

MXenes: From the Introduction of Structure and Synthesis to the Photocatalytic Ability to Degrade Dyes and Organic Pollutants in Water

Bahareh Rabeie

Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 167654-654, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21- 11-2024

Accepted: 19- 02-2025

Available online: 16-04-2025

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/jscw.2025.167478.1222

Keywords:

MXene

Structure and synthesis

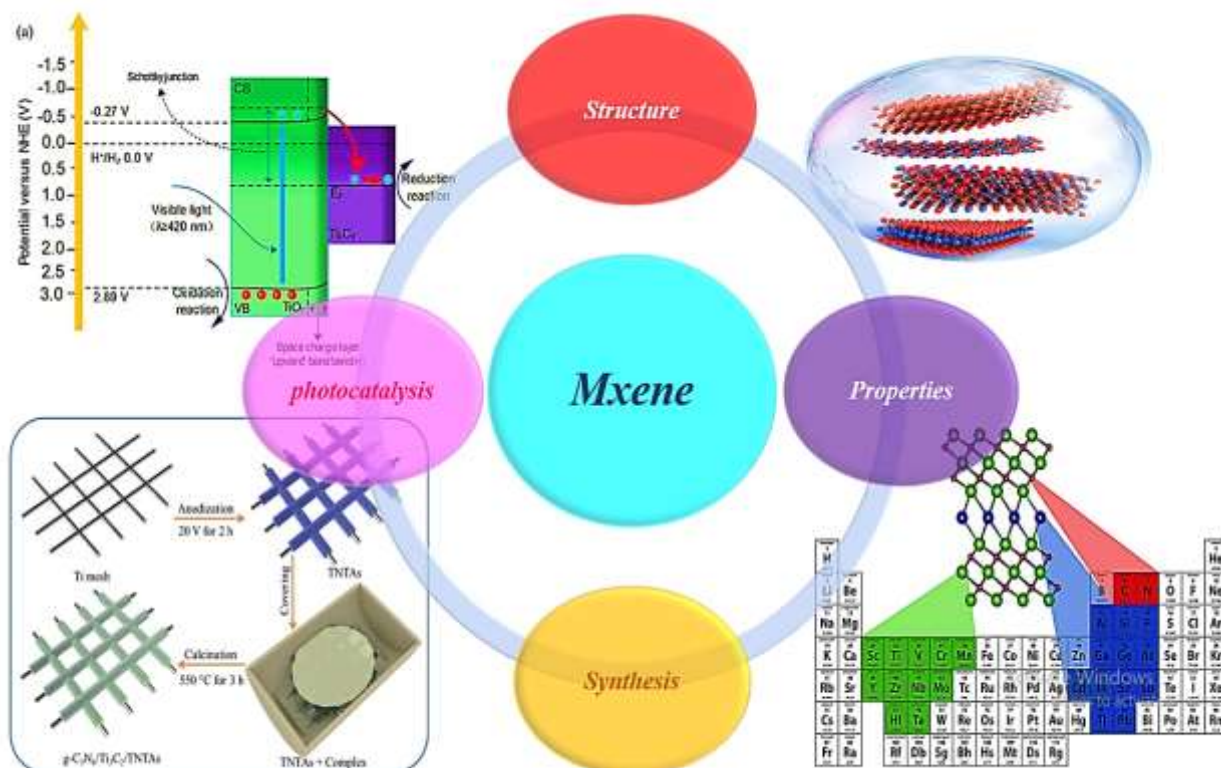
Photocatalysis

Dyes and organic contaminant removal

Wastewater

ABSTRACT

MXenes, a class of two-dimensional transition metal carbides, nitrides, and carbonitrides, have emerged as promising materials for environmental applications. Their rich chemistry of interlayer functional groups, surface functional groups, and flexible layer spacing make them ideal materials exhibiting diverse properties. These features make mxenes promising candidates for various applications, including environmental remediation. The structure of these two-dimensional nanomaterials and the fast electron transfer channels have led to excellent catalytic oxidation activity of the hydrophilic surface, with favorable Gibbs free energy, and the surface functional groups facilitate adsorption interactions. This paper reviews the synthesis strategies and structural evolution of mxenes, and investigated their photocatalytic properties. MXenes and their composites absorb light to produce active species that effectively degrade pollutants such as dyes and other organic compounds. Despite challenges such as oxidative instability and electron-hole recombination, mxenes-based composites demonstrate superior performance and achieve pollutant removal in optimized systems. This work highlights the potential of mxenes in water purification, and emphasizes their role as next-generation photocatalysts.



Corresponding author: * Rabeie-ba@icrc.ac.ir
b_rabeie@yahoo.com



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

مکسن‌ها: از معرفی ساختار و سنتز تا توانایی فوتوکاتالیزی آنها در تخریب رنگ‌ها و آلاینده‌های آلی در آب

بهاره ربیعی

پژوهشگر پسا دکتري، گروه محیط‌زیست، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۷

چکیده

مکسن‌ها، دسته‌ای از کاربیدها، نیتريد‌ها و کربونیتريد‌های فلزات واسطه هستند که به عنوان مواد دوعبدي امیدوارکننده برای کاربردهای زیست محیطی ظاهر شده‌اند. گروه‌های عاملی بین لایه‌ای، گروه‌های عاملی سطحی و انعطاف‌پذیری فاصله لایه‌ها، آنها را به مواد ایده‌آلی تبدیل می‌کند که طیف متنوعی از خواص، از جمله هدایت الکتریکی بالا، استحکام مکانیکی خوب و آب دوستی را نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها، مکسن‌ها را به نامزدهای امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای مختلف از جمله پاک‌سازی محیط زیست تبدیل کرده‌است. ساختار این نانومواد دوعبدي و کانال‌های انتقال الکترون پرسرعت، سبب فعالیت اکسایش کاتالیزی بر روی سطح آب‌دوست با انرژی آزاد گیبس مناسب می‌شود و گروه‌های عملکردی سطحی برهم‌کنش‌های جذبی را میسر می‌سازد. این مقاله به بررسی روش‌های سنتز و ارزیابی ساختاری مکسن‌ها می‌پردازد و خواص فوتوکاتالیزی آنها را در تخریب رنگ‌ها و داروها ارزیابی می‌کند. مکسن و کامپوزیت‌های آن نور را جذب می‌کنند تا گونه‌های فعال مانند رادیکال هیدروکسیل برای تخریب موثر آلاینده‌هایی چون رنگ‌ها، داروها و سایر ترکیبات آلی تولید نمایند. علیرغم چالش‌هایی مانند ناپایداری اکسایشی و بازترکیب الکترون-حفره، کامپوزیت‌های مبتنی بر مکسن عملکرد برتری را در سیستم‌های بهینه حذف آلاینده نشان می‌دهند. این کار پتانسیل مکسن‌ها را در تصفیه پساب رنگی برجسته می‌کند و بر نقش آنها به عنوان فوتوکاتالیست‌های نسل بعدی تاکید می‌نماید.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167478.1222

واژه‌های کلیدی:

