



## کاربردهای نانومواد MXenes در تصفیه آب و فاضلاب

سعید هاشمی<sup>۱</sup>، فاطمه عباسی<sup>۱</sup>، نسیمه حاجیلری<sup>۱\*</sup>

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

### چکیده

با افزایش صنایع و صنعتی شدن جوامع آلودگی های آب تشدید و نیاز به فرآیندهای تصفیه آب و فاضلاب و مواد افزایش پیدا کرده است. در این زمینه MXenes به عنوان گروهی جدید از مواد دو بعدی که به عنوان نانوصفحات فلزی عامل دار شده کاربردی/نیتريدی نیز شناخته می شوند به دلیل ویژگی های منحصر به فرد و دامنه کاربردهای بالقوه صنعتی، توجه جهانی محققان را به خود جلب کرده اند. در این مطالعه ضمن بررسی روند سنتز مکسین و معرفی ساختارهای متنوع آن، مشخص شد که MXene به دلیل وجود سطح ویژه بالا ساختارهای صفحه ای، خاصیت آب دوستی بالا و احیای مناسب ترکیب مناسبی برای جداسازی نیترات ها و همین طور توقف رشد باکتری ها ایجاد می کند. همچنین استفاده از آن ها در حذف رنگ ها باعث افزایش پایداری ساختار غشایی و جلوگیری از انباشتگی ذرات می شود. علاوه بر این، MXene ها به دلیل سرعت جذب بالا و گزینش پذیری مناسب، می توانند به خوبی در جداسازی پسماندهای هسته ای به کار گرفته شوند.

کلید واژه ها: MXene، نانوصفحات دو بعدی، آنتیباکتریال، تصفیه آب و فاضلاب



## **Applications of MXenes nanomaterials in water and wastewater treatment**

**Saeed Hashemi<sup>1</sup>, Fateme Abbasi<sup>1</sup>, Nasibeh Hajilary<sup>\*1</sup>**

1- Department of chemical engineering, Engineering Faculty, Golestan University, Gorgan, Iran

### **Abstract**

With the increase of industries and industrialization of societies, water pollution has intensified and the need for water, wastewater and materials treatment processes has increased. In this regard, MXenes as a new group of two-dimensional materials, also known as carbide / nitride functionalized metal nanosheets, have attracted the global attention of researchers due to their unique properties and range of potential industrial applications. In this study, meanwhile examining the synthesis of MXene and introducing its various structures, it was found that MXene, due to the high specific surface area of plate structures, high hydrophilicity and proper regeneration creates a suitable combination for nitrate separation as well as inhibition of bacterial growth. Also, their use in removing dyes increases the stability of the membrane structure and prevents the agglomeration of particles. In addition, MXene can be well used in the separation of nuclear waste due to its high adsorption rate and good selectivity.

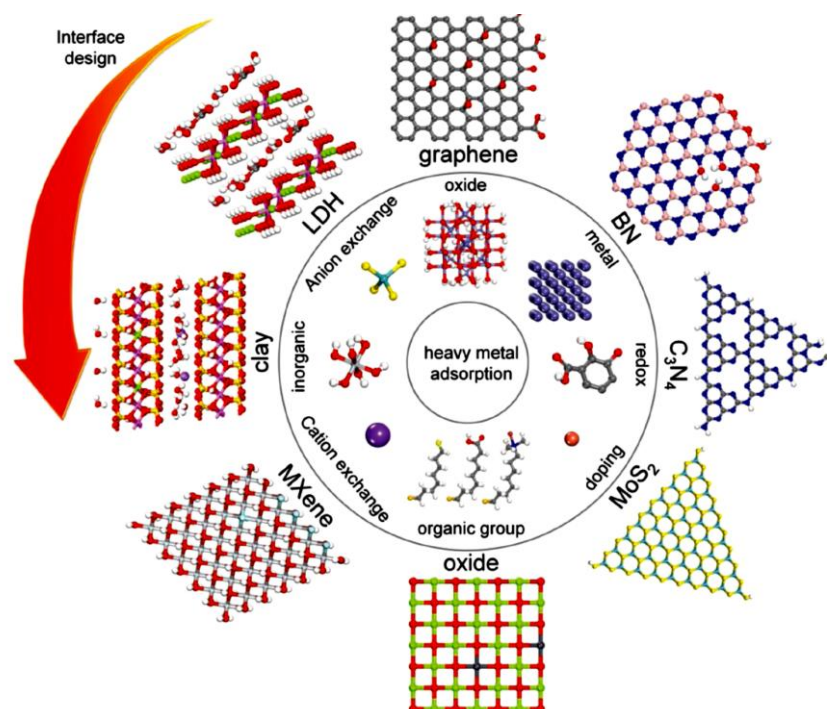
**Keywords:** MXene, 2D nanosheets, Antibacterial Activity, wastewater treatment.

\* Corresponding author E-mail address: [n.hajilari@gu.ac.ir](mailto:n.hajilari@gu.ac.ir)

## مقدمه

امروزه مواد دوبعدی با فراهم نمودن سطح ویژه بالا، ضخامت نازک، هدایت الکتریکی فلزی/شبه‌فلزی، پایداری دمایی و ظرفیت تبادل یونی بالا مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند که در کاربردهای فراوانی قابل استفاده هستند. در شکل ۱، نمایی از صفحات دوبعدی جاذب کاتیونی به همراه مکانیسم عملکرد آن که در فرآیند جذب فلزات سنگین استفاده شده است، نمایش داده شده است (Fu, Yan, Zhao, & Yang, 2018). از این میان، نانوصفات دوبعدی MXene به دلیل ساختار لایه‌ای و خواص فیزیک و شیمیایی و مکانیکی در زمینه‌های متنوعی از جمله الکتروشیمیایی، مغناطیسی و نوری ویژه اهمیت دو چندان یافته‌اند (Jun et al., 2019). MXene ماده‌ای دوبعدی از نیتريد یا کربید فلزات رسانا است که اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط Naguib سنتز شد، MXene به دلیل آب‌دوستی بالا، هدایت الکتریکی بالا در خازن‌ها، باتری‌ها، کاتالیست‌ها و تصفیه آب کاربرد دارد (Ghidiu, Naguib, & Barsoum, 2019; Ghidiu et al., 2014; R. Li et al., 2021; L. Yang et al., 2019).

اگرچه مطالعات زیادی در زمینه مواد آنتی‌باکتریال و تصفیه آب و فاضلاب انجام شده است اما از آنجا که هنوز بررسی رفتار و مکانیسم عملکرد MXene در این کاربردها به‌طور کامل و جامع بررسی نشده است، ارزیابی وضعیت فعلی عملکرد این مواد در جداسازی آلودگی‌های آب و بخصوص باکتری‌ها ضروری است. لذا در این مطالعه پس از معرفی MXene و ساختارهای مختلف آن، رفتار ضد باکتریایی آن در کاربردهای پزشکی و تصفیه آب مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱. ترکیبات رایج مناسب برای مواد نانو صفحات دو بعدی جاذب فلزات سنگین (Fu et al., 2018).

