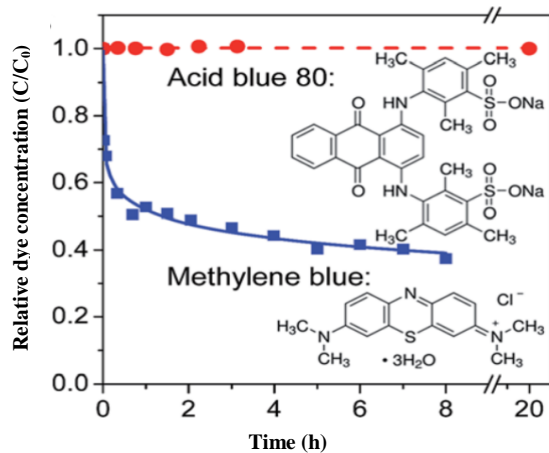
شکل ۱: عناصر تشکیل دهنده فاز MAX [۲۴].

Figure 1. MAX phase constituent elements [24].



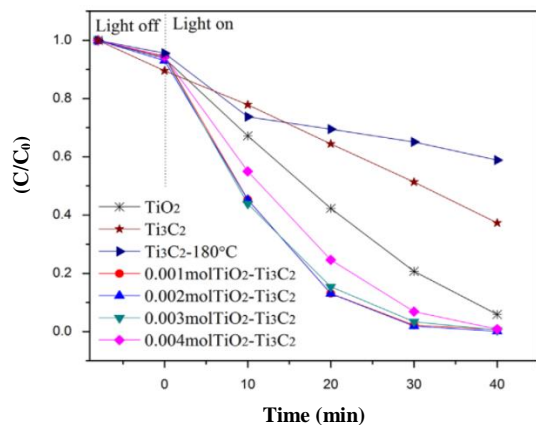
شکل ۲: تصویر SEM نمونه‌های (a) Ti₃AlC₂ (فاز MAX) و (b) نمونه Ti₃C₂T_x پس از اچ کردن در HF [۲۵].

Figure 2: (a) SEM micrographs of Ti₃AlC₂ particle and (b) Ti₃C₂T_x formed after etching in HF [25].



شکل ۳: وابستگی زمانی غلظت‌های (C₀/۴) ۰/۰۵ mg mL⁻¹ MB و (C₀/۴) ۰/۰۶ mg mL⁻¹ AB محلول‌های آبی با ذرات Ti₃C₂T_x معلق در تاریکی. ساختار شیمیایی مواد رنگزای مربوطه در داخل شکل نشان داده شده است [۴۹].

Figure 3: Time dependence of MB and AB 80 (C₀^{1/4} 0.06 mg mL⁻¹) concentrations in aqueous solutions with suspended Ti₃C₂T_x particles in the dark. Chemical structures of corresponding dyes are shown as insets [49].



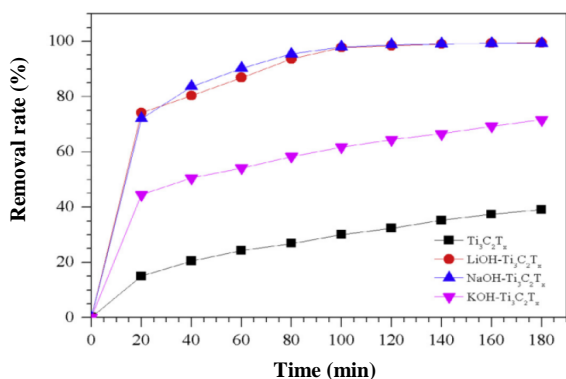
شکل ۴: نمودار نرخ تخریب کاتالیزور نوری (C₀/C_t) برای ترکیبات مختلف MO [۵۰].

Figure 4: The curves of photocatalytic degradation rate (C₀/C_t) for catalysts [50].

۳- حذف مواد رنگزا توسط مکسین‌ها

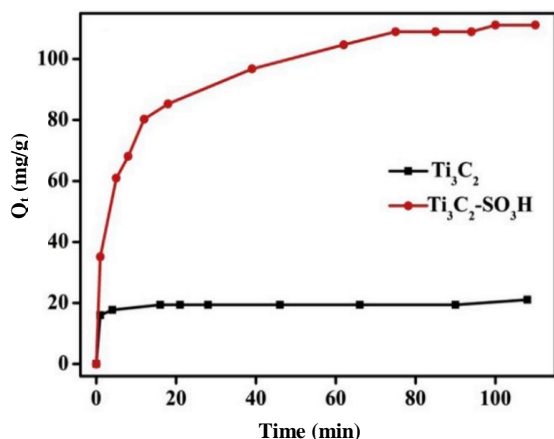
مواد رنگزا یکی از مهم‌ترین ترکیبات پساب تخلیه شده از صنایع نساجی هستند. گزارش شده است که تولید جهانی مواد رنگزا بیش از ۷۰۰۰۰۰ تن در سال است، در حالی که صنایع مختلف بیش از ۱۰۰۰۰۰ مورد مختلف مواد رنگزا و رنگدانه را مصرف می‌کنند [۳۶، ۳۵]. صنعت نساجی در سراسر جهان سالانه تقریباً ۱۰۰۰۰ تن مواد رنگزا مصرف می‌کند و تقریباً ۱۰۰ تن (جامد) در سال از مواد رنگی را در پساب تخلیه می‌کند [۳۷-۳۹]. همان‌طور که اشاره شد، یکی از مهم‌ترین و مناسب‌ترین روش‌های حذف مواد رنگزا، روش‌های مبتنی بر جذب می‌باشد. از مزایای این روش سهولت کار، هزینه کم، به‌صرفه بودن و سریع بودن می‌باشد [۴۰-۴۲]. مکسین‌ها و غشاهای مبتنی بر مکسین‌ها ساختارهایی با پتانسیل بسیار بالا برای حذف مواد رنگزا از محیط‌های آبی می‌باشند [۳۵، ۴۳-۴۸] که در ادامه به برخی از مطالعات صورت گرفته در این خصوص اشاره شده است. بطور مثال مشتیلر^۱ و همکارانش [۴۹] دریافتند که مکسین (Ti₃C₂T_x) پتانسیل بسیار خوبی برای جذب و تجزیه کاتالیزور نوری ماده رنگزای متیلن آبی (MB) و اسید آبی ۸۰ (AB80) از خود نشان می‌دهد. نتایج این محققان نشان داد که هنگامی که پرتو فرابنفش روی محلول حاوی مواد رنگزا و Ti₃C₂T_x تابانده شد، تخریب مواد رنگزا افزایش یافت. حذف مواد رنگزای کاتیونی MB توسط مکسین (Ti₃C₂T_x) از طریق جذب و به دنبال آن تجزیه کاتالیزور نوری اتفاق افتاد. مکسین جذب مطلوبی برای ماده رنگزای کاتیونی مانند MB در مقایسه با ماده رنگزای آنیونی AB80 در تاریکی نشان داده است (شکل ۳) که احتمالاً به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک بین سطوح مکسین و مولکول‌های ماده رنگزای MB بوده است. همان‌طور که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است، نانوکامپوزیت TiO₂-Ti₃C₂T_x تخریب کاتالیزور نوری متیل نارنجی (MO) را نسبت به TiO₂ و Ti₃C₂T_x تحت پرتو UV نشان می‌دهد [۵۰].

¹ Mashtalir



شکل ۵: نمودار میزان حذف رنگزای MB بر حسب زمان با جاذب‌های مختلف [۵۱].

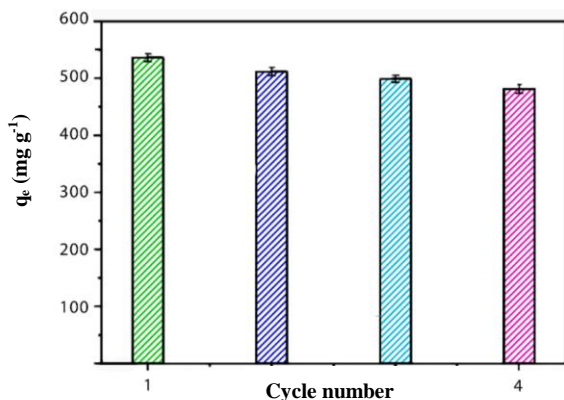
Figure 5: Plot of the MB removal rate vs. time for different adsorbents [51].



شکل ۶: اثر زمان بر جذب MB روی Ti_3C_2 و $Ti_3C_2-SO_3H$ بر

میزان جذب ۱۰ میلی گرم؛ $pH=7$ ؛ غلظت اولیه MB ۵۰ میلی گرم در لیتر؛ سرعت تکان دادن ۲۵۰ دور در دقیقه [۵۳].

Figure 6. The effect of contact time on adsorption MB onto pristine Ti_3C_2 and $Ti_3C_2-SO_3H$ ($T = 298\text{ K}$; adsorption dosage = 10 mg; $pH = 7$; initial MB concentration = 50 mg/L; shaking speed = 250 rpm) [53].



شکل ۷: قابلیت استفاده مجدد Ti_2CT_x برای حذف MB (شرایط: غلظت ۱ mg/l

$MB = 300$ ، زمان تماس = ۱۴۴۰ دقیقه، دما = ۳۰۸ کلون و $pH = 6$) [۵۶].

Figure 7: Reusability study of Ti_2CT_x for MB removal (conditions: MB concentration = 300 mg L⁻¹, contact time = 1440 min, temperature = 308 K, and $pH = 6$) [56].

مطالعات صورت گرفته نشان داده است که عملکرد جذب ماده رنگزا توسط مکسین‌ها با ایجاد گروه‌های عاملی از طریق واکنش آن با محلول قلیایی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۵۱]. فاصله بین لایه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ اصلاح شده با یک محلول قلیایی (NaOH, LiOH) و KOH) که منجر به افزایش جذب MB می‌شود، افزایش می‌یابد. ظرفیت جذب $NaOH-Ti_3C_2T_x$ در مقایسه با مکسین اصلاح نشده را می‌توان به افزایش تعداد گروه‌های OH (یا OM) در سطح Alk- نسبت داد که با جایگزینی گروه F- در مکسین اولیه ایجاد می‌شود (شکل ۵) [۵۱].

در مطالعه‌ای دیگر زو^۱ و همکارانش [۵۲]، اثر دما بر جذب MB توسط مکسین اصلاح شده با Fe_3O_4 را ارزیابی کردند و دریافتند که ظرفیت جذب MB در دمای بالا افزایش می‌یابد. ظرفیت جذب بیشتر در دماهای بالا به جذب الکترواستاتیک و پیوند هیدروژنی بین گروه‌های MB و Ti-OH در سطح مکسین نسبت داده شده است. بکارگیری گروه‌های سولفونیک نیز در افزایش توانایی جذب Ti_3C_2 برای جذب MB موثر بوده است [۵۳]. ظرفیت جذب Ti_3C_2 پس از اصلاح با گروه‌های سولفونیک (به عنوان مثال $Ti_3C_2-SO_3H$) از ۲۱/۱ به ۱۱۱/۱۱ mg/g افزایش یافت (شکل ۶) [۵۳].

در بررسی‌های محققان، کامپوزیت مکسین خود آرایش یافته، $(Ti_3C_2)Co_3O_4$ جذب فوق‌العاده‌ای برای MB و ردآمین^۲ نشان داده است [۵۴]. مکسین $(Ti_3C_2T_x)$ متصل به ترفتالات ظرفیت جذب ۲۰۹ mg/g را برای ماده رنگزای MB نشان داد که احتمالاً به دلیل گروه‌های آزاد کربوکسیلات ترفتالات و فضای بین لایه‌های بیشتر در میان ورقه‌های مکسین می‌باشد [۵۵]. در مطالعه‌ای دیگر سان^۳ و همکارانش [۵۶] نشان دادند که Ti_2CT_x در حذف MB بسیار کارآمد است. نتایج بدست آمده نشان داد که بیشینه ظرفیت جذب می‌تواند به ۲۴۶۰/۹۰ mg/g افزایش یابد، که به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر گزارش شده برای گرافن (۸۳/۲ mg/g) است. این ترکیب در حذف ماده رنگزای آنیونی (MO)، نیز جذب خوبی (۱۲۲/۶ mg/g) را نشان داده‌است. این محققان همچنین با استفاده از HCl به بازیابی Ti_2CT_x پرداختند. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده‌است، کاهش قابل توجهی در ظرفیت جذب MB مشاهده نشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که Ti_2CT_x از پایداری و قابلیت بازیابی مناسبی برخوردار است. از اینرو مکسین (Ti_2CT_x) به‌عنوان یک جاذب کارآمد برای حذف مواد رنگزای کاتیونی از پساب پیشنهاد شده است. در مطالعه‌ای دیگر کارتیکیان^۴ و همکارانش [۵۷]، مکسین $Ti_3C_2T_x$ را برای جذب MO استفاده کردند و ظرفیت جذب خوب ۹۴/۸ mg/g را بدست آوردند.