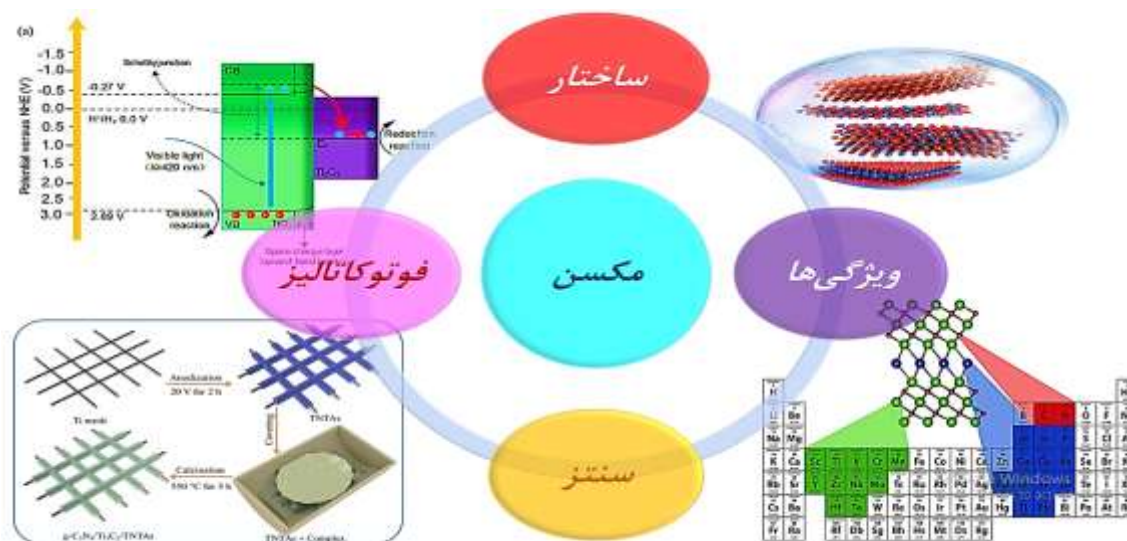
مکسن

ساختار و سنتز

فوتوکاتالیز

حذف رنگ‌ها و آلاینده آلی

پساب



۱- مقدمه

جهان در حال حاضر یک بحران آلودگی بی سابقه را تجربه می‌کند. توسعه صنایع مختلف، افزایش شهرنشینی و تغییر سبک زندگی منجر به گسترش انواع آلودگی‌ها در محیط‌زیست شده است، به طوری که نه تنها زندگی انسان، بلکه زندگی همه جانداران را تهدید می‌کند (۱، ۲). در این میان، بحران آلودگی آب، که با بحران تغییرات اقلیم کره زمین و کمبود آب پیوند خورده، به موضوعی چالش برانگیز تبدیل شده است که دانشمندان و محققان را مجبور به یافتن راه حل‌های موثر و فناوری‌های نوآورانه و شیوه‌های پایدار با هدف کاهش آلودگی کرده است (۳-۵).

تصفیه پساب برای تضمین منابع آب پاک و حفاظت از سلامت عمومی حیاتی است و روش‌های متعددی به این منظور معرفی شده است. روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در این زمره هستند (۶-۸). از میان روش‌های شیمیایی، فرایند فوتوکاتالیز به عنوان یک فرایند کاربردی و سازگار با محیط‌زیست است که از قدرت نور برای هدایت واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌کند و محصولات جانبی شیمیایی را به حداقل می‌رساند. قابلیت استفاده در شرایط ملایم، پایداری و کارایی فراوان فوتوکاتالیزها از مزایای این روش به حساب می‌آید (۹-۱۱). این فرایند شامل استفاده از نیمه‌هادی تخصصی است که نور را جذب می‌کنند و تحریک الکترون‌ها (e^-) را از نوار ظرفیت به نوار رسانش تسهیل می‌کند و در نتیجه جفت الکترون-حفره (e^-/h^+) تشکیل می‌شود. الکترون‌های نوار رسانایی دارای قدرت کاهش قابل توجهی هستند و این آنها را قادر می‌سازد تا در واکنش‌های اکسایش-کاهش^۴ شرکت کنند و نهایتاً مولکول‌های پایدار را به مولکول‌های کوچک‌تر و غیرمضر مانند آب، دی‌اکسید کربن و نیترژن تبدیل گردانند (۱۲-۱۴). محققان در حال حاضر بر روی توسعه فوتوکاتالیزهای جدید با عملکرد و پایداری بهبودیافته متمرکز هستند. در واقع، فوتوکاتالیز یک رویکرد امیدوارکننده برای پرداختن به برخی از مهم‌ترین چالش‌ها در علم انرژی و محیط‌زیست است. با استفاده از خواص منحصر به فرد نانومواد فوتوکاتالیزی و ارتقای درک ما از سازوکارهای آنها، می‌توان گام‌های مهمی به سمت فناوری‌های پایداری برداشت که از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کنند و پایداری زیست‌محیطی را ارتقا می‌دهند. در میان فوتوکاتالیزهای مختلفی که ممکن است به طور موثر آلاینده‌های آلی را تجزیه کنند، فوتوکاتالیزهای مبتنی بر مکسن اخیراً به عنوان یک کانون تحقیقاتی ظاهر شده‌اند. ساختار دوبعدی مکسن‌ها امکان انتشار سریع مولکول‌های رنگ‌زا و سایر آلاینده‌ها را به گروه‌های عاملی فعال مکسن فراهم می‌آورد (بر خلاف مواد متخلخل که در آن انتشار در منافذ می‌تواند محدودکننده سرعت باشد). همچنین سطح مسطح مکسن نیز سینتیک جذب سریع را تسهیل می‌کند. تحت شرایط خاص، بسیاری از مکسن‌ها پایداری خوبی در محلول‌های آبی، به

ویژه در محدوده‌های pH خاص از خود نشان می‌دهند. مکسن‌ها مستعد ادغام با سایر مواد مانند پلیمرها، اکسیدهای فلزی یا کوانتوم دات‌ها، چارچوب‌های فلز - آلی، نانولوله‌های کربنی و غیره هستند. در فرایند فوتوکاتالیز رسانایی الکتریکی مکسن در فوتوکاتالیز برای جداسازی و انتقال بار بسیار کارآمد است. هنگامی که یک فوتوکاتالیز نیمه‌هادی با مکسن ترکیب می‌شود، الکترون‌های تولید شده از نیمه‌هادی می‌توانند به سرعت به لایه‌های مکسن مهاجرت کنند، در واقع انتقال سریع الکترون به مکسن از نوترکیب الکترون-حفره که یک عامل محدود کننده اصلی در کارایی فوتوکاتالیزی است، جلوگیری می‌کند. با کاهش این نوترکیب^۵، الکترون‌های بیشتری برای کاهش اکسیژن و حفره‌ها بیشتری برای اکسید کردن مولکول‌های آلاینده در دسترس هستند و در نتیجه فرایند تخریب را تسریع می‌کنند.

بسیاری از مکسن‌ها به تنهایی نور مرئی را به طور قابل توجهی جذب نمی‌کنند، اما در حالت کامپوزیت فوتوکاتالیزهای توانمندی هستند. هنگامی که مکسن‌ها با نیمه‌هادی‌ها ترکیب می‌شوند، می‌توانند محدوده جذب مواد کامپوزیت را افزایش داده و آن را به سمت ناحیه مرئی گسترش دهند. این امر به ویژه مهم است زیرا نور خورشید دارای نسبت بیشتری از نور مرئی در مقایسه با نور فرابنفش است. علیرغم اینکه مکسن‌ها می‌توانند مواد امیدوار کننده برای تصفیه آب باشند، با چالش‌هایی نیز رو به رو هستند. به دلیل وجود نیروهای قوی واندروالس بین لایه‌های دوبعدی، مکسن‌ها تمایل به تجمع و انباشته شدن مجدد در محلول‌های آبی دارند. همچنین انبوه یون‌های متنوع در پساب ممکن است سبب تجمع و رسوب مکسن شود. البته در بسیاری از موارد این چالش‌ها با کامپوزیت کردن مکسن با سایر مواد حل شده است. چندین تحقیق پتانسیل مواد کامپوزیتی ساخته شده از مکسن و سایر فوتوکاتالیزهای نیمه‌هادی را برای تخریب آلاینده‌های مختلف نشان داده‌اند. در این راستا، در این مقاله مروری، نخست به معرفی مکسن‌ها، ساختار و روش‌های سنتز آنها پرداخته و سپس عملکرد این مواد در فرایند فوتوکاتالیز بررسی شد.