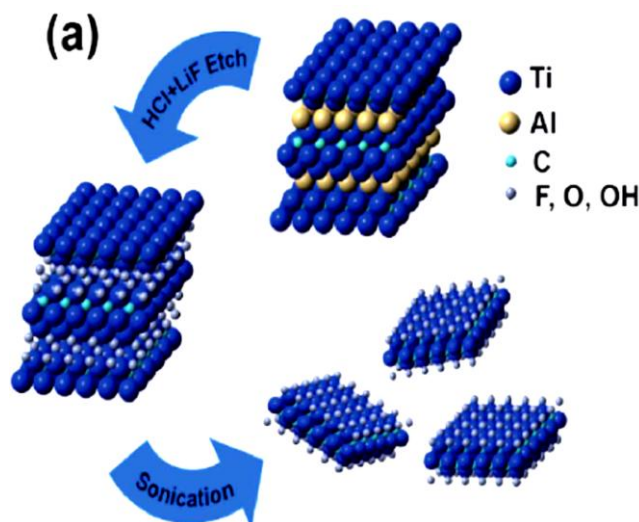
- سنتز و عامل‌دار کردن MXene

MXene با حکاکی کردن لایه Al موجود در ساختارهای MAX توسط اسید هیدروفلوئوریک (HF) یا اسید هیدروکلریک مخلوط با لیتیم‌فلوئوریک (LiF + HCl) به دست می‌آید که می‌تواند به‌صورت چندلایه یا ورقه ورقه شده مورد استفاده قرار گیرد. فازهای MAX یا  $M_{n+1}AX_n$  ساختاری کربید سه‌تایی متشکل از M، A و X است که در آن M فلز رسانا، A عنصر گروه ۳ یا چهار و X کربن یا نیتريد و n برابر با ۱، ۲ و ۳ است. لایه A که عموماً متشکل از Al است به دلیل اتصال ضعیف در حضور حک کننده‌ها با F، O یا OH (ترمینال‌های سطحی) جایگزین شده و MXene را با

Antibacterial

Etching

ساختار شش‌وجهی  $M_{n+1}X_nT_x$  به وجود می‌آورند که T نشان‌دهنده ترمینال‌های سطحی است (Tong et al., 2018; VahidMohammadi, 2019). در شکل ۲ شماتیکی از نحوه تشکیل ساختار لایه‌ای MXene و نحوه قرارگیری لایه‌ها قبل و بعد از عملیات حکاکی شدن توسط HCl و LiF نشان داده شده است؛ صفحات لایه‌ای پس از عملیات اولتراسونیک به صورت صفحات MXene به دست می‌آیند (Mayerberger, Street, McDaniel, Barsoum, & Schauer, 2018).



شکل ۲. شماتیکی از نحوه ایجاد صفحات دوبعدی MXene با حکاکی کردن MAX (Mayerberger et al., 2018).

روش‌های دیگری نیز برای سنتز MXene پیشنهاد شده است؛ اخلاقی و همکاران در سال ۲۰۱۹ توانستند MXene را با ترکیب  $Ti_3AlC_2$  به روش سنتز خود پیش‌رونده دما بالای فعال شده مکانیکی به دست آورند. در این روش ابتدا مواد اولیه شامل Al، Ti و C با نسبت ۱، ۳ و ۲ به روش مکانیکی و در حضور آسیاب سیاره‌ای فعال شده و پس از قرارگیری در کوره لوله‌ای، MXene با کمک مد انفجاری تولید شده است؛ نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزایش زمان فعال‌سازی مکانیکی تأثیر منفی در محصول خروجی دارد و مواد ناخالص  $TiC$  و  $Ti_2AlC$  را به وجود می‌آورد (اخلاقی، ۲۰۱۹).

فراوانی شیمیایی، سایت‌های فعال و تنوع در ترمینال‌های سطحی، خاصیت جاذبه بالقوه کاتیونی به MXene‌ها بخشیده است. در حال حاضر تعداد زیادی MXene شناخته وجود دارد که از این میان می‌توان به  $Ti_3C_2T_x$ ،  $V_2CT_x$ ،  $Nb_2CT_x$ ،  $Ta_4C_3T_x$  اشاره کرد که در واقع با جایگزینی فلزات رسانا Mo، Nb، V، Ta و Ti رفتار شیمیایی متفاوتی از MXene انتظار می‌رود (Verger et al., 2019).

#### • کاربردهای MXene

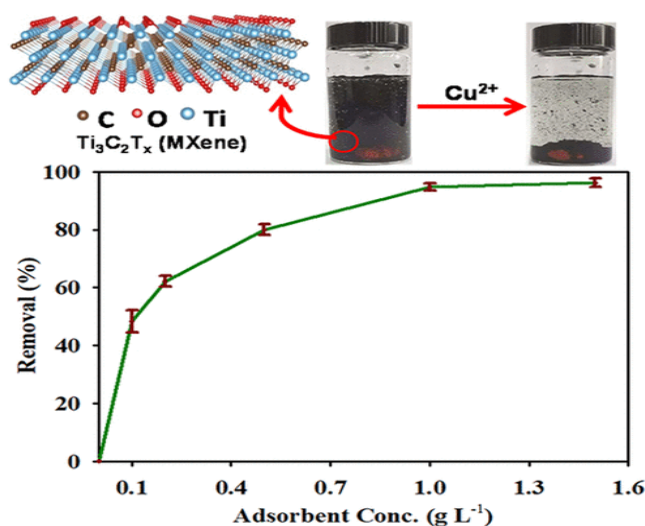
##### - تصفیه فاضلاب

یکی از عواملی که به‌عنوان آلاینده‌های آب و فاضلاب‌ها شناخته شده است، رنگ‌دانه‌های سمی هستند؛ پژوهش‌های زیادی در جهت شناسایی، جذب و حذف رنگ‌دانه‌ها انجام گرفته است که بسیاری از آن‌ها، توانستند تا دقت و صحت نمونه‌ی خود را در میزان شناسایی و جذب رنگ‌دانه‌ها در پساب کارخانه‌های نساجی، تولیدکننده مواد شیمیایی و دارویی و صنایع غذایی و بسته‌بندی تأیید کنند. از موادی که تا به حال به‌عنوان جاذب آلاینده‌های فاضلاب‌ها استفاده شده است می‌توان به غشاهای نانوفیلتراسیون پلیمری (Lau & Ismail, 2009)، سرامیکی (Khemakhem et al., 2004) و غشاهای زیستی (Ivnitsky et al., 2005) در طیف وسیع ساختاری و کاربردی اشاره کرد. همچنین راکتورهای زیستی غشایی در تصفیه فاضلاب‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد که در آن از غشاهای نام‌برده که سطح ویژه آن بهبود یافته، استفاده می‌شود (Visvanathan, Aim, & Parameshwaran, 2000).