¹ Zhu

² Rhodamine

³ Sun

⁴ Karthikeyan

توسط $\text{MXene}@Fe_3O_4$ پس از انجام ۵ چرخه جذب و بازیابی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، قابلیت حذف رنگرا توسط مکسین پس از طی چرخه‌های بازیابی و جذب متناوب بطور جزئی کاهش یافته است. بطوری که پس از پنج بار استفاده مجدد از مکسین، میزان عملکرد حذف ماده رنگزا به اندازه ۷۷ درصد است.

۴- حذف فلزات سنگین توسط مکسین‌ها

عمده‌ترین منابع آلودگی محیط‌زیست توسط فلزات سنگین، پساب‌های مختلف صنایع شیمیایی جدید است. فلزات سنگین قابل تجزیه نیستند. آلودگی آب‌ها به دلیل تخلیه فلزات سنگین در آنها، نگرانی جهانی را به همراه داشته است. فلزات سنگین مضر بویژه در تصفیه پساب‌های صنعتی، شامل آرسنیک، جیوه، مس، نیکل، کادمیم، کرم، سرب و روی هستند [۶۰، ۶۱].

بررسی‌های به‌عمل آمده نشان داده است که مکسین‌ها توانایی جذب موثر بسیاری از فلزات سنگین مانند کادمیم (Cd(II)، جیوه (Hg(II)، کرم (Cr(VI)، مس (Cu(II)، سرب (Pb(II) و باریم (Ba(II) از آب را نشان داده‌اند. یون‌های فلزات سنگین (>۴.۵ آنگستروم) می‌توانند در فاصله بین لایه‌لایه نازک (>۲ آنگستروم) در صفحات نانومکسین محبوس شوند.

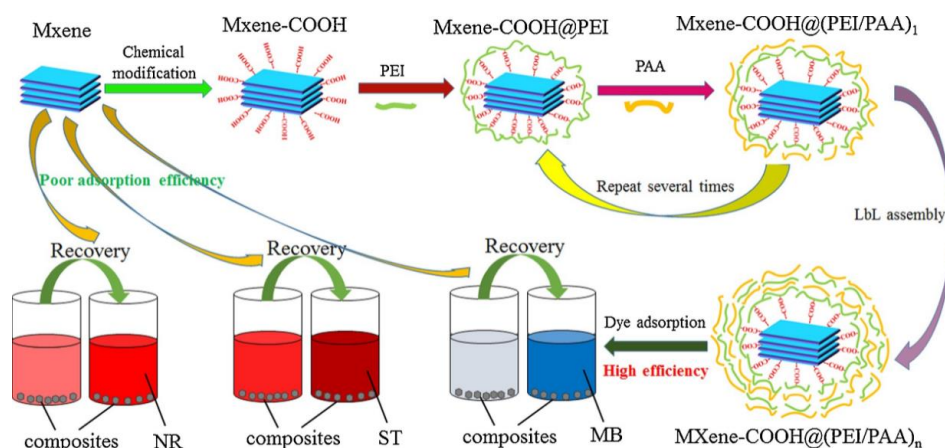
علاوه بر این، عامل دارشدن سطح مکسین نقش مهمی در افزایش قابلیت جذب دارد. پرکاربردترین مکسین‌ها برای جذب فلزات سنگین، مکسین‌های مبتنی بر تیتانیم ($Ti_3C_2T_x$) است. مطالعات صورت گرفته نشان داده است که $Ti_3C_2T_x$ به طور موثر غلظت‌های مختلف یون‌های (II) Ba، (VI) Cr، (II) Cu و (II) Pb را جذب می‌کند [۶۲-۶۵]. در جدول ۱ حد استاندارد مقادیر فلزات سنگین و تاثیرات مضر آن‌ها ارائه شده است.

جذب MO توسط مکسین $Ti_3C_2T_x$ عمدتاً به دلیل جذب شیمیایی، جذب الکترواستاتیک، کمپلکس، فعل و انفعالات سطح و سازوکارهای تبادل یونی بوده است. همچنین جذب MO توسط مکسین $Ti_3C_2T_x$ از ایزوترم لانگمیر تبعیت کرده است. لی^۱ و همکارانش [۵۸] نیز جذب MB بر روی نانوکامپوزیت‌های هسته-پوسته مکسین $(PEI/PAA)@COOH$ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده توسط این محققان بیانگر یک فرآیند سه مرحله‌ای شامل جذب در سطح خارجی، نفوذ ذرات به داخل هسته و در نهایت دستیابی به تعادل جذب می‌باشد. کامپوزیت مبتنی بر مکسین با استفاده از روش لایه‌به‌لایه (LbL) در حذف سه ماده رنگزای MB، سافرانین تی (ST) و قرمز طبیعی (NR) از محلول آبی موثر بوده است. ساختار پوسته-هسته بر روی سطح لایه مکسین به ترتیب با غوطه‌وری محلول پلی‌کربنات کربوکسیل (MXene-COOH) در پلی‌اتیلن پلی‌آمید (PEI) و پلی‌اکریلیک اسید (PAA) تشکیل می‌شود (شکل ۸).

این فرآیند تا زمانی که نانوکامپوزیت‌های پوسته-هسته (PEI / MXene-COOH@PAA) با تعداد دلخواه پوسته‌های دو لایه به دست آید، تکرار می‌شود. MXene-COOH@PEI / PAA ظرفیت جذب بالاتری را برای سه مواد رنگزای مورد مطالعه (MB، ST و NR) در مقایسه با MXene و MXene-COOH نشان داد (شکل ۹). همچنین نتایج این محققان نشان داد که بازیابی کامپوزیت MXene-COOH@PEI/PAA پس از جذب MB می‌تواند در هشت چرخه متوالی، بدون کاهش قابل توجه در ظرفیت جذب مجدداً مورد استفاده قرار گیرد.

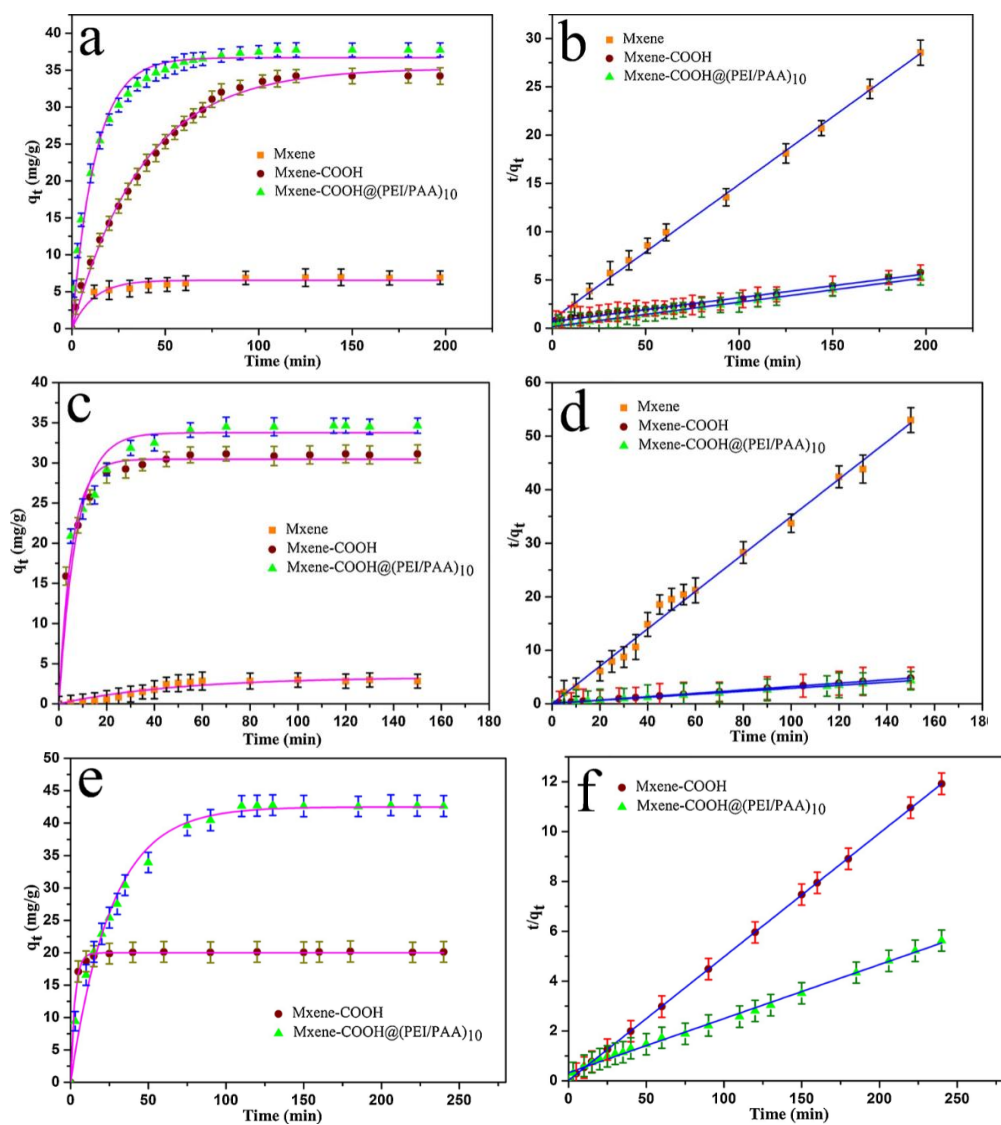
جذب مواد رنگزا بر روی مکسین‌ها در درجه اول به دلیل برهم‌کنش مولکول‌های مواد رنگزا با گروه‌های مختلف روی سطح مکسین رخ می‌دهد. شکل ۱۰ سازوکار پیشنهادی جذب MB بر روی $\text{MXene}@Fe_3O_4$ را نشان می‌دهد [۵۹]. شکل ۱۱ قابلیت جذب MB

¹ Li



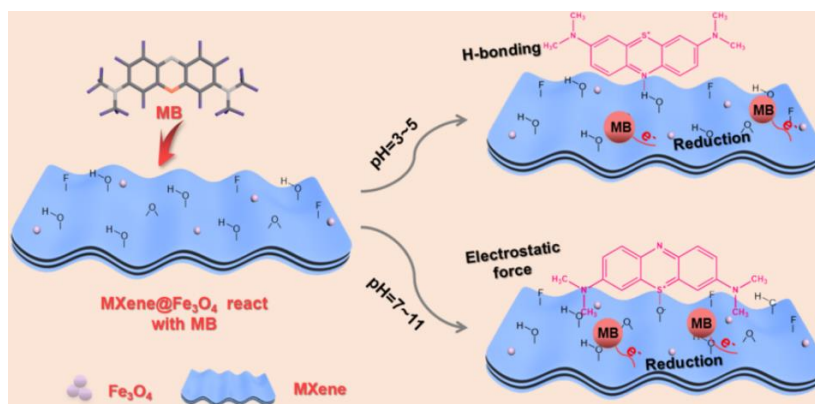
شکل ۸: طرح‌واره سنتز MXene-COOH و کامپوزیت‌های لایه نشانی شده توسط PEI, PAA [۵۸].

Figure 8: Schematic illustration of the fabrication of MXene-COOH and LbL-assembled composites by chemical modification and LbL self-assembly [58].