۲- ساختار مکسن‌ها

مکسن‌ها خانواده جدیدی از کاربیدها و نیتrideهای فلزات واسطه دو بعدی هستند که در سال ۲۰۱۱ کشف شدند. از آن زمان، عمیقاً بر علم مواد و فناوری نانو تأثیر گذاشته‌اند (۱۵). فرمول کلی آنها $M_{n+1}X_nT_x$ است که M نمایانگر فلزات واسطه، X نشان دهنده کربن و یا نیتروژن و T نشان دهنده پایانه‌های سطحی است که می‌توانند گروه‌های عملکردی مختلفی باشند (شکل ۱) (۱۶).

^۴ Oxidation-reduction^۵ Recombination^۶ Terminals^۱ Valence band^۲ Conduction band^۳ Electron-hole

1	1 H	2	M M in MXene and MAX	M M group only in MAX	T Surface Terminations	13	14	15	16	17	2 He							
3	3 Li	4 Be				5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne							
11	11 Na	12 Mg																
19	19 K	20 Ca	3 Sc	4 Ti	5 V	6 Cr	7 Mn	8 Fe	9 Co	10 Ni	11 Cu	12 Zn	13 Ga	14 Ge	15 As	16 Se	17 Br	18 Kr
37	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55	55 Cs	56 Ba	-	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87	87 Fr	88 Ra	=	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

شکل ۱: مواد سازنده مکسن‌ها در جدول تناوبی، بلوک‌های ساختمان مکسن‌ها با رنگ‌های متفاوت مشخص شده است (۴۱، ۴۲).

Figure 1. Mxene composites in the periodic table, the building blocks of maxenes are colored (41, 42).

می‌دهد (۳۰-۲۷). مکسن‌های مبتنی بر تانتالوم (Ta)، به طور کلی دارای پایداری بالا و خواص الکترونیکی منحصر به فرد هستند. آنها را می‌توان در برنامه‌های کاربردی در دمای بالا استفاده کرد و نیز ویژگی‌های الکتروشیمیایی مطلوبی نشان می‌دهند. جالب است بدانید که مانند نیوبیم (Nb) در برابر اکسایش مقاوم هستند، از این رو برای کاربردهای مختلف مناسب هستند (۳۴-۳۱).

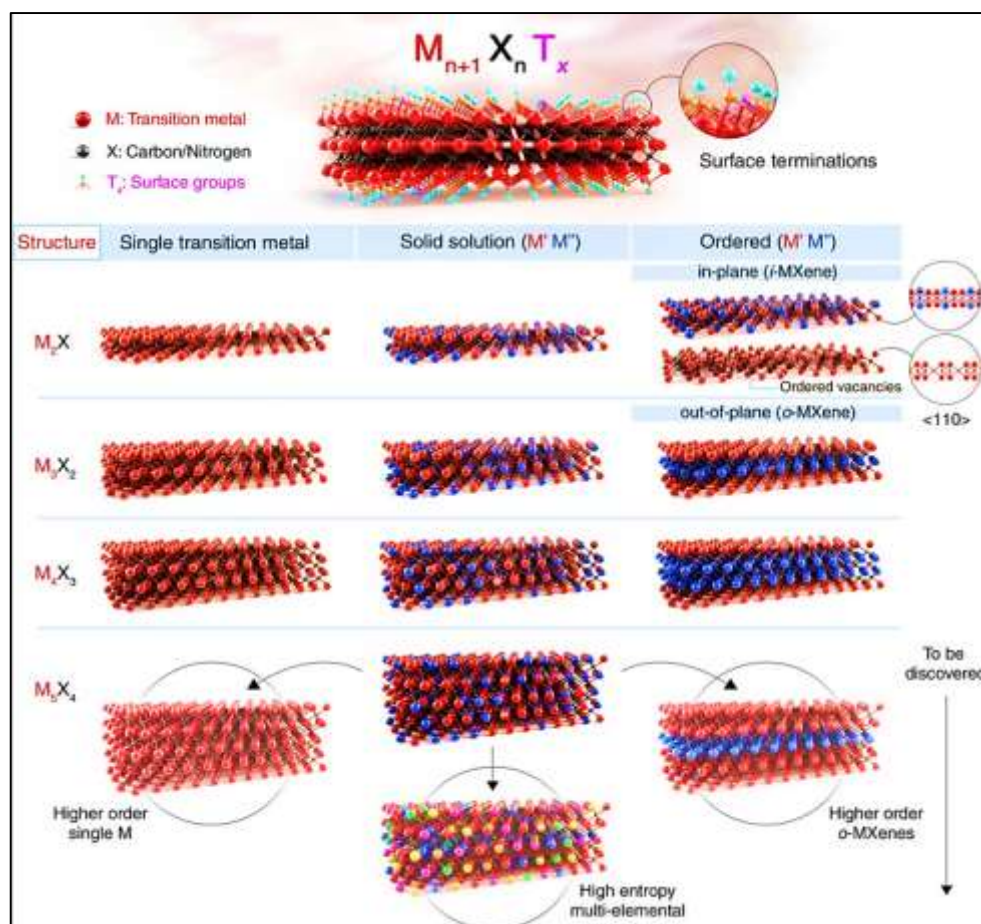
۲-۲- عناصر (X)

عناصر (X) مختلف در ساختار مکسن‌ها اثرات قابل توجهی بر روی خواص آن می‌گذارند. هنگام مقایسه مکسن‌ها با عناصر X مختلف، تفاوت در پیوند شیمیایی، واکنش سطح، رسانایی، پایداری حرارتی و استحکام مکانیکی می‌تواند به مناسب بودن مکسن‌های خاص برای کاربردهای خاص کمک کند. مکسن‌های حاوی کربن متداول‌ترین مکسن‌ها هستند که رسانایی الکتریکی و پایداری شیمیایی خوبی نشان می‌دهند (۳۵، ۱۹). مکسن‌های دارای نیتروژن معمولاً تمایل به خواص مکانیکی افزایش یافته دارند و به طور بالقوه می‌توانند به دلیل رسانایی و خواص ساختاری، اثربخشی محافظ الکترومغناطیسی را بهبود بخشند. مکسن‌های با انت‌های اکسیژن مقاومت اکسایش قوی نشان می‌دهند و آنها را برای کاربردهای با دمای بالا مناسب می‌کنند (۳۶، ۳۷). وجود اکسیژن همچنین می‌تواند بر ساختار الکترونیکی تأثیر بگذارد و رسانایی را در مقایسه با مکسن‌های مبتنی بر کربن کاهش دهد (۳۸).

محاسبات نظری بیش از ۱۰۰ ترکیب بالقوه مکسن را پیش‌بینی کرده‌اند و بیش از ۴۰ ساختار در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده‌اند (۱۷)، نمایی از ساختار کلی مکسن در شکل ۲ ارائه شده است.