MXene بخصوص ساختار شناخته‌شده آن یعنی  $Ti_3C_2T_x$ ، به دلیل بخش‌های فعال سطحی، ساختار لایه‌ای و همچنین حضور ترمینال‌های سطحی با بار منفی، جاذب خوبی برای غربالگری و حذف کاتیون‌های سه‌/دو/تک بار فلزات سنگین آلاینده آب و شیرین‌سازی تبخیری هستند (G. Liu et al., 2019; L. Yang et al., 2018; al., 2018). که از کاربردهای این ساختار جذب رنگ‌های خوراکی مانند متیلن بلو از آب فاضلاب است (Yin et al., 2020). به‌طور کلی گروه‌های عاملی، ساختار صفحه‌ای نازک و نانوکمانال‌های درون لایه‌ای MXene، پتانسیل جداسازی مواد و فرآیند نهم‌زدایی از

محلول اتانول و متانول را افزایش می‌دهد (Wu, Ding, Lu, Deng, & Wei, 2019; Xu, Liu, Ye, Jin, & Cui, 2018). گزارش‌ها فراوانی مبنی بر استفاده از  $Ti_3C_2T_x$  در تصفیه فاضلاب‌ها گزارش شده است (Rasool, Pandey, Rasheed, Berdiyrov, & Mahmoud, 2019; Jun, & Wei et al., 2018)؛ Jun و همکاران توانستند یون سرب موجود در آب فاضلاب را جذب و با مکانیسم تعویض یونی، آب را تصفیه نمایند (Jun, Her, Park, & Yoon, 2020). Ravi نیز در گزارش خود، توانست ماده سمی برومات را از نوشیدنی حذف کند، این فرایند توسط واکنش احیای شیمیایی برومات به برومید انجام گرفت که در طی آن صفحات  $Ti_3C_2T_x$  به صورت بلور  $TiO_2$  اکسید می‌شود (Pandey, Rasool, Abdul, & Rasheed, & Mahmoud, 2018). در شکل ۳ منحنی حذف کاتیون مس از فاضلاب با حضور MXene را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پیوند کاتیون مس با بخش‌های فعال ناشی از گروه‌های عاملی  $Ti_3C_2T_x$  منجر به کلوخه شدن و رسوب صفحات لایه‌لایه می‌شود که نشانگر تبعیت از مکانیسم سینتیکی ایزوترم فرندلیچ است (Shahzad et al., 2017).

نکته قابل‌ملاحظه در استفاده از MXene در تصفیه آب، تجمع صفحات پس از پیوند با آلاینده‌های یونی و عدم بازیابی پس از یک مرحله تصفیه است؛ برای حل این مشکل، تلاش‌هایی بر جاسازی و تثبیت  $Ti_3C_2T_x$  بر روی زیرلایه‌های پلیمری مانند پلی پیرول (PVA, Boota et al., 2016)، پلی وینیل الکل طبیعی (Ling et al., 2014)، پلی لاکتیک اسید (Tong et al., 2018)، پلی اتیلن دیوکسی تیوفن (Yang et al., 2017)، پلی وینیل بوتیرال (PVB) (Mu et al., 2019) و پلی آنیلین (B. Zhang, Fu, Wang, & Zhang, 2018) و پلی دیالید دی‌متیل آمونیوم بارداد (Boota, 2019) انجام شده است.



شکل ۳. نمودار درصد حذف کاتیون مس در حضور MXene (Shahzad et al., 2017).

در پژوهشی که اخیراً توسط هوانگ و همکاران انجام شده است توانسته‌اند با ساخت نانوکامپوزیت پلیمری MXene/ $Fe_3O_4$  به کاتالیستی با پایداری حرارتی بالا به منظور تصفیه فاضلاب دست پیدا کنند (X. Huang et al., 2019; Yin et al., 2020). در این ماده مشکل پایداری اتصال MXene و پلیمر و همچنین انباشتگی را به ترتیب با کمک لایه‌نشانی توسط روش الکترواسپینینگ و توزیع یکنواخت MXene در بستر پلیمر را با استفاده از خاصیت کاتالیستی و بازیابی مواد پس از جذب آلاینده‌های ترکیبات نیترو (نیتروآنیلین و نیتروفنول) از طریق جداسازی کامپوزیت مغناطیسی برطرف نمایند (X. Huang et al., 2019).

در مطالعه‌ای مشابه از فیبر نانوپالادیوم/پلی وینیل الکل<sup>۴</sup> (PVA)/پلی آکریلیک اسید<sup>۵</sup> (PAA)/MXene برای شناسایی و جداسازی نیتروآنیلین و نیتروفنول از فاضلاب استفاده کرده است که خاصیت کاتالیستی و سطح ویژه بالا این ترکیب آن را از دیگر ساختارهای مشابه متمایز کرده

<sup>۱</sup> Freundlich isotherm

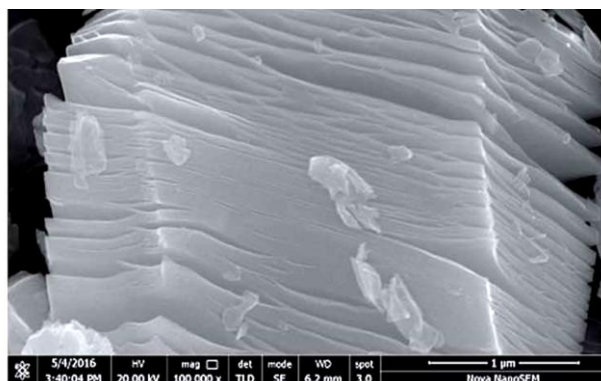
<sup>۲</sup> Agglomeration

<sup>۳</sup> Huang

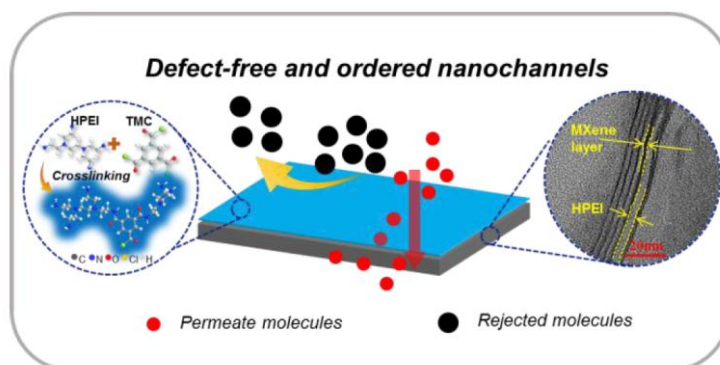
<sup>۴</sup> Polyvinyl alcohol

<sup>۵</sup> Polyacrylic acid

است (Rasool et al., 2017). از دیگر ترکیبات مشابه می‌توان به ترکیب کامپوزیتی MXene و پلی‌اتر سولفون (PES) اشاره کرد، ساختار لایه‌ای  $Ti_3AlC_2$  نشان داده شده در شکل ۴ که با روش حکاکی کردن لایه مکس بدست آمده در حضور PES بسیار آب‌دوست بوده و غشای بدست آمده برای کاربردهای فیلتراسیون رنگ‌های سمی مانند رنگ قرمز (۳/۹۲٪) و رنگ بنفش (۳/۸۰٪) و نمک‌های معدنی در فرآیند تصفیه آب عملکرد مناسبی از خود نشان داده است (Han, Ma, Xie, Teng, & Zhang, 2017). علاوه بر این، لیا و همکاران مطابق شکل ۵، ترکیب دوبعدی  $Ti_2CT_x$  را با عامل پوشان به صورت الکترواستاتیکی به پایداری رسانده‌اند و ساختار مناسبی را ایجاد کرده‌اند؛ ترکیب بدست آمده در فرآیند جداسازی و نم زدایی کاربرد دارد (G. Liu et al., 2019).