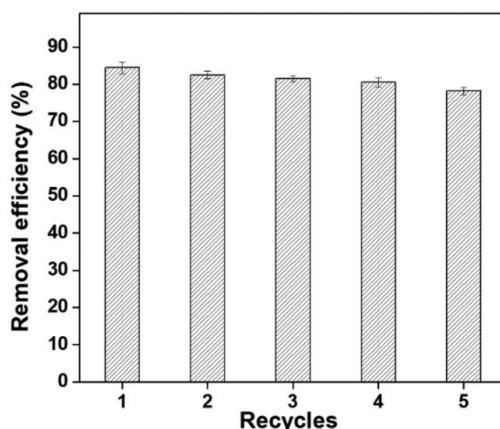
شکل ۹: منحنی‌های سینتیک جذب مواد رنگزای MB (a,b)، ST (c,d)، و NR (e,f) در ۲۹۸ کلوین توسط کامپوزیت‌های MXene، MXene-COOH و MXene-COOH@(PEI/PAA)10.

Figure 9: Adsorption kinetics curves of the prepared MXene, MXene-COOH, and MXene-COOH@(PEI/PAA)10 composites on MB (a, b), ST (c, d), and NR (e, f) at 298 K [58].



شکل ۱۰: سازوکار پیشنهادی برای جذب MB بر روی MXene@Fe₃O₄ [۵۹].

Figure 10: Proposed mechanism for the adsorption of MB on the surface of MXene@Fe₃O₄ [59].



شکل ۱۱: قابلیت استفاده مجدد MXene @ Fe₃O₄ برای حذف ماده رنگزا MB در ۵۵ درجه سانتی‌گراد پس از انجام پنج چرخه (مقدار مصرف MXene@Fe₃O₄ = ۱ g/L، غلظت اولیه MB = ۱۰ mg/g، زمان واکنش = ۲۴ ساعت) [۵۹].

Figure 11: Reusability of MXene@Fe₃O₄ toward MB at 55 °C (operating parameters: MXene@Fe₃O₄ dosage = 1 g·L⁻¹, reaction time = 24 h, and initial MB concentration = 10 mg·L⁻¹) [59].

جدول ۱: برخی از فلزات سنگین و حد استاندارد و تاثیرات منفی آنها [۶۶].

Table 1: Some heavy metals and their standard limits and negative effects.

نام فلز	اثرات	حد استاندارد (mg/l)
سرب (Pb)	آسیب مغزی-کلیوی، از دست دادن اشتها	۰/۰۰۶
روی (Zn)	مشکلات تنفسی، گیجی، درد قفسه سینه، مشکلات عصبی	۰/۸
نیکل (Ni)	سرطان ریه، تهوع، سرفه، ناباروری	۰/۲
کرم (Cr)	ریزش مو، اختلال در خصوصیات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان	۰/۰۵
کادمیم (Cd)	سرطان‌زا، آسیب کلیوی	۰/۰۱
جیوه (Hg)	مشکلات تنفسی، آسیب کلیوی، اختلال در گردش خون	۰/۰۰۰۰۳

یون‌های Cu (II) از آب با جذب و کاهش Cu²⁺ نشان داده‌اند. به Cu²⁺ به گونه‌های Cu₂O و CuO که متعاقباً توسط Ti₃C₂T_x-DL جذب می‌شوند، کاهش می‌یابد. ظرفیت جذب Ti₃C₂T_x-DL، ۷۸/۴۵ mg/g است (۲/۷ برابر بیشتر از کربن فعال) و در عرض ۳ دقیقه حالت تعادل حاصل شده‌است. مکسین لایه‌لایه (Ti₃C₂T_x-DL) نیز پس از جذب و حذف یون‌های Cu (II) با استفاده از مخلوطی از اسید نیتریک و نیترات کلسیم احیا شد. با این حال، ظرفیت جذب در چرخه سوم به ۳۰ درصد کاهش یافت [۶۲]. ظرفیت جذب بیشتر مکسین‌ها نسبت به مواد دیگر مثل کربن فعال، با وجود سطح کم (۱۰ m²/g) عمدتاً به جذب الکترواستاتیک بین یون‌های (II) Pb و سطح مکسین نسبت داده شده‌است. براساس گزارشات ارائه شده [۴۳] مکسین قابلیت استفاده مجدد خوبی را با از دست دادن اندک ظرفیت جذب در چهار چرخه جذب-دفع نشان داد.

مکسین‌ها همچنین دارای ویژگی منحصر به فرد حذف آلاینده‌ها با جذب در جای آن می‌باشند. نانوصفحه Ti₃C₂T_x با کاهش هم‌زمان Cr (VI) به Cr (III) و جذب یون‌های کاهش‌یافته Cr (III) یون‌های Cr (VI) را حذف می‌کند.

فرد^۱ و همکارانش [۶۴]، با لایه‌برداری نانورقه‌های Ti₃C₂T_x را تهیه کردند و توانایی جذب یون‌های Ba (II) از آب توسط این ترکیبات را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد حدود ۹۰ درصد یون‌های Ba (II) توسط Ti₃C₂T_x طی ۱۰ دقیقه جذب شدند. ظرفیت جذب Ti₃C₂T_x (مقدار مصرف ۱۰۰ mg) برای یون‌های Ba (II) (با غلظت اولیه ۵۵ ppm) ۹/۳ mg/g بوده که از بسیاری از جاذب‌های متداول بالاتر است.

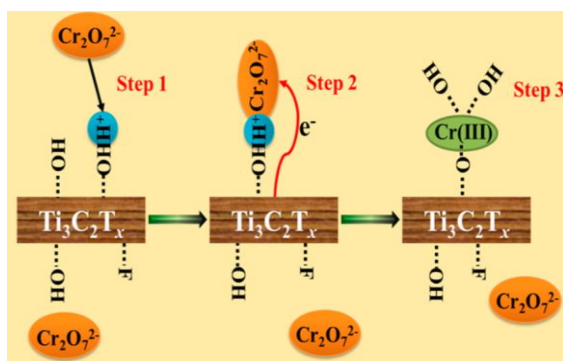
جدول ۲ عملکرد مکسین را در حذف ماده رنگزا و یون‌های فلزی در مقایسه با برخی جاذب‌های متداول ارائه کرده‌است. بررسی‌های محققان نشان داد که جذب یون‌های Ba (II) با حضور سایر یون‌های رقیب مانند (II) Ca، (IV) Cr، (II) Pb، (II) Sr و (III) As خیلی تحت تأثیر قرار نگرفته‌است. این محققان دریافتند که جذب در سطح مکسین و جذب شیمیایی به دلیل گروه عاملی سطح به جذب یون‌های Ba (II) در Ti₃C₂T_x کمک می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر مشخص شده که نانورقه‌های مکسین لایه‌لایه (Ti₃C₂T_x-DL) و مکسین چند لایه Ti₃C₂T_x-ML عملکرد بسیار خوبی برای حذف

¹ Fard

جدول ۲: مقایسه عملکرد برخی مکسین‌ها و جاذب‌های طبیعی و مصنوعی متداول.

Table 2: Comparison of the performance of MXene and some common natural and synthetic adsorbents.

مرجع	ظرفیت جذب (mg/g)	ماده جذب شده	جاذب
[۵۱]	۲۰۹/۵	Methylene blue	Ti ₃ C ₂ T _x پیوند داده شده با ترفتالات
[۵۱]	۱۸۹	Methylene blue	NaOH-Ti ₃ C ₂ T _x
[۶۷]	۱۴۲/۹	Methylene blue	پوست سیر ^۱
[۶۸]	۵۰	Methylene blue	کربن فعال
[۴۹]	-	acid blue 80	Ti ₃ C ₂ T _x
[۶۹]	۳۹۱	acid blue 80	تفاله نیشکر ^۲
[۶۹]	۱۲۱	acid blue 80	کربن فعال رایج ^۳
[۷۰]	۲۵۰	Cr (VI)	Ti ₃ C ₂ T _x
[۷۱]	۲۸/۰۱۹	Cr (VI)	کربن فعال چوب تهرندی ^۴
[۷۲]	۱۰۹/۸۹	Cr (VI)	کربن فعال روغن تفاله نیشکر ^۵
[۶۲]	۷۸/۴۵	Cu (II)	Ti ₃ C ₂ T _x
[۴۴]	۲۳۹/۹	Pb (II)	ورقه‌های نانو Ti ₂ CT _x
[۷۳]	۸۷/۴۹	Pb (II)	پوست پیاز
[۴۶]	۱۱۲۸/۴۱	Hg (II)	نانو کامپوزیت Ti ₃ C ₂ T _x
[۴۸]	۹۳۲/۸۴	Hg (II)	Ti ₃ C ₂ T _x هسته پوسته سدیم آلجینات
[۷۴]	۸۳/۳۳	Hg (II)	پوسته نخل ^۶
[۷۵]	۱۱۶/۲۷	Hg (II)	نانوذره پوسته تخم مرغ ^۷



شکل ۱۲: طرح‌واره سازوکار حذف Cr (VI) توسط نانوصفحات Ti₃C₂T_x [63].

Figure 12: Schematic illustration of the removal mechanism of Cr (VI) by the Ti₃C₂T_x nanosheets [63].

کارتیکیان^۸ و همکارانش [۵۷]، مکسین Ti₃C₂T_x را برای جذب Cr (VI) استفاده کردند و ظرفیت جذب ۱۰۴ mg/g را بدست آوردند. قابلیت استفاده مجدد یک جنبه مهم برای تعیین امکان عملی و صنعتی شدن جاذب می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود محققان توانستند مکسین را با محلول ۰/۱ M NaOH بعد از چندین دوره مصرف بازیابی کنند و مجدداً مورد استفاده قرار دهند.

⁸ Karthikeyan

با این حال، مکسین برای بازیابی ظرفیت اصلی خود برای یون‌های Cr (VI) قابل تولید نیست. زیرا حذف از طریق واکنش احیا رخ می‌دهد. سازوکارهای مختلفی، جذب فلزات سنگین در سطوح مکسین‌ها را توضیح می‌دهد. تیتانیوم تمایل زیادی نسبت به بسیاری از یون‌های فلزی دارد. یون‌های فلزی ممکن است در ساختار لایه‌ای مکسین‌ها با سطح وسیع به دام بیافتند (حبس فیزیکی). علاوه بر این، فعل و انفعالات الکترواستاتیک به دلیل تبادل یونی بین یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی در سطوح مکسین‌ها رخ می‌دهد. داده‌های ایزوترم جذب نشان داده است که حذف فلزات سنگین در اغلب مکسین‌ها توسط ایزوترم فروندلیچ توصیف می‌شود که بیانگر جذب چند لایه است. سازوکار حذف یون‌های Cr (VI) توسط نانورقه‌های Ti₃C₂T_x از طریق مسیر جذب و کاهش هم‌زمان در شکل ۱۲ ارائه شده است [۶۳].

¹ Garlic peel

² Bagasse

³ Commercial activated carbon

⁴ Tamarind wood AC

⁵ Olive bagasse AC

⁶ Palm shell

⁷ Eggshell nano-particle

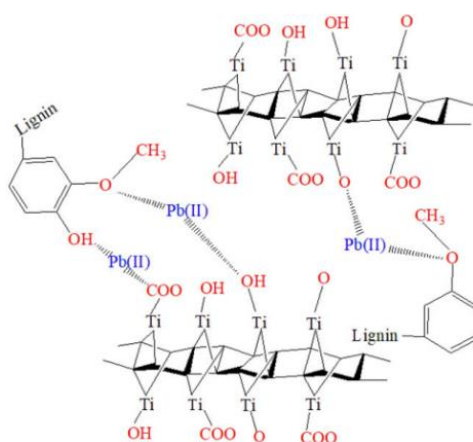
مکان‌های فعال Ti-OH رخ داده است. مکسین عامل‌دار شده با سطح فعال‌های زیستی مانند آبکافت آنزیمی لیگنین (EHL)، لیگنوسولفونات (LS) و کیتوزان (CS) ظرفیت جذب بالایی را برای یون‌های Pb (II) نشان داده است.

سطح مکسین در pH کم دارای بار مثبت است که دلیل آن به وجود گروه‌های هیدروکسیل پروتونه فراوان ارتباط داده می‌شود. براین اساس مکسین از طریق جاذبه الکترواستاتیک با $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ واکنش می‌دهد. کاهش Cr (III) به Cr (VI) پس از جذب یون‌های Cr (VI) بر روی سطح و با انتقال الکترون‌ها از $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ به Cr (VI) آغاز می‌شود. یون‌های کاهش یافته Cr (III) توسط $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ که میل زیادی به جذب یون‌های فلزی دارند، جذب شده که این جذب احتمالاً به دلیل پیوند Ti-O می‌باشد. یون‌های Cr (III) نیز از طریق پیوندهای کووالانسی (به عنوان مثال Ti-O-Cr (III)) به سطح مکسین متصل می‌شوند (شکل ۱۴).