۲-۱- فلزات واسطه (M)

فلزات واسطه (M) در مکسن‌ها دارای خواص و عملکردهای متنوعی هستند. مکسن‌های مبتنی بر تیتانیوم رسانایی الکتریکی، استحکام مکانیکی و آب دوستی بالایی از خود نشان می‌دهند و معمولاً در ذخیره انرژی (خازن) و به عنوان کاتالیست امیدوارکننده هستند (۱۹، ۱۵). مکسن‌های مبتنی بر نیوبیم (Nb) معمولاً پایداری حرارتی بیشتری را در مقایسه با هم‌تایان مبتنی بر تیتانیوم Ti نشان می‌دهند. همچنین به رسانایی بالا و عملکرد خوب در کاربردهای باتری معروف هستند و می‌توانند مقاومت اکسایش بهتری داشته باشند (۲۳-۲۰). مکسن‌های مبتنی بر زیرکونیم (Zr) خواص مکانیکی و پایداری خوب و خواص الکترونیکی جالبی را نشان می‌دهند و می‌توانند در کاربردهای الکترونیکی و الکتروشیمیایی استفاده شوند. همچنین زیرکونیم، تعادلی بین رسانایی و مقاومت در برابر اکسایش ایجاد می‌کند (۲۶-۲۴). مکسن‌های مبتنی بر وانادیم (V) فعالیت اکسایش و کاهش بالایی از خود نشان می‌دهند، که آنها را برای کاربردهای باتری و ابرخازن‌ها مناسب می‌کند. آنها می‌توانند عملکرد الکتروشیمیایی را افزایش دهند. اما در مقایسه با مکسن‌های تیتانیوم و نیوبیم پایداری حرارتی کمتری دارند. مکسن‌های مبتنی بر مولیبدن (Mo) اغلب استحکام مکانیکی و هدایت حرارتی عالی را نشان می‌دهند. به خصوصیت کاتالیزی شهرت دارند و می‌توانند در واکنش‌های الکتروشیمیایی موثر باشند. این گروه از مکسن‌ها می‌توانند حالت‌های اکسایش متنوعی داشته باشند که واکنش‌پذیری آنها را افزایش



شکل ۲: شمای از ساختار مکسن (۱۷، ۴۱، ۴۳).

Figure 2: Schematic images of the mxene structure (17, 41, 43).

در محیط‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. پایانه‌های آمینه می‌توانند واکنش‌پذیری شیمیایی مکسن‌ها را افزایش داده و مکان‌های لنگر^۲ را برای عملکرد با پلیمرها یا مولکول‌های زیستی بهبود بخشند و آنها را برای کاربردهای زیست‌پزشکی امیدوارکننده می‌سازند (۳۹، ۴۰).

۳- سنتز مکسن‌ها

توسعه جامع از روش‌های سنتز مکسن برای کشف انواع جدید مکسن و بهبود عملکرد آنها انجام شده است. مسیرهای ساخت شیمیایی و فیزیکی مکسن‌ها بسته به ترکیبات مکسن مورد نظر می‌تواند بسیار متفاوت باشد. با این حال، در اکثر روش‌های سنتز مکسن‌ها از یک لوازم جانبی شیمیایی استفاده می‌کنند. مکسن‌ها نوعی از نانومواد با پیوندهای کووالانسی هستند که از عناصر واسطه اولیه و عناصر نیتروژن یا کربن تشکیل شده است. این یک اسکلت درون مولکولی را فراهم می‌کند که در آن لایه‌ها توسط پیوندهای هیدروژنی به هم متصل

۲-۳- گروه‌های عملکردی (T)

T در فرمول مکسن به گروه‌های عملکردی سطحی اشاره دارد که وابسته به شرایط سنتز و اصلاح ساختاری مکسن هستند. اکسیژن آب دوستی را افزایش می‌دهد و پراکندگی در آب را تسهیل می‌کند. پایانه‌های اکسیژن می‌توانند رسانایی الکترونیکی مکسن‌ها را افزایش دهند، اما ممکن است نقص‌هایی را نیز ایجاد کنند که می‌تواند بر پایداری کلی تأثیر بگذارد. فلورین خواص الکترون‌کشایی قوی را ارائه می‌دهد که می‌تواند پایداری مکسن را در برابر اکسایش بهبود بخشد. مکسن‌های فلوئوردار اغلب آب‌گریزتر هستند. گروه‌های هیدروکسیل به برهم‌کنش قوی با آب کمک می‌کنند، بنابراین آب دوستی مکسن را افزایش می‌دهند. پایانه‌های هیدروکسیل همچنین می‌توانند عملکردهای الکتروشیمیایی خاصی را افزایش دهند و در کاربردهایی مانند ابرخازن‌ها موثرتر شوند. پایانه‌های کلر کمتر رایج هستند اما می‌توانند در حین سنتز وارد شوند. آنها مجموعه‌ای منحصر به فرد از خواص را ارائه می‌دهند که به طور بالقوه بر رسانایی و پایداری مکسن

²Anchorage

¹Electronegativity

می‌شوند. از زمان کشف اولین مکسن، Ti_3C_2Tx ، در سال ۲۰۱۱، بیش از ۲۰ نوع ماده مکسن از جمله M_2X ، M_3X_2 و M_4X_3 به طور متوالی تهیه شده است. به طور کلی، سه نوع روش در سنتز مکسن وجود دارد: اچ‌کردن، از بالا به پایین و پایین به بالا. در روش اچ‌کردن، عناصر A (گروه IIIA یا IVA و غیره است) که در شکل ۱ نشان داده شده است. از فازهای لایه سه بعدی اصلی MAX حذف شده و ساختار لایه‌ای مکسن‌ها شکل می‌گیرد. تا به حال، رایج‌ترین رویکرد برای سنتز مکسن‌ها روش از بالا به پایین شناخته شده است. برخلاف روش ساخت از پایین به بالا، که معمولاً به تعداد زیادی مواد پیش ساز نیاز دارد، مسیر ساخت سنتز از پایین به بالا به تعداد کمی مولکول / اتم آلی یا معدنی در هنگام ساختن دقیق ساختار نیاز دارد. با استفاده از یک روش رشد بلوری، پیش‌سازها را می‌توان در یک نظم دو بعدی مشخص که ساختارهای مکسن را تشکیل می‌دهد، مونتاژ کرد. مزایای رویکرد پایین به بالا امکان کنترل دقیق توزیع اندازه، شکل و عملکردهای پایانه سطح مکسن‌ها را به روشی مناسب فراهم می‌کند (۴۴).

مکسن‌ها را می‌توان به روش‌های مختلفی تهیه کرد. با توجه به تغییراتی که در روش‌های اچ کردن آنها ایجاد می‌شود، می‌توان گروه‌های عاملی انتهایی مختلفی را به اتم‌های M متصل کرد، تا انرژی آزاد گیبس سطح آن‌ها کاهش یابد. در واقع، ویژگی‌های سطح مکسن‌ها تأثیر زیادی از روش ساخت آنها می‌گیرد. در اینجا انواع مختلفی از روش‌های آماده سازی مورد بحث قرار می‌گیرد و در جدول ۱ قابل مشاهده است.

با توجه به تحقیقات عمیق در مورد مکسن‌ها روش‌های اچ‌کردن به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته اند، و ویژه روش اچ با اسید (HF)، که هنوز هم رایج‌ترین روش مورد استفاده است. در تحقیقی، ساخت فاز MAX، Ti_3AlC_2 را از طریق اچ‌کردن اسید HF در سال ۲۰۱۱ پیشنهاد شد (۱۵). اسید HF با استفاده از یک فرایند جابجایی ساده، لایه‌های Al را از فاز MAX، Ti_3AlC_2 با تولید H_2 حذف می‌کند.

به طور معمول، مکسها به لایه‌های (۲، ۳ و ۴) MnX_{n-1} اشاره دارند که با حذف اتم‌های میان‌لایه A از فاز MAX فلز-سرامیک تشکیل شده‌اند (که در آن M مخفف فلزات واسطه است، A گروه IIIA یا IVA است و X نشان‌دهنده عناصر C و N است). اتم‌های M و X روی هم قرار می‌گیرند تا شبکه‌ای شش ضلعی را در فاز MAX تشکیل دهند که اتم‌های X مرکز قفس هشت‌وجهی M را اشغال می‌کنند که به لایه‌های آن مشترک هستند. هنگامی که اتم‌های A از لایه MnX_{n-1}

Table 1: Different etching methods used to obtain maxens (40).