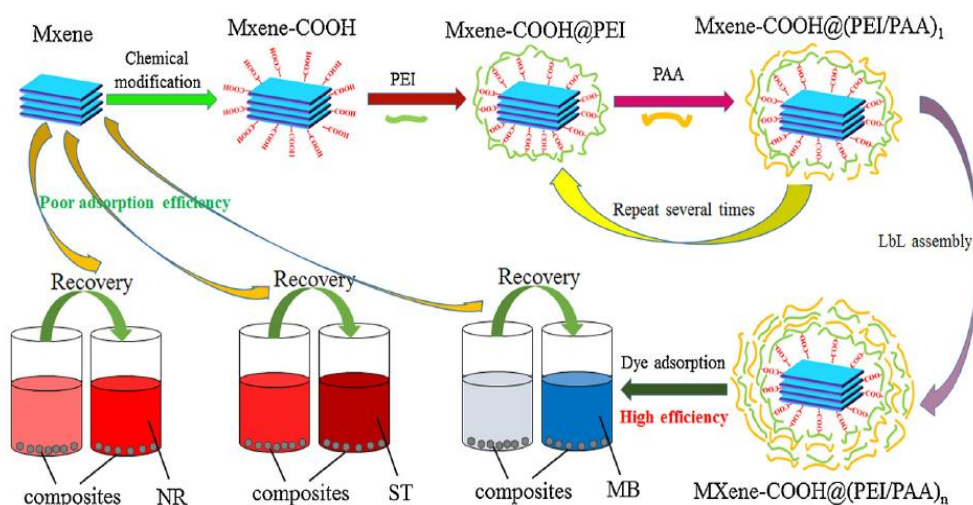


شکل ۴. تصویر SEM مواد دوبعدی لایه‌لایه MXene (Han et al., 2017).



شکل ۵. شماتیک ساختار MXene/HPIE/TMC و مکانیسم کارکرد غشایی آن (G. Liu et al., 2019).

در شکل ۶، مکانیسم سنتز کامپوزیت پلیمری پایه MXene و همچنین نحوه بازیافت کامپوزیت پس از جداسازی رنگ‌دانه‌های جذب‌شده را نشان می‌دهد. کامپوزیت از طریق ترکیبات کربوکسیلاتی عامل‌دار شده و سپس در پلیمر PEI و PAA تثبیت می‌شود که باعث افزایش پایداری، استحکام و جلوگیری از انباشتگی ذرات می‌شود (Tong et al., 2018).



شکل ۶. شماتیک مکانیسم جذب و واجذب رنگدانه‌ها در کامپوزیت MXene (Tong et al., 2018)

رایج‌ترین آلاینده‌های غیر آلی موجود در آب که می‌تواند توسط نانومواد مبتنی بر MXene از بین برود، فلزات سنگین و رادیونوکلیدها هستند (Fan et al., 2018). MXene می‌تواند بصورت الکترواستاتیکی شارژ شود و بار سطحی MXene را به گروه‌های عاملی موجود در سطح نسبت داد (Naguib et al., 2012). در حین حکاکی و درهم آمیختگی، گروه‌های مختلف عملکردی در سطح MXene مانند -O، -OH و -F تشکیل می‌شوند (Mu et al., 2018; Peng et al., 2014). آن‌ها می‌توانند از نظر الکترواستاتیکی با بارهای مخالف از ترکیبات مورد نظر در آب ارتباط برقرار کنند. همچنین، میزان شارژ MXene به pH محلول ناشی از پروتوناسیون توسط یون‌های هیدروژن بستگی دارد، MXene بسته به میزان بارگذاری خود می‌تواند ذرات باردار دارای یون منفی یا مثبت را جذب کند (Khan et al., 2019; Mu et al., 2018).

اگرچه فعل و انفعالات الکترواستاتیکی مکانیسم غالب برای حذف آلاینده‌های غیر آلی است، اما مکانیسم‌های دیگری مانند تبادل یونی و برخی از عوامل مانند سطح ویژه، PH و درجه حرارت نیز تأثیر زیادی بر روند جذب دارند (F. Liu et al., 2016; Peng et al., 2014; Shahzad et al., 2017).

در مطالعه‌ای برای جذب فلزات سنگین استفاده از MXene ( $Ti_3C_2(OH/ONa)_x F_{2-x}$ ) استفاده شد. در این مطالعه هدف حذف سرب (II) در آب در محلول ۵٪ NaOH است (Peng et al., 2014). تجزیه و تحلیل XRD و EDX نشان داد که یونهای Na با موفقیت مقابله می‌شوند. در واقع آن‌ها فضای بین لایه‌ها را گسترش می‌دهند، بنابراین سرعت انتشار منطقه را که می‌تواند با یونهای Pb (II) واکنش دهد افزایش می‌دهند. ظرفیت جذب به دست آمده تا ۱۴۰ میلی گرم در گرم بود که در مقایسه با سایر جاذب‌های معمولی سرب (II) زیاد در نظر گرفته می‌شود. همچنین، alk-MXene در ۱۲۰ ثانیه به تعادل رسید، و این مسئله را می‌توان به توانایی آن در واکنش فوق‌العاده با سرب (II) به دلیل ساختار متمایزش نسبت داد. مکانیسم اصلی مورد استفاده در این مطالعه مبادله یونی است (Giammar, Maus, & Xie, 2007).

MXene ذاتاً در محیط بسیار اسیدی دارای بار مثبت است و بالاتر از pHpzc بار منفی دارد، که می‌تواند منجر به جذب آلاینده‌های دارای بار مخالف شود که از PH تأثیر می‌پذیرند. به عبارت دیگر، آنیون‌ها را می‌توان با MXene با بار مثبت در PH بسیار پایین از بین برد، اما استفاده از آن دشوار است زیرا کیفیت آب با PH بسیار پایین معمول نیست.

آلاینده‌های آلی نیز می‌توانند توسط جاذب‌های پایه MXene از آب حذف شوند. آلاینده‌های آلی بطور معمول ترکیبات رنگ هستند. از آنجا که جاذب‌های پایه MXene به طور کلی بار منفی دارند، ترکیبات رنگی با بار مثبت، مانند متیلن بلو، می‌توانند به‌طور موثری از آب خارج شوند. چند مکانیسم جذب وجود دارد که اغلب در چندین مطالعه در مورد جذب رنگ توسط MXene ذکر شده است، که فعل و انفعال الکترواستاتیکی (Meng et al., 2018; Rozmysłowska-Wojciechowska et al., 2019) و تبادل یونی (Wei et al., 2018) مکانیسم‌های غالب هستند.

واکنش جذب آلاینده‌های آلی، مانند حذف آلاینده‌های غیر آلی، بسیار تحت تأثیر پارامترهای کیفیت آب مانند pH، دما و حضور یون‌های پس زمینه و مواد آلی طبیعی است. علاوه بر آلاینده‌های رنگی، تحقیقات بیشتری در مورد حذف آلاینده‌های مختلف آلی مانند اوره، لیزوزیم و اسید دئوکسی ریبونوکلیک برای کاربردهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Meng et al., 2018; Rozmysłowska- (Wojciechowska et al., 2019; X. Yang et al., 2019). علاوه بر این، حذف آلاینده‌های آلی توسط جذب گاز در MXene برای جذب آلاینده‌های هوا مانند مولکول‌های عطر نیز بررسی شده است (Ciou, Li, & Lee, 2019). در جدول ۱ مروری بر عملکرد MXene در جداسازی مواد مختلف در سال‌های اخیر انجام شده است.