یون‌های سرب عمدتاً به دلیل تبادل یونی و کی‌لیت‌سازی با گروه‌های عاملی و ساختارهای چند حلقه‌ای در نانوصفحه‌های Ti_2CTX و EHL بر روی سطح مکسین جذب می‌شوند. فعل و انفعالات احتمالی بین یون‌های سرب و گروه‌های عاملی سطح (یعنی، OH^- ، COOH) منجر به افزایش جذب از طریق جذب شیمیایی می‌شود [۴۴، ۵۸]. نتایج محققان نشان داد که بیشینه ظرفیت جذب یون Pb (II) توسط مکسین Ti_2CTX عامل‌دار شده به $232/9 \text{ mg/g}$ افزایش یافته است. همچنین اصلاح سطح با عامل سیلان (KH570) ظرفیت جذب $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ را برای یون‌های Pb (II) از $48/28 \text{ mg/g}$ به $147/29 \text{ mg/g}$ افزایش داد.

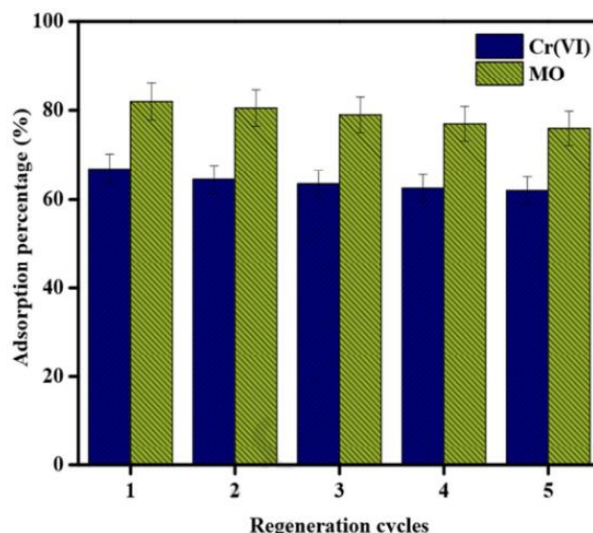
¹ Pandey

² Peng



شکل ۱۴: طرح‌واره سنتز Ti_2CTX اصلاح شده [۴۴].

Figure 14: The preparation process of biosurfactant-functionalized Ti_2CTX [44].



شکل ۱۳: بازیابی مکسین‌ها برای جذب Cr (VI) و MO از یک محلول آبی در پنج چرخه جذب و بازیابی [۵۷].

Figure 13: Regeneration studies of MXenes for adsorption of Cr (VI) and MO from an aqueous solution [57].

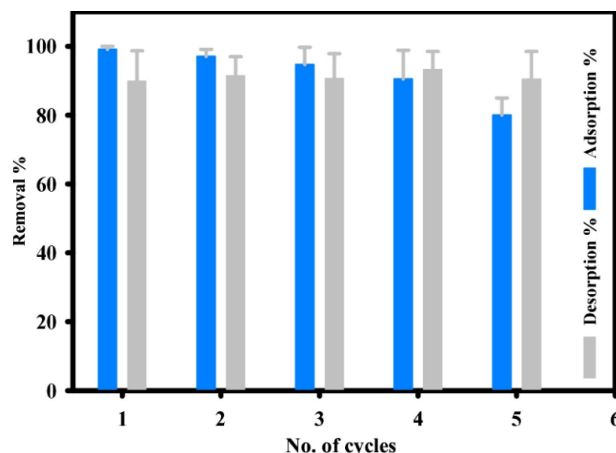
در مطالعه‌ای دیگر، پندی^۱ و همکارانش [۷۶]، برای کاهش موثر برومات به برومید، از ورقه‌های نانو $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ استفاده کردند. در این فرآیند، ابتدا لایه فعال Ti-C از $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ اکسید شده و نانوبلورهای TiO_2 را تشکیل داد، در حالیکه برومات (BrO_3^-) به یک برومید (Br^-) توسط یک فرآیند خود به خودی واکنش می‌دهد. عامل‌دار کردن سطح مکسین‌ها همچنین بر قابلیت جذب آنها تأثیر بسزایی دارد. بطور مثال، پنگ^۲ و همکارانش [۷۰]، مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2(\text{OH}/\text{ONa})_x\text{F}_{2-x}$ را با گروه‌های هیدروکسیل فعال تهیه و آن را برای حذف یون‌های Pb (II) از آب به کار گرفتند. جذب تعادلی در مدت ۲ دقیقه حاصل شده و مکسین عامل‌دار شده ظرفیت جذب 140 mg/g برای یون‌های Pb (II) را نشان داد. جذب احتمالاً از طریق تبادل یونی و به دلیل وجود



غشا کامپوزیتی توانایی رسیدن به جذب و حذف بیشینه ۶۳/۲ درصد برای Cu^{2+} ، ۶۴/۱ درصد برای Cd^{2+} و ۷۰/۲ درصد برای Cr^{6+} از فاضلاب را نشان داد. علاوه بر این، غشا $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MXene}$ توانایی بازیابی خوبی را پس از شستشو با محلول HCl نشان داد. در مطالعه‌های دیگر، زو^۲ و همکارانش [۷۸]، به مقایسه توانایی جذب MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2(\text{OH})_{0.8}\text{F}_{1.2}$) و نانوکامپوزیت $\text{TiO}_2\text{-C}$ کربن تیتانیا برای جذب یون‌های Cr (VI) پرداختند. نانوکامپوزیت در حضور آنیون‌هایی مانند نیترات (NO_3^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و کلرید (Cl_2) ظرفیت جذب چهار برابر بیشتر از مکسین خام را نشان داد. به همین ترتیب، مکسین‌های ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) اصلاح شده با levodopa (DOPA) ظرفیت جذب بیشتری را نسبت به مکسین خام برای یون‌های مس (II) نشان دادند [۴۷]، فیلم‌های مبتنی بر مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ نشان دادند که قادر به حذف یون‌های مختلف فلزات سنگین از آب مانند Cr (VI)، Ag (I)، Au (III) و Pd (II) هستند [۴۸]. فیلم‌های مبتنی بر مکسین با استفاده از محلول NaOH و HCl با موفقیت احیا شده و دوباره مورد استفاده قرار گرفتند.

۵- حذف رادیونوکلوئیدها توسط مکسین‌ها

با رشد سریع صنعت هسته‌ای، آلودگی ناشی از رهاسازی زباله‌های هسته‌ای به دلیل اثرات نامطلوب بالقوه زیست‌محیطی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌است [۸۰، ۷۹]. علاوه بر روش‌های موجود برای بازسازی زباله‌های هسته‌ای، فرآیندهای مبتنی بر جذب یکی از موثرترین و مناسب‌ترین روش‌ها برای حذف آلاینده‌ها از زباله‌های هسته‌ای محسوب می‌شود. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مکسین‌ها، این ترکیبات دوعده‌ای به عنوان جاذب‌های جدیدی برای حذف رادیونوکلوئیدها مانند اورانیوم (VI) U ، سزیم (Cs^+)، پالادیم (Pd) (II)، توریم (Th (IV)) و یورانیوم (III) Eu مطرح شده‌است [۸۷-۸۹]. حذف موثر یون‌های اورانیل $[\text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})_n]^{2+}$ توسط نانورقه‌های هیدروکسیلات و آنادیوم کاربید مکسین $\text{V}_2\text{C}(\text{OH})_2$ به صورت آزمایشی تعیین و با استفاده از نظریه تابعی چگالی (DFT) به صورت تئوری پیش‌بینی شده است [۸۸-۸۳]. ورقه‌های نانو و آنادیوم کاربید مکسین (V_2CT_x) ظرفیت جذب بالایی (۱۷۴ mg/g) برای اورانیوم (VI) را نشان دادند. با این حال، بیشینه ظرفیت جذب تئوری اورانیوم توسط صفحات نانو $\text{V}_2\text{C}(\text{OH})_2$ پیش‌بینی شده توسط روش DFT بسیار بالاتر از نتیجه آزمایش صورت گرفته بود (۵۳۶ mg/g) [۸۳]. در مطالعه دیگر وانگ^۳ و همکارانش [۸۶]، فرآیند جذب کاهشی را برای جذب U (VI) توسط Ti_2CT_x نشان دادند. مکسین سبب جذب (VI) U با ظرفیت جذب ۴۷۰ mg/g و همچنین کاهش U (VI) به U (IV) می‌شود.



شکل ۱۵: چرخه‌های جذب-جذب جیوه (II) توسط نانوکامپوزیت

مغناطیسی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ [۴۶].

Figure 15: Adsorption-desorption cycles of Hg (II) removal using $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ magnetic nanocomposite [46].

یون‌های Pb (II) جذب شده از $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-KH570}$ با استفاده از Na_2EDTA ۰/۵ مولار شسته شده و جاذب در چهار چرخه با از دست دادن جزئی ظرفیت جذب مجدداً مورد استفاده قرار گرفت [۴۵]. علاوه بر مکسین‌ها، کامپوزیت‌های مبتنی بر مکسین نیز در حذف فلزات سنگین مختلف از فاز آبی از طریق جذب موثر واقع شده‌اند. بطور مثال شهزاد^۱ و همکارانش [۴۶]، نانوکامپوزیت‌های متشکل از نانوذرات مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ و Fe_2O_3 را تهیه و کارایی حذف آنها را برای جذب یون‌های Hg (II) بررسی کردند. بر این اساس سطح ویژه $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ از $56/51 \text{ m}^2/\text{g}$ به بیش از $68/39 \text{ m}^2/\text{g}$ افزایش یافت. کامپوزیت تهیه شده توسط این محققان ظرفیت فوق‌العاده بالای $1128/41 \text{ mg/g}$ را نشان داد و ۹۹/۹ درصد یون‌های Hg (II) را حذف کرد. مطالعات مختلف نشان داد که مکسین‌ها و کامپوزیت‌های بر پایه مکسین دارای پایداری بالایی هستند و پس از جذب فلزات سنگین، مواد رنگزا و رادیونوکلوئیدها می‌توانند دوباره بازیابی شده و مورد استفاده قرار گیرند. این محققان پس از جذب یون‌های جیوه (II) مجدداً از نانوکامپوزیت مغناطیسی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ استفاده کردند. نکته جالب توجه (همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است) بازده حذف در چهار دوره متوالی جذب و بازیابی است که بیش از ۹۰ درصد بوده است.

یانگ^۱ و همکارانش [۷۷] در یک آزمایش نانوصافی‌هایی متشکل از ذرات نانوآکسید آهن (Fe_3O_4) و مکسین‌ها را بر روی سطح غشای استات سلولز سنتز کردند. مشخص شد که شار آب و نسبت حذف یون‌های فلزات سنگین توسط این ماده نانوکامپوزیتی در مقایسه با غشای مکسین خام به طور قابل توجهی بهبود یافته است. همچنین

² Zou

³ Wang

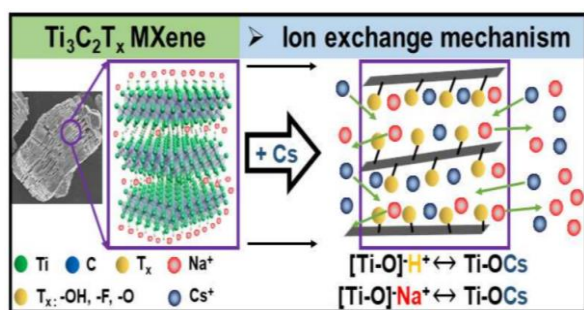
¹ Yang

هیدراته شده پس از جذب یون‌های Th (IV) بخوبی حفظ شده و می‌تواند دوباره استفاده شود [۸۵].