Type Of Method	Etchant	Temperature (oC)	Refs
Acid with fluorine	HF	Room temperature (RT) to 55	(15)
	H ₂ O ₂ +HF	40	(46)
	HCl + LiF	35-55	(49)
	HCl + (Na, K, or NH ₄ F)	30-60	(52)
	NH ₄ F ₂	RT	(53)
Molten salts	LiF+ NaF+ KF	550	(54)
Hydrothermal	NaBF ₄ , HCl	180	(55)
Electrochemical	NH ₄ Cl/TMAOH	RT	(56)
	HCl	RT	(57)
Lewis acid	ZnCl ₂	550	(58)

¹ Etching

انجام می‌گردد (۵۰). اچ کردن یک فرایند کند است. Ti_3C_2Tx به دست آمده با اچ کردن مستقیم با اسید هیدروفلوئوریک دارای مورفولوژی متفاوتی با Ti_3C_2Tx است که با اچ کردن با LiF/HCl به دست می‌آید. علاوه بر این، طیف‌سنجی NMR تعداد بیشتری از گروه‌های عاملی -OH و F- را بر روی سطح Ti_3C_2Tx نشان داد که توسط اسید هیدروفلوئوریک اچ شده‌اند، در حالی که اچ LiF/HCl ماده‌ای را با گروه‌های عاملی عمدتاً O- ارائه می‌کند (۳۵). ساخت مکسن‌ها با اچ کردن انتخابی توپوشیمیایی^۲ مواد پیش‌ساز، معمولاً فاز MAX، شروع می‌شود. فازهای MAX کاربیدها و نیتrideهای لایه ای با ساختار بسته‌بندی شده شش ضلعی هستند (A در MAX مخفف عناصر گروه A جدول تناوبی مانند Al، Ga، Si است) و نقش اساسی در کیفیت مکسن دارند (۵۱). اچ کردن انتخابی با حذف اتم‌های لایه A از فاز MAX انجام می‌شود و با لایه‌برداری از قسمت‌های دوبعدی مکسن که به صورت آزاد روی هم چیده شده‌اند، ادامه می‌یابد.

۳-۱-۴- اچ کردن با نمک مذاب^۳

مکسن همچنین می‌تواند با حرارت دادن فازهای MAX، مانند Ti_4AlN_3 ، در مخلوط نمک فلورید مذاب (یعنی LiF ، NaF ، KF) نسبت وزنی ۲۹:۱۲:۵۹ در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت پوشش آرگون برای تولید Ti_4N_3 تولید شود. روش اچ کردن را می‌توان در ۳۰ دقیقه کامل کرد. از آنجایی که Ti_nN_{n-1} پایداری کمتری نسبت به Ti_nC_{n-1} دارد، می‌توان آن را در HF یا سایر اسیدهای مبتنی بر فلورید که به عنوان عامل اچ استفاده می‌شود، سنتز کرد. روش اچ کردن با نمک مذاب از مزیت زمان پردازش نسبتاً سریع برخوردار است. تبلور Ti_4N_3 لایه‌لایه شده کمتر از مکسن است که از طریق اچ با HF بدست می‌آید، همان‌طور که توسط الگوهای XRD نشان داده شده است، تبلور Ti_4N_3 لایه‌لایه شده کمتر از مکسن است که از طریق اچ کردن با HF به دست می‌آید. در محصول به دست آمده نیز فاز TiO_2 قابل مشاهده است. در مقایسه با اچ کردن با هیدروفلوریک اسید (HF) و اسیدهای مبتنی بر فلورید، فرایند اچ کردن نمک‌های مذاب از مزایای بیشتری برخوردار است و مشکل تولید مکسن‌ها با پایداری محدود در محلول HF یا اسیدهای مبتنی بر فلورید را ندارد. این روش، از سوی دیگر، دارای معایب زیر است:

- (الف) فرایند اچ کردن مقدار قابل توجهی گرما و انرژی مصرف می‌کند.
- (ب) مکسن‌های حاصل خلوص و بلورینگی کم را نشان می‌دهند.
- (ج) مکسن‌های حاصل دارای عیوب سطحی و جای خالی فراوان هستند (۵۹).

علاوه بر این، واکنش آب دیونیزه شده با محلول اسید HF باعث تولید Ti_3C_2Tx که T نشان دهنده (O-، OH- و F- است) و همچنین H_2 است، می‌شود. اچ کردن اسید HF برای جداسازی موفقیت آمیز $(V_{0.5}Cr_{0.5})_3AlC_2$ ، Ta_4AlC_3 ، Ti_3AlCN ، $(Ti_{0.5}Nb_{0.5})_2AlC$ ، Ti_2AlC ، Nb_2AlC و مجموعه ای از کمپلکس‌های MAX از M_3AlC_5 ، Zr_3Al_3 ، M_3AlC_5 ، $Ti_{0.5}Nb_{0.5}$ استفاده شد (۴۶). اچ کردن اسید HF از سال ۲۰۱۱ تا به امروز به طور مداوم مفیدترین فرایند سنتز برای مواد مکسن بوده است. در فرایند اچ کردن اسید HF، دوره زمانی، دما و چگالی یون‌های F نقش مهمی در طراحی لایه‌های مکسن‌ها با کیفیت بالا ایفا می‌کنند. در تحقیقی تایید شد که Ti_3C_2Tx با اسید HF با غلظت بالا، ساختار لایه‌ای عالی ایجاد می‌کند که دستیابی به آن با محلول‌های اسیدی دیگر دشوار است. مکسن‌های به دست آمده از طریق روش اچ کردن با اسید HF ویژگی‌های سطحی منحصربه‌فرد خود را همراه با عملکردهای O-، OH- و F- حفظ کردند (۴۷).

۳-۱-۲- روش اصلاح اسید اچ کردن^۱

محلول‌های اسید فلورید دارای خواص خورنده و سمی هستند و به همین دلایل، محققان در حال یافتن تکنیک‌هایی برای جلوگیری از استفاده مستقیم اسید HF برای استخراج لایه‌های Al از فازهای MAX هستند. مهمترین رویکرد، که به عنوان اچ کردن اسید HF در مرحله اصلی شناخته می‌شود، اسید HF را با نمک‌های فلورید (به عنوان مثال، LiF ، NH_4HF_2 ، FeF_3 ، NaF ، KF و HCl) جایگزین می‌کند. معمولاً در طی سنتز مکسن‌ها از طریق اچ کردن لایه‌های آلومنیوم Al یا گالیم Ga فاز MAX توسط اسید HF، یک محصول جانبی ناخواسته (یعنی $AlF_3 \cdot 3H_2O$) تشکیل می‌شود. برای سنتز مکسن‌ها عاری از این ناخالصی، لازم است عوامل آغاز کننده تشکیل آن روشن شوند. بنابراین، روش‌های اچ اصلاح شده به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، در تحقیقی استنباط شد که برای کنترل تشکیل محصول جانبی $AlF_3 \cdot 3H_2O$ ، فرایند اچ کردن با فلورید کبالت (به عنوان مثال) CoF_2/CoF انجام می‌شود (۴۸). فاصله لایه‌ای مکسن‌ها که از طریق روش اصلاح شده اسید اچ کردن ایجاد می‌شود، به دلیل درهم آمیزی کاتیون، که نیروی داخلی بین لایه‌ها را به حداقل می‌رساند، بهبود می‌یابد، و به طور بالقوه لایه‌های مواد را در طول فراصوت لایه‌بندی می‌کند. در نتیجه، این رویکرد زمان‌بر قبلی را کوتاه می‌کند (۴۹).