جدول ۱. جذب آلودگی‌های مختلف با ساختارهای ترکیبی MXene

مرجع	حداکثر جداسازی (میلی گرم بر گرم)	ظرفیت اولیه (میلی گرم بر لیتر)	نوع آلودگی
Dong, Sang, He, Sheng, ) (& Lei, 2019)	۳۸۳	mM۱۰	Pb
(Dong et al., 2019)	۸۷٫۶	mM۱۰	Cu
(Ciou et al., 2019)	۲۱۳	۱۸۰-۵	Th(IV)
(Gu et al., 2018)	۲۸۴	۲۰۰	Pb(II)
(Khan et al., 2019)	۲۵٫۴	۳۰۰-۵	Cs
(Mu et al., 2019)	۱۸۵	۱۰۰	Pd
(Wang et al., 2018)	۴۷۰	۴۰۰-۵	U(VI)
(Wei et al., 2018)	۱۸۹	۵۰	Methylene blue
(Meng et al., 2018)	۲۱٫۷	۴۵۰-۳۰	Urea
(Jun et al., 2020)	۱۴۰	۴۰-۵	Methylene blue
(Guo et al., 2016)	۶۲	۱۰	Cr
(Wang et al., 2017)	۲۱۴	۱۰۰	U

### تصفیه فاضلاب هسته‌ای

با افزایش مصارف انرژی هسته‌ای و پیشرفت آن که منجر به استفاده در مسائل روزمره انسانی شده است، نگرانی ناشی از آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز افزایش یافته است. پسماندهای هسته‌ای به خاطر دارا بودن اکتینیدهای<sup>۱</sup> با طول عمر بالا، سمیت شیمیایی و رادیولوژیکی بالایی دارند و به همین دلیل ضروری است عملیات جذب آلاینده‌های پرتو هسته‌ای<sup>۲</sup> پیش از رهایش در محیط زیست صورت گیرد. از روش‌های رایج در این مورد فیلتراسیون غشایی، جذب، ترسیب و استخراج حلالی است (Watanabe et al., 2019)؛ اما هنوز روشی که حداکثر جذب و پایداری مکانیکی و فیزیوشیمیایی را داشته باشد و همچنین تثبیت و جداسازی پرتو هسته‌ای‌ها را به آسانی انجام دهد، معرفی نشده است. مطالعات زیادی جاذب‌های جامدی مانند سیلیکا مزوسفروس، نانومواد پایه کربنی، نانوذرات اکسیدی را به خاطر سطح ویژه، کاربرد و تطبیق پذیری بالا در تصفیه پرتوهسته‌ای‌ها جایگزین مناسبی برای جاذب‌های رایج پسماندهای هسته‌ای معرفی کردند (Wang et al., 2017; Y.-J. Zhang et al., 2017). مواد دوبعدی رسانای MXene با قابلیت تنظیم کردن ترمینال‌های سطحی با توجه به طراحی مواد، مکان‌های فعال مناسبی برای جذب و جداسازی پرتو هسته‌ها فراهم می‌کند. در مطالعه انجام شده در سال ۲۰۱۶ توسط وانگ<sup>۳</sup> و همکارانش، کاربرد و انادیموم MXene را به‌عنوان جاذب مناسبی برای اورانیوم با مکانیسم تبادل یونی معرفی کردند؛ نانوصفات  $V_2CT_x$  با ظرفیت جذب  $174 \text{ mg.g}^{-1}$  اورانیوم با سرعت جذب و انتخاب پذیری بالا، کاندید مناسبی برای این پسماند هسته‌ای است. نانوصفات چندلایه  $V_2CT_x$  با حکاکی کردن ماده  $V_2AlC$  با کمک HF مشابه با دیگر MXeneها به‌دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده

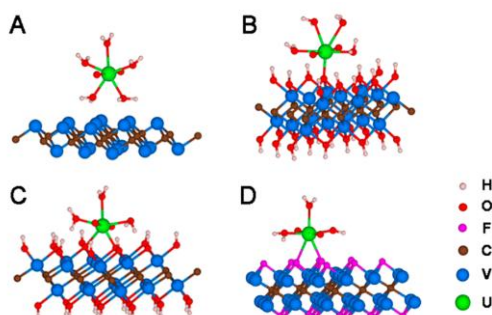
<sup>۱</sup>Actinides

<sup>۲</sup>Radionuclide

<sup>۳</sup>Wang



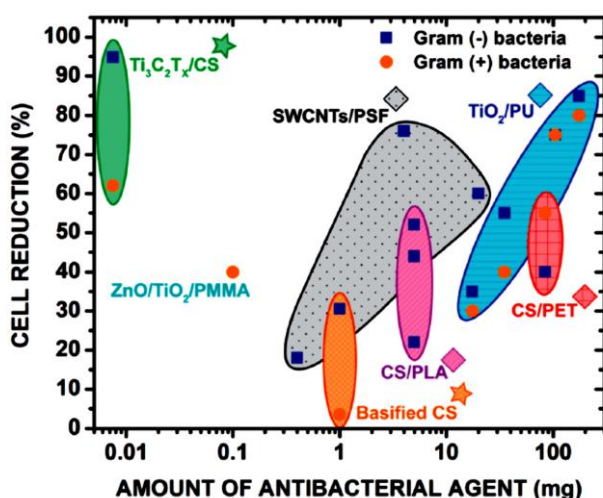
می‌شود، نانوصفحات  $V_2CF_2$  توانسته با ایجاد مکان‌های فعال در سطح، امکان اتصال ترجیحی گروه هیدروکسیلی اورانیل ( $UO_2^{2+}$  کاتیون) بالاتری نسبت به دیگر مواد دوبعدی با ساختارهای شیمیایی نزدیک به خود با گروه‌های عاملی  $-F$ ،  $-OH$ ،  $-O$  ایجاد کند که نشان دهنده تأثیر نوع ترمینال‌های خروجی در عملکرد جذب اورانیل است (Wang et al., 2016). از دیگر آلاینده‌های فاضلابی رادیواکتیو که جذب آن توسط MXene انجام شده است، می‌توان به پلادیم اشاره کرد؛ MXene به‌دست‌آمده از فرایند حکاکی در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد قابلیت بازیابی تا ۵ سیکل را دارد که از نقاط قوت سیستم حذف مواد رادیواکتیو فاضلاب است (Mu et al., 2019; B. Zhang et al., 2018).



شکل ۷. شماتیک جذب داخلی و خارجی اورانیل در نانوصفحات  $V_2C$ . (A) ساختار جذب خارجی اورانیل بر روی نانوصفحات  $V_2C$ . (B) و (C) ساختار جذب داخلی اورانیل مونودنتات و بی‌دنتات روی نانوصفحه  $V_2C(OH)_2$ . (د) ساختار جذب داخلی اورانیل در نانوصفحات  $V_2CF_2$  (Wang et al., 2016).