در مطالعه دیگری که توسط جون^۲ و همکارانش [۸۷] صورت گرفت، مکسین (Ti₃C₂T_x) ظرفیت جذب ۱۴۸ mg/g برای Cs⁺ را نشان داد. جذب Cs⁺ توسط مکسین عمدتاً به دلیل تبادل یونی اتفاق می‌افتد (شکل ۱۷). وجود یون‌های زمینه نیز به جذب Cs⁺ کمک می‌کند. تبادل یونی بین مکسین و یون‌های Na⁺ و Cs⁺ رخ می‌دهد که منجر به افزایش جذب Cs⁺ می‌شود. جدول ۳ خلاصه‌ای از عملکرد برخی مکسین‌های مورد مطالعه در حذف ماده رنگزا، فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها را ارائه کرده است.

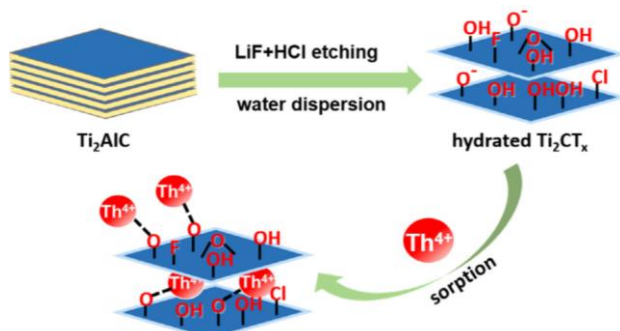
¹ Shahzad

² Jun



شکل ۱۷: سازوکار جذب Cs⁺ توسط مکسین [۸۷].

Figure 17: Plausible mechanism of Cs⁺ adsorption by MXene [87].



شکل ۱۶: طرح‌واره جذب توریم بر روی مکسین Ti₂CT_x [۸۵].

Figure 16: Schematic diagram of thorium sorption onto Ti₂CT_x MXene [85].

جدول ۳: برخی مکسین‌های (MXene) بکار گرفته شده به منظور حذف آلاینده‌های رنگی، فلزات سنگین و رادیونوکلئیدها.

Table 3: Some MXenes are used to remove dyes, heavy metals, and radionuclides pollutants.

مرجع	ظرفیت جذب (mg/g)	ایزوترم / سینتیک	شرایط جذب	جاذب	آلاینده	نوع آلاینده
[۵۱]	۱۰۰	لانگمویر	pH=۶-۶/۵ و T= ۲۵ °C	Ti ₃ C ₂ T _x	MB	ماده رنگزا
[۵۱]	۱۸۹	لانگمویر	pH= ۸/۸-۹ و T= ۲۵ °C	NaOH-Ti ₃ C ₂ T _x	MB	
[۵۱]	۱۲۱	لانگمویر	pH= ۸/۸-۹ و T= ۲۵ °C	LiOH-Ti ₃ C ₂ T _x	MB	
[۵۱]	۷۷	لانگمویر	pH= ۸/۸-۹ و T= ۲۵ °C	KOH-Ti ₃ C ₂ T _x	MB	
[۴۹]	۳۹	فریندلیش	t= ۲۰ h	Ti ₃ C ₂ T _x	MB	
[۵۲]	۹/۸۵	لانگمویر	T= ۵۵ °C و t= ۰/۵-۱۲ h	مکسین Ti ₃ C ₂ آرایش یافته با Fe ₃ O ₄	MB	
[۵۳]	۱۱۱/۱۱	لانگمویر / شبه درجه اول	pH = ۷, t= ۷۰ min T= ۲۹۸ K و	Ti ₃ C ₂ -SO ₃ H	MB	
[۸۹]	۲۴	-	t= ۲ h	Ti ₃ C ₂ هیدراته شده	MB	
[۹۰]	۱۴۰	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH= ۳/۵-۹/۵ t= ۰-۲۴ h T= ۲۹۳-۳۱۳ K	Ti ₃ C ₂ T _x	MB	

(ادامه جدول ۳)

مرجع	ظرفیت جذب (mg/g)	ایزوترم / سینتیک	شرایط جذب	جاذب	آلاینده	نوع آلاینده
[۵۵]	۲۰۹/۵	شبه درجه دوم	pH = ۷, t = ۶ h T = ۲۰ °C	Ti ₃ C ₂ T _x پیوند داده شده با ترفتالات	MB	ماده رنگزا
[۵۹]	۱۱/۶۸	لانگمویر / شبه درجه اول	pH = ۱۱/۳, t = ۲۴ h T = ۵۵ °C	Fe ₃ O ₄ @MXene	MB	
[۵۴]	۱۳۶/۲۴	شبه درجه دوم	t = ۱۰ h و T = ۲۹۸ K	Ti ₃ C ₂ -Co ₃ O ₄ نانو کامپوزیت	MB	
[۵۸]	۸۱/۹۷	لانگمویر	t = ۲۰۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene-COOH@(PEI/PAA) _n	MB	
[۵۸]	۴۰/۳۹	شبه درجه دوم	t = ۲۰۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene-COOH	MB	
[۵۸]	۳۹/۳۵	شبه درجه دوم	t = ۲۰۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene (Ti ₃ C ₂ (OH _x F _{1-x}) ₂)	MB	
[۴۹]	-	-	t = ۲۰ h	Ti ₃ C ₂ T _x	AB80	
[۵۸]	۴۷/۶۸۷	شبه درجه دوم	t = ۷۰۰ min	Ti ₃ C ₂ -Co ₃ O ₄ نانو کامپوزیت	Rhodamine B	
[۵۸]	۳۵/۶۰	شبه درجه دوم	t = ۱۸۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene-COOH@(PEI/PAA) _n	ST	
[۵۸]	۲/۸۶	شبه درجه دوم	t = ۱۸۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene-COOH	ST	
[۵۸]	۳۱/۶۳	شبه درجه دوم	t = ۱۸۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene(Ti ₃ C ₂ (OH _x F _{1-x}) ₂)	ST	
[۵۸]	۴۶/۱۲	شبه درجه دوم	t = ۲۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene-COOH@(PEI/PAA) _n	NR	
[۵۸]	۲۰/۱۶	شبه درجه دوم	t = ۲۵۰ min, T = ۲۹۸ K	MXene-COOH	NR	
[۶۲]	۷۸/۴۵	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH = ۵, t = ۳ min T = ۲۹۸ K	Ti ₃ C ₂ T _x	Cu (II)	
[۴۷]	۱۸/۳۶	لانگمویر / شبه درجه اول	pH = ۷ t = ۱ h, T = ۲۹۸ K	(Ti ₃ C ₂ T _x -PDOPA)	Cu (II)	
[۷۰]	۲۵۰	-	pH = ۵, t = ۷۲ h T = دمای اتاق	Ti ₃ C ₂ T _x	Cr (VI)	
[۶۵]	۸۰	-	t = ۱۴ h, T = ۲۹۸ K	Ti ₃ C ₂	Cr (VI)	
[۴۸]	۸۴	-	pH = ۵/۱۴ t = ۰-۵۰ h T = دمای محیط	فیلم با پایه مکسین Ti ₃ C ₂ T _x	Cr (VI)	
[۷۸]	۶۲	ردلیش پیترسون / شبه درجه دوم	pH = ۵/۸-۶/۵ t = ۱۰-۲۰ h T = ۲۹۸ K	Ti ₃ C ₂ (OH) _{0.8} F _{1.2}	Cr (VI)	
[۷۰]	۱۴۰/۱	-	pH = ۵/۸-۶/۲ t = ۲ min T = ۳۲۳ K	Ti ₃ C ₂ (OH/ONa) _x F _{2-x}	Pb (II)	
[۴۳]	۳۶/۶	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH = ۶, t = ۲ h T = ۲۹۳ K	Ti ₃ C ₂ T _x	Pb (II)	
[۴۴]	۲۳۹/۹	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH = ۵, t = ۲۴ h T = ۳۰ °C	Ti ₂ CT _x نانو ورقه‌های	Pb (II)	

(ادامه جدول ۳)

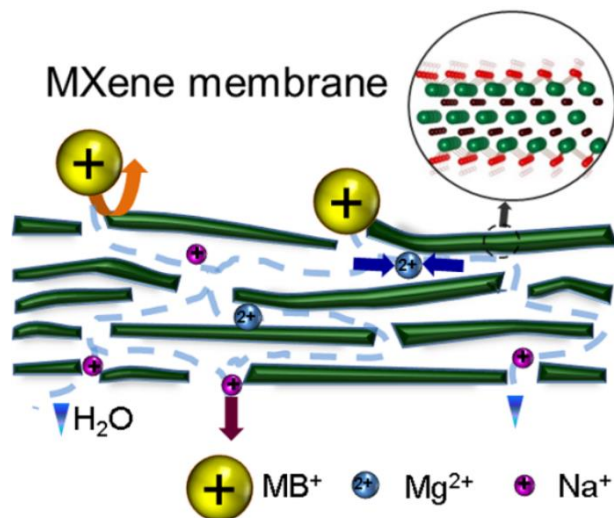
مرجع	ظرفیت جذب (mg/g)	ایزوترم / سینتیک	شرایط جذب	جاذب	آلاینده	نوع آلاینده
[۴۵]	۱۴۷/۹۷	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH= ۶-۱۱, t= ۲ h T= ۳۰ °C	Ti ₃ C ₂ T _x KH570	Pb (II)	فلزات سنگین
[۶۴]	۹/۳	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH= ۷, t= ۲ h T= ۲۵ °C	Ti ₃ C ₂ T _x	Ba (II)	
[۴۶]	۱۱۲۸/۴۱	ردلیش پیترسون / شبه درجه دوم	pH= ۶, t= ۲۴ h T= ۲۵ °C	نانو کامپوزیت Ti ₃ C ₂ T _x	Hg (II)	
[۴۸]	۹۳۲/۸۴	ردلیش پیترسون / شبه درجه دوم	pH= ۴/۵, t= ۲۴ h T= ۲۹۸ K	Ti ₃ C ₂ T _x هسته پسته سدیم الجینات	Hg (II)	
[۷۹]	۵۹۵/۳ (تئوری)	-	-	Ti ₃ C ₂ (OH) ₂	U (VI)	رادیونوکلئید
[۸۲]	۱۶۰	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH= ۵ T= دمای محیط	Ti ₃ C ₂ T _x چند لایه	U (VI)	
[۸۳]	۱۷۴	فرویندلیش و دوینین رادشکوچ / شبه درجه دوم	pH= ۵, t= ۴/۵ h T= دمای محیط	نانو ورقه‌های V ₂ CT _x	U (VI)	
[۸۳]	۵۳۶ (تئوری)	-	-	نانو ورقه‌های V ₂ CT _x	U (VI)	
[۸۶]	۴۷۰	شبه درجه دوم	pH= ۳, t= ۰-۱۰۰ h T= ۲۵ °C	Ti ₂ CT _x	U (VI)	
[۸۴]	۱۸۴/۵۶	لانگمویر / شبه درجه دوم	t= ۰-۵۰ h T= ۲۹۳ K	Ti ₃ C ₂ T _x	Pd (II)	
[۸۵]	۲۱۳/۲	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH= ۳, t= ۰-۱۲ h T= ۲۸۲-۳۱۲ K	Ti ₂ CT _x هیدراته شده	Th (IV)	
[۸۰]	۲۲۱/۷	لانگمویر / شبه درجه دوم	pH= ۴, t= ۰-۵ h T= ۲۹۸ K	Ti ₂ CT _x Na-HTNs	Eu (III)	
[۸۱]	۲۵/۴۲	ردلیش پیترسون / شبه درجه دوم	pH= ۶, t= ۳۰ min T= ۲۵ °C	Ti ₃ C ₂ T _x	Cs ⁺	
[۸۷]	۱۴۸	ردلیش پیترسون / شبه درجه دوم	pH= ۷, t= ۱ h T= ۳۱۳-۲۹۳ K	Ti ₃ C ₂ T _x	Cs ⁺	

۶- سایر کاربردهای مکسین‌ها در تصفیه آب

مکسین‌ها و کامپوزیت‌های مبتنی بر آن در سایر کاربردهای زیست‌محیطی مانند غشاهای دیونیزاسیون خازنی و به عنوان یک عامل ضدباکتری نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مکسین‌ها به دلیل آب دوست بودن، سطح زیاد، خصوصیات مکانیکی و الکتریکی بسیار عالی، به منظور استفاده در غشای تصفیه آب گزینه بسیار مناسبی محسوب می‌شوند [۹۱، ۹۲]. مولکول‌ها را می‌توان از طریق اندازه و بوسه‌لایه‌های انباشته‌شده و همچنین برهم‌کنش با لایه‌های مکسین دارای بار سطحی، جدا کرد (شکل ۱۸). یون‌های کوچک‌تر از آب را می‌توان به دلیل محدود بودن فاصله بین لایه مکسین‌ها حذف کرد. شار آب

از غشاهای مبتنی بر مکسین (Ti₃C₂T_x) زیاد بوده و غشاهای بر اساس بار و شعاع هیدراتاسیون یون، قابلیت تفکیک عالی برای یون‌های مختلف را نشان دادند [۹۳، ۹۴]. بطور مثال غشای مکسین لایه‌لایه بر روی بستر اکسید آلومینیم آندی، عملکرد مناسبی برای مولکول‌هایی با اندازه بزرگ‌تر از ۲/۵ nm را نشان داده است [۹۵]. مطالعات متعددی شار زیاد و قابلیت دفع نمک را در غشاهای مبتنی بر مکسین گزارش کردند [۹۶-۹۹]. مکسین (Ti₃C₂T_x) اصلاح شده با نانوذرات نقره نیز علاوه بر حذف موثر مواد رنگزا، خصوصیات ضدباکتری و ضدروسوب قوی نشان‌دهنده است [۱۷]. مکسین‌ها همچنین به دلیل هدایت الکتریکی بالا، آب‌دوستی و سطح قابل تنظیم می‌توانند در دیونیزاسیون خازنی (CDI) نیز استفاده شوند.