۳-۱-۳- تشکیل HF در محل

استفاده از مخلوطی از نمک‌های فلورید مانند (LiF) و اسیدهایی مانند (HCl) برای تولید (HF) به روشی کنترل شده و به دنبال آن لایه‌برداری

³ Molten salt

¹ Modified fluoride-based acid etching

² Topochemical

سیاه، $g-C_3N_4$ و دیگر پیش سازهای توده ای سه بعدی و دوبعدی با استفاده از روش بالا به پایین، به طور موثر به نقاط کوانتومی تبدیل شده اند. آسیاب گلوله ای، اچ کردن شیمیایی، الکتروشیمیایی (۶۴)، عملیات هیدروترمال/حلال گرمایی، فراصوت، تابش میکروویو و سایر روش ها از جمله این روش ها هستند. اکثر رویکردهای بالا به پایین، عملکردهای اولیه حاوی O_2 را بر روی سطح کاتالیست ها ایجاد می کنند که ایجاد نقص در کاتالیست ها را تسهیل می کند. نقص های سطحی به عنوان مکان های واکنشی عمل می کنند و به مولکول های حجیم اجازه می دهند تا به ذرات کوانتومی کوچک تقسیم شوند (۶۵). این تکنیک از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا می توان آن را در دماهای پایین کار کرد. علاوه بر این، می توان از مواد خام فراوان در این روش استفاده کرد و تولید در مقیاس بزرگ با این روش امکان پذیر است.

۳-۲-۱- رویکرد هیدروترمال

این یک رویکرد واکنشی ناهمگن است که شامل حرارت دادن محلول های آبی بالای نقطه جوش آب در یک اتوکلاو فشار بالا حاوی مواد پیش ساز است. اثر هم افزایی دما، فشار بالا و pH محلول می تواند برای تغییر اندازه، شکل، ریخت و خواص کوانتوم دات مورد استفاده قرار گیرد (۶۶). علاوه بر این، pH محلول، دمای واکنش و دوره زمانی نقش حیاتی در تولید مک سن دارند. برای سنتز مک سن، دمای واکنش ۱۰۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی گراد و pH در مقدار ۶ تا ۹ استاندارد نگه داشته می شود (۶۷)، زیرا مدت زمان واکنش تحت تأثیر pH و دما است. علاوه بر این، با تنظیم شرایط واکنش گرمایی، می توان اندازه، خواص و ضخامت ماده را تغییر داد.

۳-۲-۲- رویکرد حلال گرمایی

فرایند حلال گرمایی ساده و کارآمدتر از روش هیدروترمال است و به طور گسترده برای ساخت مکسن استفاده شده است. این شبیه به فرایند هیدروترمال است با این تمایز که به جای آب، از یک حلال آلی غیرآبی برای ساخت با پیش سازها استفاده می شود. از آنجایی که اندازه، توزیع و تبلور مواد را می توان به طور دقیق در صورت نیاز تنظیم کرد، روش حلال گرمایی در مقایسه با روش هیدروترمال موفق تر و سازگارتر در نظر گرفته می شود (۵۵). علاوه بر این، با تنظیم عوامل آزمایشی مانند دمای واکنش، مدت زمان و نوع حلال، می توان نتیجه مورد نظر را به دقت تنظیم کرد.

۳-۲-۳- رویکرد آسیاب گلوله ای

در رویکرد آسیاب گلوله ای، QD کوانتوم دات های مختلف با موفقیت از ساخته شده اند که روشی است که به طور گسترده از بالا به پایین برای

با این وجود در پژوهشی سنتز $MS-Ti_3C_2T_x$ از طریق ترکیب هیدروکسید تترا بوتیل آمونیوم (TBAOH) و به دنبال آن جداسازی لایه از طریق فراصوت گزارش شد. $MS-Ti_3C_2T_x$ با پایانه کلر به دست آمده به عنوان آند در باتری لیتیم یونی مورد استفاده قرار گرفت که به ظرفیت ویژه بالا و قابلیت نرخ استثنایی دست یافته است (۶۰).

۳-۱-۵- اچ کردن بدون فلورید^۱

اگرچه چندین شرایط اچ برای سنتز مکسن تایید شده است، اکثر روش های سنتز به HF یا مواد شیمیایی مبتنی بر فلورید نیاز دارند، که ممکن است منجر به ایجاد انتهای F- و O- در سطح مشترک مکسن شود. به طور خاص، پایانه های F- عملکرد الکتروشیمیایی ابرخازن های مبتنی بر مکسن ها را کاهش می دهد (۶۱). بنابراین، روش های ساخت بدون فلورید برای ارائه عملکردهای الکتروشیمیایی قابل قبول ضروری است. یون F^- متصل به سطح به طور قابل توجهی مانع از حمل و نقل یون های الکترولیت می شود و مکان های فعال الکتروشیمیایی را قربانی می کند، که منجر به عملکرد پایین مکسن ها برای کاربرد در باتری های لیتیم و ابرخازن ها می شود (۶۲، ۶۳). بنابراین، ساخت مکسن ها با استفاده از روش های بدون F بسیار مطلوب است.

۳-۱-۶- اچ کردن الکتروشیمیایی^۲

اچ کردن الکتروشیمیایی روشی جهت سنتز مکسن است که از فازهای MAX با حذف انتخابی عناصر لایه A استفاده می شود. در این فرایند از یک سلول الکتروشیمیایی با فاز MAX به عنوان آند، یک ماده بی اثر به عنوان کاتد و در صورت تمایل یک الکترو مرجع استفاده می شود. الکترولیت حاوی یون های فلورید ناشی از HF یا نمک های فلورید در محلول های اسیدی هستند. در طول فرایند، یک پتانسیل مثبت به فاز MAX اعمال می شود و عناصر لایه A را اکسید می کند و با کمک یون های فلورید آنها را در الکترولیت حل می کند. پتانسیل و زمان اچ کردن عوامل مهمی هستند که برای اطمینان از حذف کامل لایه A بدون آسیب رساندن به لایه های MX، به بهینه سازی دقیق نیاز دارند. در حین اچ کردن، یون های الکترولیت بین لایه های MX قرار می گیرند و ساختار را تثبیت می کنند.

۳-۲-۲- رویکردهای بالا به پایین^۳

برای مدت طولانی، استراتژی از بالا به پایین، به ویژه در سنتز و طراحی نانومواد، به خوبی تثبیت شده است. این روش اغلب شامل برش مواد پیش ساز حجیم دو بعدی یا سه بعدی به ذرات کوانتومی ضروری هستند. گرافیت، نانولوله های کربنی، گرافن، بلورهای MoS_2 ، پودر WS_2 ، فسفر

⁴ Quantum dot

⁵ Solvothermal

⁶ Ball-Milling

¹ Fluoride-free etching

² Electrochemical etching

³ Top-down approaches

و حل گرمایی برای کوتاه کردن زمان واکنش و افزایش بازده بسیار موثر است (۷۰).

۳-۲-۵- مزایا و معایب روش سنتز بالا به پایین مکسن

مزیت تهیه مکسن‌ها با روش‌های سنتز بالا به پایین این است که اولاً این روش‌ها مقیاس پذیرند و برای اکثر فازهای MAX قابل استفاده است. ثانیاً می‌توان با این روش‌ها مقدار زیادی مکسن‌ها به سرعت تولید کرد و نهایتاً به خوبی با انواع گزینه‌های اچ کردن تثبیت می‌شوند (۷۰).