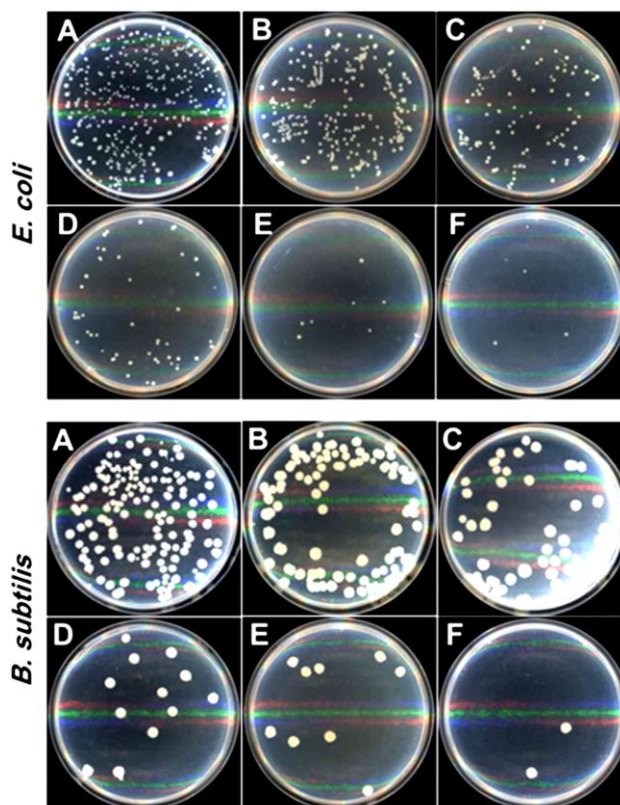
#### خواص ضد باکتریایی

بررسی اثر ضد باکتریایی MXene بخصوص  $Ti_3C_2T_x$  برای مصارف بهداشتی، دارویی، پزشکی و تصفیه آب مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ فعالیت ضد باکتریایی نانوفیبرهای پلیمری، اکسیدهای فلزی (اکسید روی و دی‌اکسید Ti) و نانولوله‌های کربن با MXene ترکیب شده در کیتوسان مقایسه شده است. MXene به دلیل لبه‌های تیز به همراه سطح ویژه بالای ساختار صفحه‌ای و آب‌دوستی بالای سطح و خاصیت احیایی خوب، محل مناسبی برای توقف رشد و نابودی باکتری‌ها فراهم می‌کند. علاوه بر این،  $Ti_3C_2T_x$  به دلیل زیست‌سازگاری بالا و غیرسمی بودن از ایجاد عوارض جانبی در بانداژهای پزشکی التیام زخم جلوگیری می‌کند. تلفیق  $Ti_3C_2T_x$  و نانوفیبر کیتوسان با روش الکترواسپینینگ توانسته *E. coli* و *S. aureus* را به ترتیب تا میزان ۹۵ و ۶۲٪، احیا کند؛ این ماده به‌علت توانایی جذب نانوفیبر حامل استفاده شده ثبات و پایداری بالایی دارد و با شستشو از بین نمی‌رود چراکه ترمینال‌های سطحی بارمنفی  $Ti_3C_2T_x$  و ترمینال‌های مثبت کیتوسان (گروه N دار) اتصال هیدروژنی برقرار می‌کنند (Mayerberger et al., 2018).



شکل ۸. مقایسه کمی قابلیت آنتی باکتریالی و درصد احیا سلولی ساختارهای شناخته شده (Mayerberger et al., 2018).

رسول<sup>۱</sup> و همکاران (Wei et al., 2018) در مطالعه‌ای خواص ضد باکتریایی  $Ti_3C_2T_x$  در برابر *E. coli* Gram- و *B. subtilis* positive بررسی کردند و توانستند در حضور  $Ti_3C_2T_x$  ۲۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر، میزان زنده ماندن باکتری‌های نام‌برده را به بیش از ۹۹٪ برسانند که نشان‌دهنده قابلیت ضد باکتریایی و زیست‌کشی بالای ماده سنتز شده در مقایسه با ساختارهای دوبعدی آنتی‌باکتریال است که علت این امر را می‌توان به طبیعت آب‌دوستی، فضای بین لایه‌های هیدراتی  $Ti_3C_2T_x$  نسبت داد. در شکل ۹ تصویر کاهش تعداد کلونی‌های باکتری‌ها با افزایش غلظت  $Ti_3C_2T_x$  نشان داده شده است. کاهش کلونی و مرگ باکتری‌ها با تولید گونه‌های اکسیژن فعال، تماس مستقیم ماده آنتی‌باکتریال با غشا باکتری و نفوذ به باکتری انجام می‌شود. علاوه بر این، آن‌ها با مقایسه بین قابلیت ضد باکتریایی MXene و اکسید گرافن، مکانیسم مناسبی برای فعالیت ضد باکتریایی آن پیشنهاد دادند. به‌طور کلی، مکانیسم ضد باکتریایی نانومواد دوبعدی پایه کربنی، مانند گرافن، اکسید گرافن، CNT و فلورن به سبب نانوذرات نسبت داده شده است که با نفوذ به غشا سلولی باکتری موجب تخریب فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود (K. Li et al., 2018). اگرچه MXene به دلیل تفاوت در شیمی سطح خواص ضد باکتریایی و سمیت متفاوتی با مواد نام‌برده دارد اما می‌تواند در ارائه مکانیسم فعالیت ضد باکتریایی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۹. رابطه غلظت به فعالیت ضد باکتریایی  $Ti_3C_2T_x$  در سوسپانسیون آبی: تصویر نمونه‌های آگار در باکتری‌های *B. subtilis* (سمت چپ) و *E. coli* (سمت راست) بعد از ۴ ساعت واکنش با  $Ti_3C_2T_x$  در غلظت‌های (A) ۰، (B) ۱۰، (C) ۲۰، (D) ۵۰، (E) ۱۰۰ و (F) ۲۰۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر (Wei et al., 2018).

مکانیزم ضد باکتریایی  $Ti_3C_2T_x$  با توجه به اندازه ذرات به صورت زیر پیشنهاد شده است:

۱.  $Ti_3C_2T_x$  با توجه به طبیعت آنیونی و آب‌دوست‌شان با ایجاد باند هیدروژنی بین ترمینال‌های سطح گروه  $Ti_3C_2T_x$  و رشته لیپوساکارید غشا سلولی می‌تواند با مکانیسم تماس کشنده منجر به کاهش استحکام و تخریب غشا باکتری و نابودی آن شود (Rasool et al., 2016).
۲. صفحات  $Ti_3C_2T_x$  تمایل زیادی به جذب باکتری‌ها در گوشه‌های تیز خود را دارند و در نتیجه انتقال باکتری‌ها به این گوشه‌های تیز و فعال، تخریب غشا باکتری انجام می‌پذیرد (Alimohammadi et al., 2018; Arabi Shamsabadi, Sharifian Gh, Anasori, & Soroush, 2018).
۳. اتصال قوی بین ترمینال‌های سطحی و باکتری، منجر به مجبوس شدن و درهم‌پیچیدگی باکتری در میان صفحات  $Ti_3C_2T_x$  شده و در نتیجه آن ذرات انباشته شده و مانع از ایجاد تماس باکتری با محیط بیرونی آن می‌شود (Wei et al., 2018).
۴. نانوصفات  $Ti_3C_2T_x$  به دلیل ابعاد کوچکشان با نفوذ به سلول‌های میکروارگانیسم، باکتری‌ها را نابود می‌کنند (K. Huang, Li, Lin, & Han, 2018).

### نتیجه‌گیری

جداسازی آلودگی‌های آب با MXene، نه تنها از خصوصیات فیزیکی شیمیایی این مواد بلکه از نوع آلودگی، مقدار آن، مقدار pH، دما، یون پس زمینه و مواد آلی طبیعی نیز بسیار تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این مقاله مروری، عملکرد MXeneها در جداسازی آلودگی‌های مختلف آب مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به روند کلی سنتز MXene و ویژگی‌های ساختاری آن نیز پرداخته شده است. MXeneها در جداسازی رنگ‌ها به دلیل جلوگیری از انباشتگی ذرات، عملکرد بسیار مناسبی داشته‌اند. همچنین در مقایسه با سایر نانومواد از جمله گرافن به دلیل سطوح فعال بیشتر و خاصیت آب‌دوستی ویژگی ضد باکتریایی بهتری از خود نشان داده‌اند. علاوه بر این به دلیل سرعت جذب بالا

و انتخاب پذیری مناسب، می‌توانند در آینده به‌طور وسیع‌تری در جداسازی پسماندهای هسته‌ای مورد استفاده قرار بگیرند. پیشنهاد می‌شود این مواد به دلیل سطوح با بار منفی و آب‌دوستی بالا برای تصفیه سایر آلودگی‌های آب نیز مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین با توجه به استحکام مکانیکی بالا، و وجود سطوح فعال ویژه در این ساختار تجاری سازی آن نیز می‌تواند مورد توجه محققان قرار بگیرد.