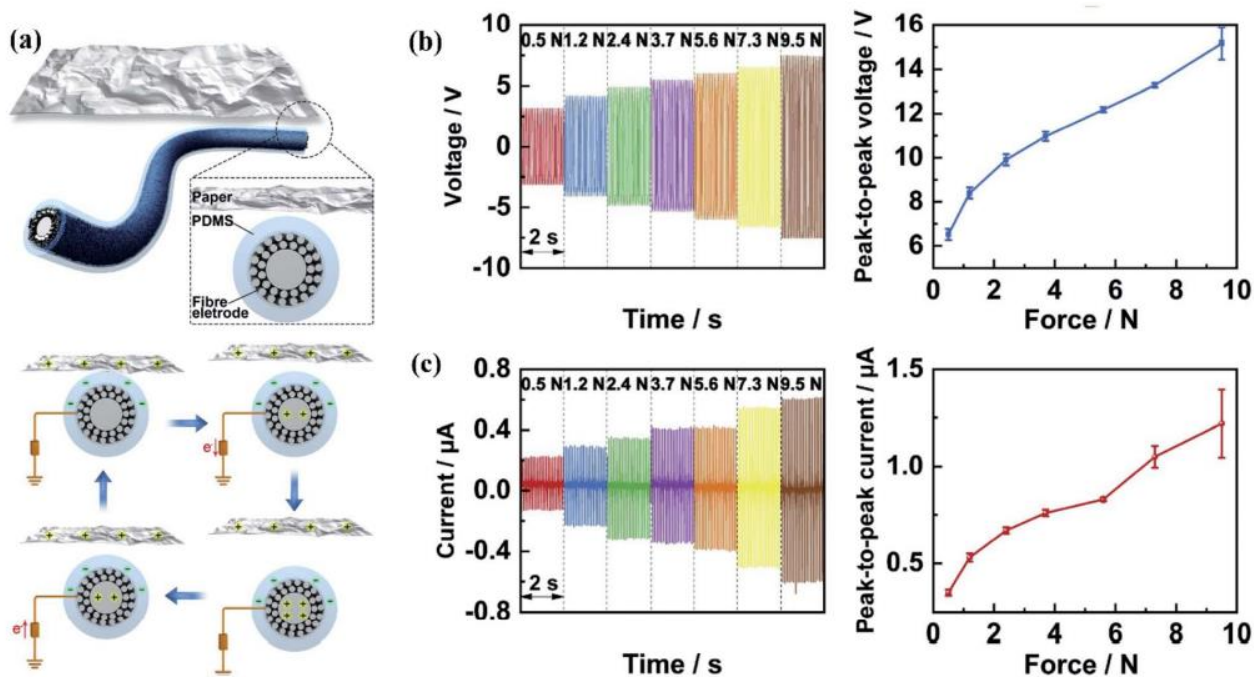
مشاهده می‌شود، از مکسین‌ها در تهیه نانوزراتورهای تریبولکتریک نیز استفاده شده است که توانایی تولید ۱۵ ولت و بیش از ۱/۲ میکروآمپر جریان را در اثر فشار ۱۰ نیوتونی با بسامد ۱۰ هرتز دارد. از سوی دیگر مکسین‌ها خصوصیات ضدباکتریایی منحصر به فردی را نیز در برابر باکتری‌های مختلف از جمله باکتری *Bacillus subtilis* و *Escherichia coli* نشان داده‌اند [۱۰۳]. مقاومت بالا در برابر سوخت‌زیستی، مکسین‌ها را برای کاربرد غشایی به گزینه‌ای مناسب تبدیل کرده است. ویژگی‌های ضدباکتریایی مکسین‌ها را می‌توان به ویژگی آنیونی سطح، از بین بردن مستقیم باکتری‌ها به دلیل تماس با سطح آب دوست و پیوند هیدروژنی بین غشای سلول و گروه‌های اکسیژن مکسین نسبت داد که مانع مصرف مواد مغذی می‌شود. ساختار اتمی مکسین‌ها نیز در خواص ضدباکتریایی آنها نقش بسزایی دارد [۱۰۴]. استفاده از مکسین‌ها در جداسازی آب و روغن نیز از دیگر کاربردهای گزارش شده توسط محققان می‌باشد [۱۰۵، ۹۲]. بطور مثال آئروژل‌های پلی‌آمید (PI)/MXene (بطور موثر پارافین مایع، روغن سویا و کلروفرم را از سیستم آب-روغن جدا کرده است [۱۰۵]. غشای مکسین ($Ti_3C_2T_x$) / کاغذی خاصیت ضد رسوب فوق‌العاده و بازده جداسازی بالا برای امولسیون‌های روغن/ آب را نشان داده است [۹۲].



شکل ۱۸: طرح‌واره جذب برخی کاتیون‌ها از طریق غشاهای مبتنی بر مکسین [۹۳].

Figure 18: Schematic of adsorption of some cations through MXene-based membranes [93].

بنابراین مکسین‌ها می‌توانند ترکیباتی مناسب در نمک‌زدایی آب در آینده باشند. الکتروود CDI مبتنی بر مکسین ظرفیت جذب قابل توجهی را برای هر دو کاتیون و آنیون به طور هم‌زمان نشان داده است [۱۰۲-۱۰۰]. علاوه بر موارد ذکر شده همانطور که در شکل ۱۹



تصویر ۱۹: (a) سازوکار عملکرد نانومولد تریبولکتریک الیاف الاستیک با پوشش PDMS/AgNPs/MXene (TENG) و جریان الکترون‌ها. اندازه‌گیری، (b) ولتاژ تولیدی و (c) جریان تولیدی در اثر نیروهای اعمالی متغیر در بسامد ثابت ۱۰ هرتز [۱۰۶].

Figure 19: (a) Working principle of the PDMS/AgNPs/MXene-coated elastic fiber triboelectric nanogenerator (TENG) and the flow of electrons. Realtime measurement of, (b) voltage generation, and (c) current generation with variable applied forces at a constant frequency of 10 Hz [106].

موثرتر در رفع آلاینده‌های شیمیایی و هسته‌ای و همچنین سایر حوزه‌های کاربردی ضرورت دارد. مکسین‌ها و نانومواد برپایه مکسین را می‌توان نسل بعدی ترکیبات و جاذب‌های مورد استفاده در تصفیه آب و پساب به شمار آورد که از قابلیت بازیابی و استفاده مجدد در سامانه‌های تصفیه پساب با حفظ عملکرد موثر و بازده بالا و همچنین پایداری مناسب برخوردار هستند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نگارندگان مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه یزد برای انجام این مطالعه سپاسگزار می‌نمایند.

۷- نتیجه‌گیری

مکسین‌ها به‌عنوان نانومواد دو بعدی نوظهور، به دلیل برخورداری از خصوصیات منحصر بفرد نظیر سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی بالا، هدایت حرارتی/الکتریکی قابل توجه، و خواص ضد میکروبی، کاربردهای متنوعی در حوزه‌های مختلف نظیر ذخیره انرژی، محافظت الکترومغناطیسی، حسگرهای زیستی و گازی، کاتالیزورهای فتوالکتروشیمیایی و تصفیه پساب نشان داده است. اگرچه مطالعات زیادی در زمینه استفاده از مکسین‌ها و کامپوزیت‌های مبتنی بر آن در زمینه تصفیه پساب‌های صنعتی و هسته‌ای صورت گرفته است، با این حال طراحی و توسعه خلاقانه چنین ترکیباتی برای بکارگیری

۸- مراجع

1. S. Khalid, M. Shahid, Natasha, I. Bibi, T. Sarwar, A. H. Shah, N. K. Niazi, "A review of environmental contamination and health risk assessment of wastewater use for crop irrigation with a focus on low and high-income countries". *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, 1-36, **2018**.
2. V. Gitis, N. Hankins, "Water treatment chemicals: Trends and challenges", *J. Water Process Eng.* 25, 34-38, 2018.
3. B. C. Hodges, E. L. Cates, J. H. Kim, "Challenges and prospects of advanced oxidation water treatment processes using catalytic nanomaterials", *Nat. Nanotechnol.*, <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0216-x>, **2018**.
4. Choudhary, M., Peter, C. N., Shukla, S. K., Govender, P. P., Joshi, G. M., & Wang, R. (2020). "Environmental Issues: A Challenge for Wastewater Treatment", 13, 642-650, 2018.
5. A. Noorani Sanjabad, A. Nematollahzadeh, N. Sepehri Javan, "Decolorization and Treatment of Colored Wastewater Using Dielectric Barrier Discharge Cold Plasma Reactor", *J. Stud. Color World*, 11, 35-48, **2021**.
6. M. Hasanzadeh, A. Simchi, H. Shahriyari Far, "Nanoporous composites of activated carbon-metal organic frameworks for organic dye adsorption: Synthesis adsorption mechanism and kinetics studies", *J. Ind. Eng. Chem.* 81, 405-414, **2020**.
7. H. Shahriyari Far, M. Hasanzadeh, M. Najafi, T. R. Masale Nezhad, M. Rabbani, "Efficient removal of Pb(II) and Co(II) ions from aqueous solution with a chromium-based metal-organic framework/activated carbon composites", *Ind. Eng. Chem. Res.* 60, 4332-4341, **2021**.
8. H. S. Far, M. Hasanzadeh, M. S. Nashtaei, M. Rabbani, A. Haji, B. Hadavi Moghadam, "PPI-Dendrimer-Functionalized Magnetic Metal-Organic Framework (Fe₃O₄@MOF@PPI) with High Adsorption Capacity for Sustainable Wastewater Treatment", *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 12, 25294-25303, **2020**.
9. Y. A. J. Al-Hamadani, B. M. Jun, M. Yoon, N. Taheri-Qazvini, S. A. Snyder, M. Jang, Y. Yoon, "Applications of MXene-based membranes in water purification: A review" *Chemosphere*, 254, 126821, **2020**.
10. F. Khosravi, M. Soltan, M. Hajiani, A. Haji, "Application of Polymeric Nanofibers for Removal of Dyes" *Graphical abstract*, *J. Stud. Color World*, 9, 39-62, **2019**.
11. M. Hasanzadeh, A. Simchi, H. S. Far, "Kinetics and adsorptive study of organic dye removal using water-stable nanoscale metal organic frameworks", *Mater. Chem. Phys.*, 233, 267-275, **2019**.
12. H. S. Far, M. Hasanzadeh, M. S. Nashtaei, M. Rabbani, "Fast and efficient adsorption of palladium from aqueous solution by magnetic metal-organic framework nanocomposite modified with poly(propylene imine) dendrimer", *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 62474-62486, **2021**.
13. M. Jeon, B. M. Jun, S. Kim, M. Jang, C. M. Park, S. A. Snyder, Y. Yoon, "A review on MXene-based nanomaterials as adsorbents in aqueous solution", *Chemosphere*, 261, 127781, **2020**.
14. J. C. Lei, X. Zhang, Z. Zhou, "Recent advances in MXene: Preparation, properties, and applications", *Front. Phys.*, 10, 276-286, **2015**.
15. M. Ghidui, M. Naguib, C. Shi, O. Mashtalir, L. Pan, M. Zhang, M. W. Barsoum, "Synthesis and characterization of two-dimensional Nb₄C₃ (MXene)" *Chem. Commun.* 50, 9517-9520, **2014**.
16. M. Naguib, O. Mashtalir, J. Carle, V. Presser, J. Lu, L. Hultman, M. W. Barsoum, "Two-dimensional transition metal carbides", *ACS Nano*, 6, 1322-1331, **2012**.
17. M. R. Lukatskaya, O. Mashtalir, C. E. Ren, Y. Dall'Agnese, P. Rozier, P. L. Taberna, Y. Gogotsi, "Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide", *Sci.* 341, 1502-1505, **2013**.
18. K. Rasool, R. P. Pandey, P. A. Rasheed, S. Buczek, Y. Gogotsi, K. A. Mahmoud, "Water treatment and environmental remediation applications of two-dimensional metal carbides (MXenes)", *Mater. Today*, 30, 80-102, **2019**.
19. P. Eklund, M. Beckers, U. Jansson, H. Högberg, L. Hultman, "The Mn + 1AX_n phases: Materials science and thin-film processing", *Thin Solid Films*, 518, 1851-1878, 2010.
20. M. W. Barsoum, "MN+1AX_n phases: a new class of solids; thermodynamically stable nanolaminates", *Prog. Solid State Chem.* 28, 201-281, **2000**.
21. M. W. Barsoum, M. Radovic, "Elastic and mechanical properties of the MAX phases", *Annu. Rev. Mater. Res.* 41, 195-227, 2011.
22. A. J. Nathan, A. Scobell, "How china sees america. in intergovernmental panel on climate change", *Ed. Int. Aff (Vol. 91, pp. 1-30)*, Cambridge: Cambridge University Press. **2012**.
23. M. A. Pietzka, J. C. Schuster, "Phase equilibria in the quaternary system Ti-Al-C-N", *J. Am. Ceram. Soc.* 79, 2321-2330, **1996**.
24. R. M. Ronchi, J. T. Arantes, S. F. Santos, "Synthesis, structure,