۳-۳- رویکردهای پایین به بالا^۹

رویکردهای پایین به بالا از مواد مولکولی به عنوان پیش سازها استفاده می‌کنند. همچنین می‌توان از روش‌های پایین به بالا برای ساخت مکسن کوانتوم دات MQD از پیش‌سازهای کوچک مول‌های آلی و معدنی استفاده کرد. رویکردهای پایین به بالا دارای تعدادی مزیت هستند، از جمله استفاده آتمی بیشتر، کنترل ساختار و ریخت و عملکرد سریعتر، از جمله مواردی که به کوانتوم دات QD ساختار و خواص بهتری می‌دهند (۷۱، ۷۲). تحقیقات قبلی یک پایه عالی برای آماده سازی مکسن از پایین به بالا فراهم می‌کند. با این حال، برای ساخت در مقیاس بزرگ، پیش‌سازهای ساده و بسیار کارآمد با سمیت کم، شرایط واکنش ملایم، بلورینگی عالی، تک پراکندگی و بازده بالا باید پوشانده شوند. در همین حال، به دلیل شرایط عملیاتی نسبتاً ساده آنها در مقایسه با روش‌های بالا به پایین، روش‌های یک طرفی از پایین به بالا احتمالاً برای آماده‌سازی مکسن در آینده برای برآوردن الزامات برنامه افزایشی استفاده خواهند شد، همان‌طور که تحقیقات کمی وجود دارد (۶۶، ۷۰).

۳-۳-۱- سنتز نمک مذاب^{۱۰}

به دلیل سهولت استفاده و زمان واکنش کوتاه، فرایند سنتز نمک مذاب اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. چنگ^{۱۱} و همکارانش با استفاده از استیل استونات مولیبدن به عنوان پیش ماده یک کامپوزیت Mo₂C / کوانتوم دات / نانوصفحه کربنی سنتز کردند. در یک سنتز معمولی، پیش‌ساز استیل-استونات مولیبدن، NaCl و یک مخلوط ساکارز به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک محیط هوا تکلیس شدند.

۳-۳-۲- پیرولیز^{۱۲}

پیرولیز یک روش شناخته شده از پایین به بالا برای مکسن است، زیرا یک روش صرفه جویی در زمان، آسان و از نظر زیست محیطی بی‌خطر است.

کاهش اندازه نانوذرات استفاده می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و شکل مواد تولید شده تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع آسیاب (تر یا خشک)، سرعت آسیاب، نسبت وزن گلوله به پودر و مدت زمان آسیاب می‌باشد. در تحقیقی از روش آسیاب گلوله‌ای برای ساختن نانو نقطه های Ti₃C₂T_x مکسن با اندازه های مختلف با مخلوط کردن Ti₃C₂T_x با پیش‌سازهای مختلف جامد مانند P قرمز، S، C و Si استفاده کرد (۶۸). در طی این فرایند، تشکیل پیوند TiO_x اتفاق می‌افتد، که باعث لایه لایه شدن و کاهش اندازه ذرات Ti₃C₂T_x مکسن می‌شود، که توسط استحکام پیوند OX کنترل می‌شود. هرچه برهم کنش OX قوی‌تر باشد، اندازه ذرات کوچک‌تر خواهد بود.

۳-۲-۴- روش فراصوت^۱

تکنیک فراصوت یک روش سازگار با محیط‌زیست و بدون خطر است که برای ساخت کوانتوم دات‌های مکسن استفاده می‌شود. با توجه به آکوستیک^۲ و کاویتاسیون^۳ فرایند فراصوت مواد لایه‌ای و همچنین بدون لایه را به کوانتوم دات تبدیل می‌کند. در این روش، ویژگی‌های ذاتی مواد به طور موثر حفظ می‌شود. حلال‌هایی مانند دی متیل سولفوکسید (DMSO)، دی متیل فرم‌امید (DMF)،^۴ و N-متیل-۲-پیرولیدون^۵ و NMP و تترا- بوتیل‌امونیوم هیدروکسید (TBAOH)،^۶ با نقاط جوش و انرژی‌های سطحی بالا، می‌توانند بر نیروی اتصال مواد حجیم غلبه کرده و آنها را به QD های بسیار پراکنده و با اندازه کوچک تبدیل کنند. در تحقیقی برای تولید Ti₃AlC₂ مکسن مستقیماً از فاز MAX، از روش‌های لایه برداری به کمک اچ و لایه‌برداری مایع با کمک نیروی مکانیکی با حلال TBAOH استفاده شد (۶۹). ذرات حجیم Ti₃AlC₂ در طی درمان فراصوت به ذرات کوچک‌تر با لبه‌ها و مکان‌های سطحی جدید تجزیه می‌شوند. با درمان گروه OH با یک حلال، این مکان‌ها به عنوان Al(OH)₄ حذف شدند. در همین حال، تشکیل صفحات مکسن ایزوله صورت گرفت (۶۹). سپس این صفحات از طریق فراصوت حمام به مکسن تبدیل شدند. ضخامت و متوسط اندازه جانبی MQD های به دست آمده به ترتیب ۰/۶ و ۴/۹ نانومتر بود. حلال‌های آلی با نقطه جوش بالا، قبل از استفاده در محیط‌های آبی از طریق روش فراصوت، نیاز به درمان گسترده دارند. تبخیر چرخشی در دمای بالا به عنوان پس از درمان بر قابلیت‌های نوری و کاتالیزی نقاط کوانتومی تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، روش‌های سنتز مکسن در یک محیط آبی توجه زیادی را به خود جلب کرد. علاوه بر این، استفاده گسترده به دلیل روش فراصوت طولانی و بازده خروجی کم چالش برانگیز است. در نتیجه، ترکیب روش فراصوت با روش‌های گرمایی

⁸ Tetrabutylammonium hydroxide

⁹ Bottom-up approaches

¹ Molten salt

¹ Cheng

¹ Pyrolysis

0

1

2

¹ Ultrasonic

² Acoustic

³ Cavitation

⁵ Dimethyl sulfoxide

⁶ Dimethylformamide

⁷ N-methyl-2-pyrrolidone

به طور کلی مکسن‌ها را می‌توان به صورت پودر چند لایه یا محلول‌های کلئیدی تک پوسته تهیه کرد (۴۰). ML مکسن‌ها از پشته‌های مکسن که به صورت لایه‌ای متصل شده‌اند، ساخته می‌شوند، در حالی که مکسن‌های کلئیدی از لایه برداری ML مکسن‌ها به مکسن‌های تک پوسته، به دست می‌آیند (۴۷).

چهار فرمول ترکیبی مختلف مکسن‌ها به عنوان $M_3X_2T_x$ ، M_2XT_x ، $M_4X_3T_x$ و $M_5X_4T_x$ سنتز شده‌اند. تحقیقات روی مکسن‌ها به سرعت در حال پیشرفت است و تلاش‌های مداومی برای سنتز و توصیف ترکیبات و ساختارهای جدید وجود دارد. ممکن است ترکیبات یا تغییرات بیشتری ظاهر شده باشد یا تا سال ۲۰۲۶ سنتز شود. ماهیت پویایی علم مواد به این معنی است که اکتشافات جدید می‌توانند مکرراً اتفاق بیفتند و محققان کاوش در ترکیبات مختلف را ادامه می‌دهند (۷۶). روش‌های سنتز مکسن در شکل ۳ خلاصه شده است.

۴- فرایند فوتوکاتالیز

فوتوکاتالیز فرایندی است که در آن از انرژی نور برای هدایت واکنش‌های شیمیایی بر روی سطح کاتالیست استفاده می‌شود. در واقع با دسته‌ای از واکنش‌های اکسایش- احیا گونه‌های فعالی تولید می‌شوند که این گونه‌ها واکنش فوتوکاتالیزی را پیش می‌برند.