## منابع

- اخلاقی. (۲۰۱۹). سنتز خودپیشرونده دما بالای کاربید تیتانیم آلمینیم به کمک فعال‌سازی مکانیکی. مهندسی متالورژی، ۲۲(۱)، ۶۵-۷۴.
- Alimohammadi, F., Sharifian Gh, M., Attanayake, N. H., Thenuwara, A. C., Gogotsi, Y., Anasori, B., & Strongin, D. R. (2018). Antimicrobial properties of 2D MnO<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> nanomaterials vertically aligned on graphene materials and Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene. *Langmuir*, 34(24), 7192-7200.
- Arabi Shamsabadi, A., Sharifian Gh, M., Anasori, B., & Soroush, M. (2018). Antimicrobial mode-of-action of colloidal Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene nanosheets. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(12), 16586-16596.
- Boota, M. (2019). MXene–Organic Hybrid Materials. In *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes)* (pp. 221-251): Springer.
- Boota, M., Anasori, B., Voigt, C., Zhao, M. Q., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2016). Pseudocapacitive electrodes produced by oxidant-free polymerization of pyrrole between the layers of 2D titanium carbide (MXene). *Advanced materials*, 28(7), 1517-1522.
- Ciou, J. H., Li, S., & Lee, P. S. (2019). Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene paper for the effective adsorption and controllable release of aroma molecules. *Small*, 15(38), 1903281.
- Dong, Y., Sang, D., He, C., Sheng, X., & Lei, L. (2019). Mxene/alginate composites for lead and copper ion removal from aqueous solutions. *RSC advances*, 9(50), 29015-29022.
- Fan, M., Wang, L., Zhang, Y., Pei, C., Chai, Z., & Shi, W. (2018). Research progress of MXene materials in radioactive element and heavy metal ion sequestration. *Scientia Sinica Chimica*, 49(1), 27-38.
- Fu, L., Yan, Z., Zhao, Q., & Yang, H. (2018). Novel 2D nanosheets with potential applications in heavy metal purification: A review. *Advanced Materials Interfaces*, 5(23), 1801094.
- Ghidiu, M., Naguib, M., & Barsoum, M. W. (2019). Chemical and Electrochemical Intercalation of Ions and Molecules into MXenes. In *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes)* (pp. 161-175): Springer.
- Ghidiu, M., Naguib, M., Shi, C., Mashtalir, O., Pan, L., Zhang, B., . . . Barsoum, M. W. (2014). Synthesis and characterization of two-dimensional Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (MXene). *Chemical communications*, 50(67), 9517-9520.
- Giammar, D. E., Maus, C. J., & Xie, L. (2007). Effects of particle size and crystalline phase on lead adsorption to titanium dioxide nanoparticles. *Environmental Engineering Science*, 24(1), 85-95.
- Gu, P., Xing, J., Wen, T., Zhang, R., Wang, J., Zhao, G., . . . Wang, X. (2018). Experimental and theoretical calculation investigation on efficient Pb (II) adsorption on etched Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> nanofibers and nanosheets. *Environmental Science: Nano*, 5(4), 946-955.
- Guo, J., Fu, H., Zou, G., Zhang, Q., Zhang, Z., & Peng, Q. (2016). Theoretical interpretation on lead adsorption behavior of new two-dimensional transition metal carbides and nitrides. *Journal of alloys and compounds*, 684, 504-509.
- Han, R., Ma, X., Xie, Y., Teng, D., & Zhang, S. (2017). Preparation of a new 2D MXene/PES composite membrane with excellent hydrophilicity and high flux. *RSC advances*, 7(89), 56204-56210.
- Huang, K., Li, Z., Lin, J., Han, G., & Huang, P. (2018). Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes) for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 47(14), 5109-5124.
- Huang, X., Wang, R., Jiao, T., Zou, G., Zhan, F., Yin, J., . . . Peng, Q. (2019). Facile preparation of hierarchical AgNP-loaded MXene/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polymer nanocomposites by electrospinning with enhanced catalytic performance for wastewater treatment. *ACS omega*, 4(1), 1897-1906.
- Ivnitsky, H., Katz, I., Minz, D., Shimoni, E., Chen, Y., Tarchitzky, J., . . . Dosoretz, C. (2005). Characterization of membrane biofouling in nanofiltration processes of wastewater treatment. *Desalination*, 185(1-3), 255-268.
- Jun, B.-M., Her, N., Park, C. M., & Yoon, Y. (2020). Effective removal of Pb (ii) from synthetic wastewater using Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(1), 173-180.
- Jun, B.-M., Kim, S., Heo, J., Park, C. M., Her, N., Jang, M., . . . Yoon, Y. (2019). Review of MXenes as new nanomaterials for energy storage/delivery and selected environmental applications. *Nano Research*, 12(3), 471-487.
- Khan, A. R., Husnain, S. M., Shahzad, F., Mujtaba-ul-Hassan, S., Mehmood, M., Ahmad, J., . . . Rahman, S. (2019). Two-dimensional transition metal carbide (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>) as an efficient adsorbent to remove cesium (Cs<sup>+</sup>). *Dalton Transactions*, 48(31), 11803-11812.