- properties and applications of MXenes: Current status and perspectives", *Ceram. Int.* 45, 18167–18188, **2019**.
25. M. Carey, M. W. Barsoum, "MXene polymer nanocomposites: a review" *Mater. Today Adv.* 9, 100120, **2021**.
 26. M. Naguib, V. N. Mochalin, M. W. Barsoum, Y. Gogotsi, "MXenes: A new family of two-dimensional materials", *Adv. Mater.* 26, 992–1005, **2014**.
 27. P. Srivastava, A. Mishra, H. Mizuseki, K. R. Lee, A. K. Singh, "Mechanistic Insight into the Chemical Exfoliation and Functionalization of Ti₃C₂ MXene", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 24256–24264, **2016**.
 28. T. Hu, M. Hu, Z. Li, H. Zhang, C. Zhang, J. Wang, X. Wang, "Interlayer coupling in two-dimensional titanium carbide MXenes", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18, 20256–20260, **2016**.
 29. Z. Li, L. Wang, D. Sun, Y. Zhang, B. Liu, Q. Hu, A. Zhou, "Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti₃C₂", *Mater. Sci. Eng. B: Solid-State Mater. Adv. Technol.* 191, 33–40, **2015**.
 30. M. Khazaei, M. Arai, T. Sasaki, C. Y. Chung, N. S. Venkataraman, M. Estili, Y. Kawazoe, "Novel electronic and magnetic properties of two-dimensional transition metal carbides and nitrides", *Adv. Funct. Mater.*, 23, 2185–2192, **2013**.
 31. M. Khazaei, A. Ranjbar, K. Esfarjani, D. Bogdanovski, R. Dronskowski, S. Yunoki, "Insights into exfoliation possibility of MAX phases to MXenes", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 20, 8579–8592, **2018**.
 32. J. Zhou, S. Gao, Z. Guo, Z. Sun, "Ti-enhanced exfoliation of V₂AlC into V₂C MXene for lithium-ion battery anodes", *Ceram. Int.* 43, 11450–11454, **2017**.
 33. A. N. Enyashin, A. L. Ivanovskii, "Two-dimensional titanium carbonitrides and their hydroxylated derivatives: Structural, electronic properties and stability of MXenes Ti₃C₂-xN_x(OH)₂ from DFTB calculations", *J. Solid State Chem.*, 207, 42–48, **2013**.
 34. N. K. Chaudhari, H. Jin, B. Kim, D. San Baek, S. H. Joo, K. Lee, "MXene: An emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications", *J. Mater. Chem. A*, 5, 24564–24579, **2017**.
 35. K. Vikrant, B. S. Giri, N. Raza, K. Roy, K. H. Kim, B. N. Rai, R. S. Singh, "Recent advancements in bioremediation of dye: Current status and challenges", *Bioresour. Technol.* 253, 355–367, **2018**.
 36. T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, P. Nigam, "Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative", *Bioresour. Technol.* 77, 247–255, **2001**.
 37. M. T. Yagub, T. K. Sen, S. Afroze, H. M. Ang, "Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review", *Adv. Colloid Interface Sci.* 209, 172–184, **2014**.
 38. M. A. Rauf, S. Salman Ashraf, "Survey of recent trends in biochemically assisted degradation of dyes", *Chem. Eng. J.* 209, 520–530, **2012**.
 39. E. Forgacs, T. Cserhádi, G. Oros, "Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review", *Environ. Int.* 30, 953–971, **2004**.
 40. N. I. Blaisi, M. Zubair, A. S. Ihsanullah, T. S. Kazeem, M. S. Manzar, M. A. Al Harthi, "Date palm ash-MgAl-layered double hydroxide composite: sustainable adsorbent for effective removal of methyl orange and eriochrome black-T from aqueous phase", *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 34319–34331, **2018**.
 41. M. Zubair, N. I. Jarrar, A. Khalid, M. S. Manzar, T. S. Kazeem, M. A. Al-Harthi, "Starch-NiFe-layered double hydroxide composites: Efficient removal of methyl orange from aqueous phase", *J. Mol. Liq.* 249, 254–264, **2017**.
 42. A. Khalid, M. I. Zubair, "A Comparative Study on the Adsorption of Eriochrome Black T Dye from Aqueous Solution on Graphene and Acid-Modified Graphene", *Arab J Sci Eng.* 43, 2167–2179, **2018**.
 43. B. M. Jun, N. Her, C. M. Park, Y. Yoon, "Effective removal of Pb(II) from synthetic wastewater using Ti₃C₂T_x MXene", *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 6, 173–180, **2020**.
 44. S. Wang, Y. Liu, Q. F. Lü, H. Zhuang, "Facile preparation of biosurfactant-functionalized Ti₂CT_x MXene nanosheets with an enhanced adsorption performance for Pb(II) ions", *J. Mol. Liq.* 297, 111810, **2020**.
 45. Y. Du, B. Yu, L. Wei, Y. Wang, X. Zhang, S. Ye, "Efficient removal of Pb(II) by Ti₃C₂T_x powder modified with a silane coupling agent", *J. Mater. Sci.* 54, 13283–13297, **2019**.
 46. A. Shahzad, K. Rasool, W. Miran, M. Nawaz, J. Jang, K. A. Mahmoud, D. S. Lee, "Mercuric ion capturing by recoverable titanium carbide magnetic nanocomposite", *J. Hazard. Mater.* 344, 811–818, **2018**.
 47. D. Gan, Q. Huang, J. Dou, H. Huang, J. Chen, M. Liu, Y. Wei, "Bioinspired functionalization of MXenes (Ti₃C₂T_x) with amino acids for efficient removal of heavy metal ions", *Appl. Surf. Sci.* 504, 144603, **2019**.
 48. A. Shahzad, M. Nawaz, M. Moztahida, J. Jang, K. Tahir, J. Kim, D. S. Lee, "Ti₃C₂T_x MXene core-shell spheres for ultrahigh removal of mercuric ions", *Chem. Eng. J.* 368, 400–408, **2019**.
 49. O. Mashtalir, K. M. Cook, V. N. Mochalin, M. Crowe, M. W. Barsoum, Y. Gogotsi, "Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media", *J. Mater. Chem. A*, 2, 14334–14338, **2014**.
 50. Y. Gao, L. Wang, A. Zhou, Z. Li, J. Chen, H. Bala, "Hydrothermal synthesis of TiO₂/Ti₃C₂ nanocomposites with enhanced photocatalytic activity", *Mater. Lett.* 150, 62–64, **2015**.
 51. Z. Wei, Z. Peigen, T. Wubian, Q. Xia, Z. Yamei, S. ZhengMing, "Alkali treated Ti₃C₂T_x MXenes and their dye adsorption performance", *Mater. Chem. Phys.* 206, 270–276, **2018**.
 52. Z. Zhu, M. Xiang, L. Shan, T. He, P. Zhang, "Effect of temperature on methylene blue removal with novel 2D-Magnetism titanium carbide" *J. Solid State Chem.* 280, 120989, **2019**.
 53. Y. Lei, Y. Cui, Q. Huang, J. Dou, D. Gan, F. Deng, Y. Wei, "Facile preparation of sulfonic groups functionalized MXenes for efficient removal of methylene blue", *Ceram. Int.* 45, 17653–17661, **2019**.
 54. S. Luo, R. Wang, J. Yin, T. Jiao, K. Chen, G. Zou, Q. Peng, "Preparation and dye degradation performances of self-assembled MXene-Co₃O₄ nanocomposites synthesized via solvothermal approach", *ACS Omega*, 4, 3946–3953, **2019**.
 55. M. Vakili, G. Cagnetta, J. Huang, G. Yu, J. Yuan, "Synthesis and regeneration of a MXene-based pollutant adsorbent by mechanochemical methods. *Molecules*", 24, 2478, **2019**.
 56. B. Sun, X. Dong, H. Li, Y. Shang, Y. Zhang, F. Hu, G. Zhou, "Surface charge engineering for two-dimensional Ti₂CT_x MXene for highly efficient and selective removal of cationic dye from aqueous solution", *Sep. Purif. Technol.* Doi: 10.1016/J.SEPPUR.2021.118964, **2021**.
 57. P. Karthikeyan, K. Ramkumar, K. Pandi, A. Fayyaz, S. Meenakshi, C. M. Park, "Effective removal of Cr(VI) and methyl orange from the aqueous environment using two-dimensional (2D) Ti₃C₂T_x MXene nanosheets", *Ceram. Int.* Doi: 10.1016/j.ceramint.2020.09.221, **2021**.
 58. K. Li, G. Zou, T. Jiao, R. Xing, L. Zhang, J. Zhou, Q. Peng, "Self-assembled MXene-based nanocomposites via layer-by-layer strategy for elevated adsorption capacities", *Colloids Surf. A*, 553, 105–113, **2018**.
 59. P. Zhang, M. Xiang, H. Liu, C. Yang, S. Deng, "Novel two-dimensional magnetic titanium carbide for methylene blue