- Khemakhem, S., Amar, R. B., Hassen, R. B., Larbot, A., Medhioub, M., Salah, A. B., & Cot, L. (2004). New ceramic membranes for tangential waste-water filtration. *Desalination*, *167*, 19-22.
- Lau, W.-J., & Ismail, A. (2009). Polymeric nanofiltration membranes for textile dye wastewater treatment: preparation, performance evaluation, transport modelling, and fouling control—a review. *Desalination*, *245*(1-3), 321-348.
- Li, K., Zou, G., Jiao, T., Xing, R., Zhang, L., Zhou, J., . . . Peng, Q. (2018). Self-assembled MXene-based nanocomposites via layer-by-layer strategy for elevated adsorption capacities. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *553*, 105-113.
- Li, R., Gao, Q., Xing, H., Su, Y., Zhang, H., Zeng, D., . . . Zhao, B. (2021). Lightweight, multifunctional MXene/polymer composites with enhanced electromagnetic wave absorption and high-performance thermal conductivity. *Carbon*.
- Ling, Z., Ren, C. E., Zhao, M.-Q., Yang, J., Giammarco, J. M., Qiu, J., . . . Gogotsi, Y. (2014). Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(47), 16676-16681.
- Liu, F., Zhou, A., Chen, J., Zhang, H., Cao, J., Wang, L., & Hu, Q. (2016). Preparation and methane adsorption of two-dimensional carbide Ti<sub>2</sub>C. *Adsorption*, *22*(7), 915-922.
- Liu, G., Shen, J., Ji, Y., Liu, Q., Liu, G., Yang, J., & Jin, W. (2019). Two-dimensional Ti<sub>2</sub>CT<sub>x</sub> MXene membranes with integrated and ordered nanochannels for efficient solvent dehydration. *Journal of Materials Chemistry A*, *7*(19), 12095-12104.
- Liu, G., Shen, J., Liu, Q., Liu, G., Xiong, J., Yang, J., & Jin, W. (2018). Ultrathin two-dimensional MXene membrane for pervaporation desalination. *Journal of membrane science*, *548*, 548-558.
- Mayerberger, E. A., Street, R. M., McDaniel, R. M., Barsoum, M. W., & Schauer, C. L. (2018). Antibacterial properties of electrospun Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>z</sub> (MXene)/chitosan nanofibers. *RSC advances*, *8*(62), 35386-35394.
- Meng, F., Seredych, M., Chen, C., Gura, V., Mikhalovsky, S., Sandeman, S., . . . Anasori, B. (2018). MXene sorbents for removal of urea from dialysate: A step toward the wearable artificial kidney. *Acs Nano*, *12*(10), 10518-10528.
- Mu, W., Du, S., Li, X., Yu, Q., Wei, H., Yang, Y., & Peng, S. (2019). Removal of radioactive palladium based on novel 2D titanium carbides. *Chemical Engineering Journal*, *358*, 283-290.
- Mu, W., Du, S., Yu, Q., Li, X., Wei, H., & Yang, Y. (2018). Improving barium ion adsorption on two-dimensional titanium carbide by surface modification. *Dalton Transactions*, *47*(25), 8375-8381.
- Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., . . . Barsoum, M. W. (2012). Two-dimensional transition metal carbides. *Acs Nano*, *6*(2), 1322-1331.
- Pandey, R. P., Rasool, K., Abdul Rasheed, P., & Mahmoud, K. A. (2018). Reductive sequestration of toxic bromate from drinking water using lamellar two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>TX (MXene). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(6), 7910-7917.
- Peng, Q., Guo, J., Zhang, Q., Xiang, J., Liu, B., Zhou, A., . . . Tian, Y. (2014). Unique lead adsorption behavior of activated hydroxyl group in two-dimensional titanium carbide. *Journal of the American Chemical Society*, *136*(11), 4113-4116.
- Rasool, K., Helal, M., Ali, A., Ren, C. E., Gogotsi, Y., & Mahmoud, K. A. (2016). Antibacterial activity of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene. *Acs Nano*, *10*(3), 3674-3684.
- Rasool, K., Mahmoud, K. A., Johnson, D. J., Helal, M., Berdiyrov, G. R., & Gogotsi, Y. (2017). Efficient antibacterial membrane based on two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> (MXene) nanosheets. *Scientific reports*, *7*(1), 1-11.
- Rasool, K., Pandey, R. P., Rasheed, P. A., Berdiyrov, G. R., & Mahmoud, K. A. (2019). MXenes for environmental and water treatment applications. In *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes)* (pp. 417-444): Springer.
- Rozmysłowska-Wojciechowska, A., Wojciechowski, T., Ziemkowska, W., Chlubny, L., Olszyna, A., & Jastrzębska, A. (2019). Surface interactions between 2D Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ti<sub>2</sub>C MXenes and lysozyme. *Applied Surface Science*, *473*, 409-418.
- Shahzad, A., Rasool, K., Miran, W., Nawaz, M., Jang, J., Mahmoud, K. A., & Lee, D. S. (2017). Two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene nanosheets for efficient copper removal from water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(12), 11481-11488.
- Tong, Y., He, M., Zhou, Y., Zhong, X., Fan, L., Huang, T., . . . Wang, Y. (2018). Hybridizing polypyrrole chains with laminated and two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> toward high-performance electromagnetic wave absorption. *Applied Surface Science*, *434*, 283-293.

- VahidMohammadi, A., Kayali, E., Orangi, J., & Beidaghi, M. (2019). Techniques for MXene delamination into single-layer flakes. In *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes)* (pp. 177-195): Springer.
- Verger, L., Xu, C., Natu, V., Cheng, H.-M., Ren, W., & Barsoum, M. W. (2019). Overview of the synthesis of MXenes and other ultrathin 2D transition metal carbides and nitrides. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 23(3), 149-163.
- Visvanathan, C., Aim, R. B., & Parameshwaran, K. (2000). Membrane separation bioreactors for wastewater treatment. *Critical reviews in environmental science and technology*, 30(1), 1-48.
- Wang, L., Song, H., Yuan, L., Li, Z., Zhang, Y., Gibson, J. K., . . . Shi, W. (2018). Efficient U (VI) reduction and sequestration by Ti<sub>2</sub>CT<sub>x</sub> MXene. *Environmental science & technology*, 52(18), 10748-10756.
- Wang, L., Tao, W., Yuan, L., Liu, Z., Huang, Q., Chai, Z., . . . Shi, W. (2017). Rational control of the interlayer space inside two-dimensional titanium carbides for highly efficient uranium removal and imprisonment. *Chemical communications*, 53(89), 12084-12087.
- Wang, L., Yuan, L., Chen, K., Zhang, Y., Deng, Q., Du, S., . . . Chai, Z. (2016). Loading actinides in multilayered structures for nuclear waste treatment: the first case study of uranium capture with vanadium carbide MXene. *ACS applied materials & interfaces*, 8(25), 16396-16403.
- Watanabe, S., Ogi, H., Arai, Y., Aihara, H., Takahatake, Y., Shibata, A., . . . Matsuura, H. (2019). STRAD project for systematic treatments of radioactive liquid wastes generated in nuclear facilities. *Progress in Nuclear Energy*, 117, 103090.
- Wei, Z., Peigen, Z., Wubian, T., Xia, Q., Yamei, Z., & ZhengMing, S. (2018). Alkali treated Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXenes and their dye adsorption performance. *Materials Chemistry and Physics*, 206, 270-276.
- Wu, Y., Ding, L., Lu, Z., Deng, J., & Wei, Y. (2019). Two-dimensional MXene membrane for ethanol dehydration. *Journal of membrane science*, 590, 117300.
- Xu, Z., Liu, G., Ye, H., Jin, W., & Cui, Z. (2018). Two-dimensional MXene incorporated chitosan mixed-matrix membranes for efficient solvent dehydration. *Journal of membrane science*, 563, 625-632.
- Yang, H., Dai, J., Liu, X., Lin, Y., Wang, J., Wang, L., & Wang, F. (2017). Layered PVB/Ba<sub>3</sub>Co<sub>2</sub>Fe<sub>24</sub>O<sub>41</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Mxene composite: enhanced electromagnetic wave absorption properties with high impedance match in a wide frequency range. *Materials Chemistry and Physics*, 200, 179-186.
- Yang, L., Zheng, W., Zhang, P., Chen, J., Zhang, W., Tian, W., & Sun, Z. (2019). Freestanding nitrogen-doped d-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/reduced graphene oxide hybrid films for high performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 300, 349-356.
- Yang, X., Wan, Y., Zheng, Y., He, F., Yu, Z., Huang, J., . . . Gao, B. (2019). Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: a critical review. *Chemical Engineering Journal*, 366, 608-621.
- Yin, J., Zhan, F., Jiao, T., Deng, H., Zou, G., Bai, Z., . . . Peng, Q. (2020). Highly efficient catalytic performances of nitro compounds via hierarchical PdNPs-loaded MXene/polymer nanocomposites synthesized through electrospinning strategy for wastewater treatment. *Chinese Chemical Letters*, 31(4), 992-995.
- Zhang, B., Fu, L., Wang, S., & Zhang, L. (2018). Adsorption of palladium (II) from aqueous solution using nanosilica modified with imidazoline groups. *Materials Chemistry and Physics*, 214, 533-539.
- Zhang, Y.-J., Zhou, Z.-J., Lan, J.-H., Ge, C.-C., Chai, Z.-F., Zhang, P., & Shi, W.-Q. (2017). Theoretical insights into the uranyl adsorption behavior on vanadium carbide MXene. *Applied Surface Science*, 426, 572-578.