- removal over a wide pH range: insight into removal performance and mechanism", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 24027–24036, **2019**.
60. A. Ihsanullah, A. M. Al-Amer, T. Laoui, M. J. Al-Marri, M. S. Nasser, M. A. Atieh, "Heavy metal removal from aqueous solution by advanced carbon nanotubes: Critical review of adsorption applications", *Sep. Purif. Technol.* 157, 141–161, **2016**.
 61. F. Ihsanullah, A. Al-Khalidi, B. Abusharkh, M. Khaled, M. A. Atieh, M. S. Nasser, V. K. Gupta, "Adsorptive removal of cadmium(II) ions from liquid phase using acid modified carbon-based adsorbents", *J. Mol. Liq.* 204, 255–263, **2015**.
 62. A. Shahzad, K. Rasool, W. Miran, M. Nawaz, J. Jang, K. A. Mahmoud, D. S. Lee, "Two-dimensional Ti₃C₂T_x MXene nanosheets for efficient copper removal from water", *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5, 11481–11488, **2017**.
 63. Y. Ying, Y. Liu, X. Wang, Y. Mao, W. Cao, P. Hu, X. Peng, (). "Two-dimensional titanium carbide for efficiently reductive removal of highly toxic chromium(VI) from water" *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, 1795–1803, **2015**.
 64. A. K. Fard, G. McKay, R. Chamoun, T. Rhadfi, H. Preud'Homme, M. A. Atieh, "Barium removal from synthetic natural and produced water using MXene as two dimensional (2-D) nanosheet adsorbent", *Chem. Eng. J.* 317, 331–342, **2017**.
 65. Y. Tang, C. Yang, W. Que, "A novel two-dimensional accordion-like titanium carbide (MXene) for adsorption of Cr(VI) from aqueous solution", *J. Adv. Dielectr.* 8, 1850035, **2018**.
 66. M. Khajeh Mehrizi, Z. Shahi, "The study of effective factors on the removal of heavy metals from wastewater by using adsorbents materials (biosorbents- natural)", *J. Stud. Color World*, 9, 15-26, 2019.
 67. T. K. Sen, "Review on dye removal from its aqueous solution into alternative cost effective and non-conventional adsorbents", *Chem. Eng. Process*, Doi: 10.17303/jce.2014.105, 2013
 68. V. Gupta, K. Suhas. "Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review", *J. Environ. Manage.* 90, 2313–2342, 2009
 69. M. Valix, W. H. Cheung, G. McKay, "Preparation of activated carbon using low temperature carbonisation and physical activation of high ash raw bagasse for acid dye adsorption", *Chemosphere*. 56, 493–501, **2004**.
 70. Q. Peng, J. Guo, Q. Zhang, J. Xiang, B. Liu, A. Zhou, Y. Tian, "Unique lead adsorption behavior of activated hydroxyl group in two-dimensional titanium carbide", *JACS*, 136, 4113–4116, **2014**
 71. J. Acharya, J. N. Sahu, B. K. Sahoo, C. R. Mohanty, B. C. Meikap, "Removal of chromium(VI) from wastewater by activated carbon developed from Tamarind wood activated with zinc chloride", *Chem. Eng. J.* 150, 25–39, **2009**.
 72. H. Demiral, I. Demiral, F. Tümsük, B. Karabacakoglu, "Adsorption of chromium(VI) from aqueous solution by activated carbon derived from olive bagasse and applicability of different adsorption models", *Chem. Eng. J.* 144, 188–196, **2008**.
 73. B. W. Waweru, I. W. Mwangi, J. Murungi, R. N. Wanjau, T. A. M. Msagati, R. Manohah, "Remediation of lead, cadmium and copper polluted waters by onion skins (*Allium Cepa*)", *Int. J. Agric. Innov. Res.* 4, 2319–1473, **2016**.
 74. A. A. Ismaiel, M. K. Aroua, R. Yusoff, "Palm shell activated carbon impregnated with task-specific ionic-liquids as a novel adsorbent for the removal of mercury from contaminated water", *Chem. Eng. J.* 225, 306–314, **2013**
 75. R. Foroutan, R. Mohammadi, S. Farjadfard, H. Esmaili, B. Ramavandi, G. A. Sorial, "Eggshell nano-particle potential for methyl violet and mercury ion removal: Surface study and field application", *Adv. Powder Technol.* 30, 2188–2199, **2019**
 76. R. P. Pandey, R. K. Asool, P. A. Rasheed, K. A. Mahmoud, "Reductive sequestration of toxic bromate from drinking water using lamellar two-dimensional Ti₃C₂T_x (MXene)", *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 7910–7917, **2018**.
 77. X. Yang, Y. Liu, S. Hu, F. Yu, Z. He, G. Zeng, A. Sengupta, "Construction of Fe₃O₄@MXene composite nanofiltration membrane for heavy metal ions removal from wastewater", *Polym. Adv. Technol.* 32, 1000–1010, **2021**
 78. G. Zou, J. Guo, Q. Peng, A. Zhou, Q. Zhang, B. Liu, "Synthesis of urchin-like rutile titania carbon nanocomposites by iron-facilitated phase transformation of MXene for environmental remediation", *J. Mater. Chem. A*, 4, 489–499, **2015**
 79. Y. J. Zhang, J. H. Lan, L. Wang, Q. Y. Wu, C. Z. Wang, T. Bo, W. Q. Shi, "Adsorption of uranyl species on hydroxylated titanium carbide nanosheet: A first-principles study", *J. Hazard. Mater.* 308, 402–410, **2016**.
 80. P. Zhang, L. Wang, L. Y. Yuan, J. H. Lan, Z. F. Chai, W. Q. Shi, "Sorption of Eu(III) on MXene-derived titanate structures: The effect of nano-confined space", *Chem. Eng. J.* 370, 1200–1209, **2019**
 81. A. R. Khan, H. S. M. Usnain, F. Shahzad, S. Mujtaba-Ul-Hassan, M. Mehmood, J. Ahmad, S. Rahman, "Two-dimensional transition metal carbide (Ti₃C₂T_x) as an efficient adsorbent to remove cesium (Cs⁺)", *Dalton Trans.* 48, 11803–11812, **2019**.
 82. L. Wang, W. Tao, L. Yuan, Z. Liu, Q. Huang, Z. Chai, W. Shi, "Rational control of the interlayer space inside two-dimensional titanium carbides for highly efficient uranium removal and imprisonment", *Chem. Commun.* 53, 12084–12087, **2017**.
 83. L. Wang, L. Yuan, K. Chen, Y. Zhang, Q. Deng, S. Du, W. Shi, "Loading actinides in multilayered structures for nuclear waste treatment: The first case study of uranium capture with vanadium carbide MXene", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 16396–16403, **2016**.
 84. W. Mu, S. Du, X. Li, Q. Yu, H. Wei, Y. Yang, S. Peng, "Removal of radioactive palladium based on novel 2D titanium carbides", *Chem. Eng. J.* 358, 283–290, **2019**.
 85. S. Li, L. Wang, J. Peng, M. Zhai, W. Shi, "Efficient thorium(IV) removal by two-dimensional Ti₂CT_x MXene from aqueous solution", *Chem. Eng. J.* 366, 192–199, **2019**
 86. L. Wang, H. Song, L. Yuan, Z. Li, Y. Zhang, J. K. Gibson, W. Shi, "Efficient U(VI) reduction and sequestration by Ti₂CT_x MXene", *Environ. Sci. Technol.* 52, 10748–10756, **2018**.
 87. B. M. Jun, M. Jang, C. M. Park, J. Han, Y. Yoon, "Selective adsorption of Cs⁺ by MXene (Ti₃C₂T_x) from model low-level radioactive wastewater" *Nucl. Eng. Technol.* 52, 1201–1207, **2020**
 88. Y. J. Zhang, Z. J. Zhou, J. H. Lan, C. C. Ge, Z. F. Chai, P. Zhang, W. Q. Shi, "Theoretical insights into the uranyl adsorption behavior on vanadium carbide MXene" *Appl. Surf. Sci.* 426, 572–578, **2017**.
 89. C. Peng, P. Wei, X. Chen, Y. Zhang, F. Zhu, Y. Cao, F. Peng, "A hydrothermal etching route to synthesis of 2D MXene (Ti₃C₂Nb₂C): Enhanced exfoliation and improved adsorption performance", *Ceram. Int.* 44, 18886–18893, **2018**.
 90. B. M. Jun, J. Heo, N. Taheri-Qazvini, C. M. Park, Y. Yoon, "Adsorption of selected dyes on Ti₃C₂T_x MXene and Al-based metal-organic framework", *Ceram. Int.* 46, 2960–2968, **2020**.
 91. Zha, X. J., Zhao, X., J. H. Pu, L. S. Tang, K. Ke, R. Y. Bao, W. Yang, "Flexible anti-Biofouling MXene/Cellulose fibrous membrane for sustainable solar-driven water purification", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 36589–36597, **2019**.
 92. J. Saththasivam, K. Wang, W. Yiming, Z. Liu, K. A. Mahmoud, "A flexible Ti₃C₂T_x (MXene)/paper membrane for efficient oil/water separation", *RSC Advances*, 9, 16296–16304,

- 2019.**
93. C. E. Ren, K. B. Hatzell, M. Alhabeb, Z. Ling, K. A. Mahmoud, Y. Gogotsi, "Charge- and size-selective ion sieving through Ti₃C₂T_x MXene membranes", *J. Phys. Chem. Lett.* 6, 4026–4031, **2015**.
 94. H. Zhou, Y. Wang, F. Wang, H. Deng, Y. Song, C. Li, Z. Ling, "Water permeability in MXene membranes", *Process matters. Chin. Chem. Lett.* 31, 1665–1669, **2020**.
 95. L. Ding, Y. Wei, Y. Wang, H. Chen, J. Caro, H. Wang, "A Two-dimensional lamellar membrane: MXene nanosheet stacks", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 56, 1825–1829, 2017.
 96. T. Liu, X. Liu, N. Graham, W. Yu, K. Sun, "Two-dimensional MXene incorporated graphene oxide composite membrane with enhanced water purification performance", *J. Membr. Sci.* 593, 117431, **2020**
 97. G. Liu, J. Shen, Q. Liu, G. Liu, J. Xiong, J. Yang, W. Jin, "Ultrathin two-dimensional MXene membrane for pervaporation desalination", *J. Membr. Sci.* 548, 548–558, **2018**.
 98. R. Han, X. Ma, Y. Xie, D. Teng, S. Zhang, "Preparation of a new 2D MXene/PES composite membrane with excellent hydrophilicity and high flux", *RSC Advances*, 7, 56204–56210, **2017**.
 99. K. M. Kang, D. W. Kim, C. E. Ren, K. M. Cho, S. J. Kim, J. H. Choi, H. T. Jung, "Selective molecular separation on Ti₃C₂T_x-graphene oxide membranes during pressure-driven filtration: comparison with graphene oxide and MXenes", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 44687–44694, **2017**.
 100. P. Srimuk, F. Kaasik, B. Krüner, A. Tolosa, S. Fleischmann, N. Jäckel, V. Presser, "MXene as a novel intercalation-type pseudocapacitive cathode and anode for capacitive deionization", *J. Mater. Chem. A*, 4, 18265–18271, **2016**.
 101. P. Srimuk, J. Halim, J. Lee, Q. Tao, J. Rosen, V. Presser, "Two-dimensional molybdenum carbide (MXene) with divacancy ordering for brackish and seawater desalination via cation and anion intercalation", *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 3739–3747, **2018**.
 102. W. Bao, X. Tang, X. Guo, S. Choi, C. Wang, Y. Gogotsi, G. Wang, "Porous cryo-Dried MXene for efficient capacitive deionization", *Joule*, 2, 778–787, **2018**.
 103. K. Rasool, M. Helal, A. Ali, C. E. Ren, Y. Gogotsi, K. A. Mahmoud, "Antibacterial activity of Ti₃C₂T_x MXene", *ACS Nano*, 10, 3674–3684, **2016**.
 104. A. M. Jastrzębska, E. Karwowska, T. Wojciechowski, W. Ziemkowska, A. Rozmysłowska, L. Chlubny, A. Olszyna, "The atomic structure of Ti₂C and Ti₃C₂ MXenes is responsible for their antibacterial activity toward E. coli bacteria", *J. Mater. Eng.* 28, 1272–1277, **2019**.
 105. N. N. Wang, H. Wang, Y. Y. Wang, Y. H. Wei, J. Y. Si, A. C. Y. Yuen, G. H. Yeoh, "Robust, Lightweight, Hydrophobic, and fire-Retarded polyimide/MXene aerogels for effective oil/water separation", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 40512–40523, **2019**.
 106. M. M. Hasan, M. M. Hossain, H. K. Chowdhury, "Two-dimensional MXene-based flexible nanostructures for functional nanodevices: a review", *J. Mater. Chem. A*, 9, 3231–3269, **2021**.

How to cite this article:

H Milad Atighi, M. Hasanzadeh, Application of MXene and Its Composites in the Removal of Dyes, Heavy metals and Radionuclides Pollutant From Industrial and Nuclear Wastewater, *J. Stud. Color world*, 11, 4(2021), 13-32.

DOR: 20.1001.1.22517278.1400.11.4.2.6