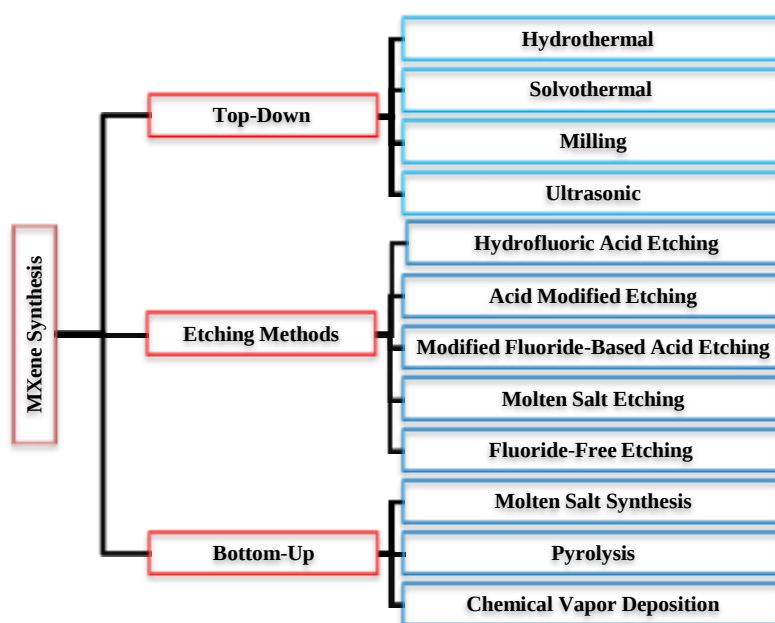
وانگ^۱ و همکارانش کامپوزیت‌های چند وجهی $QDs-Mo_2C$ کربن را از طریق یک روش تجزیه در اثر حرارت ساده ساخت (۷۴). به طور خلاصه، $Mo/ZIF-8$ از طریق روش حلال گرمایی سنتز شد و سپس در دمای $^{\circ}C$ ۷۰۰ به مدت ۲ ساعت در یک محیط آرگون قبل از اچ‌شدن با اسید، پیرولیز شد. در رویکردهای پایین به بالا، پیش‌سازهای مولکولی با انتخاب منابع عناصر و همچنین عوامل واکنش مانند زمان واکنش، دما و غلظت پیش ماده، در سنتز کوانتوم دات‌ها بسیار مهم هستند. این رویکرد در مقایسه با روش‌های بالا به پایین، کارآمد، ساده و پراکنده است و دارای بازده بالا، بلورینگی بهبودیافته و شرایط نرمال مورد نیاز برای واکنش‌ها می‌باشد. با این حال، تحقیقات بسیار کمی در مورد سنتز مکسن انجام شده است. این رویکردها در آینده نزدیک مورد توجه بیشتری قرار خواهند گرفت تا نیاز به کاربردهای افزایشی را برطرف کند (۷۵، ۷۰).

۳-۳-۳- نهشت بخار شیمیایی^۱ (CVD)

گازهای پیش‌ساز (هالیدهای فلزی و منابع کربن/نیتروژن) روی یک بستر در دمای بالا واکنش داده و لایه‌های نازک مکسن را تشکیل می‌دهند. برای مثال فیلم‌های Mo_2C روی یک بستر مسی رشد می‌کنند.

۳-۳-۴- رشد با الگو^۲

یک الگوی مشخص (مثلاً یک بستر دو بعدی) ر سوب لایه‌های مکسن را هدایت می‌کند که سپس جدا می‌شوند. مکسن‌های تک لایه فر ضی مانند W_5N_6 مستقیماً روی یک بستر رشد می‌کنند.



شکل ۳: روش‌های متعدد سنتز مکسن‌ها (۷۰).

Figure 3: Various methods for synthesizing mexanes (70).

³growth on patterned substrates

¹Wang

² Chemical vapor deposition

تجمع سطح موجود را کاهش می دهد، بنابراین روش های به حداقل رساندن آن حیاتی است.

۴-۲- انواع فوتوکاتالیست

فوتوکاتالیست ها به دو دسته همگن^۱ و ناهمگن^۲ تقسیم می شوند. محدودیت ها و چالش های فوتوکاتالیست های تک جزیی (همگن) اولیه، مانند پاسخ طیفی محدود، نرخ نوترکیبی بالا، انتخاب پذیری ضعیف و عدم ثبات، منجر به توسعه رویکردهای پیشرفته تر برای افزایش کارایی واکنش های فوتوکاتالیزی شده است. یکی از این روش ها، فوتوکاتالیست های ناهمگن است که می تواند به طور موثر بر محدودیت های فوتوکاتالیست های تک جزیی غلبه کند و کارایی کلی واکنش های فوتوکاتالیزی را افزایش دهد (۹۱-۹۳). فوتوکاتالیست های ناهمگن ممکن است با کنترل جداسازی و انتقال حامل های بار بین مواد مختلف، گزینش پذیری بهبود یافته واکنش های فوتوکاتالیزی را ارائه دهند (۹۵-۹۴). همچنین می تواند به عنوان یک مانع عمل نماید و از ترکیب مجدد بارهای تولید شده توسط نور جلوگیری نماید و امکان جداسازی و انتقال آنها به مکان های کاتالیزی خاص را فراهم کند که منجر به راندمان بالاتر واکنش می شود. این خصوصیات، فوتوکاتالیست های ناهمگن را به یک رویکرد بسیار امیدوارکننده برای بهبود کارایی و عملکرد واکنش های فوتوکاتالیزی و رفع محدودیت های فوتوکاتالیست های تک جزیی تبدیل می کنند (۹۶).

۴-۲-۱- فوتوکاتالیست های ناهمگن های نوع I، II و III

ناهمگن نوع I در شکل ۴ یکی از انواع مختلف اتصالات ناهمگن است که در آن لبه های نواری یکی از نیمه های ها در نیمه های دیگر قرار دارد. در این نوع اتصالات ناهمگن، انتقال بارهای تولید شده از نیمه های I (SC I) به نیمه های II (SC II) صورت می گیرد. با این حال، یک اشکال قابل توجه این نوع اتصال ناهمگن کاهش پتانسیل اکسایش- کاهش ناشی از تجمع بارهای تولید شده بر روی یک نیمه های با پتانسیل اکسایش- کاهش کمتر است.

در اتصالات ناهمگن نوع II (شکل ۵)، لبه های نوار ظرفیت (VB) SC I و نوار هدایت SC II (CB) آرایش مبهم را نشان می دهند. این نوع اتصال امکان انتقال حفره های ایجاد شده را به نیمه های از نوار ظرفیت (I) به نوار ظرفیت (II) می دهد که دارای لبه نوار ظرفیت مثبت کمتر است. در حالی که انتقال الکترون های تولید شده مشابه به نیمه های که دارای لبه نوار هدایت منفی کمتری است از نوار هدایت (II) به نوار هدایت (I) منتقل می شود. این نوع اتصالات ناهمگن باعث جداسازی بهتر بارهای تولید شده و بهبود فعالیت کاتالیزی آنها می شود (۹۸، ۹۷).

واکنش های فوتوکاتالیزی، به خصوص فوتوکاتالیزی ناهمگن در مقایسه با فناوری های تصفیه مرسوم از جمله جذب (۷۷-۸۰)، جداسازی غشا (۸۲)، نهشت بخار شیمیایی (۸۳) و فرایندهای زیستی (۸۴) دارای مزایای زیادی هستند، که در ادامه ذکر شده است:

(۱) استفاده از نور خورشیدی، که یک منبع پایدار است.

(۲) سرعت واکنش سریع و مصرف انرژی کم.

(۳) شرایط واکنش ملایم تر نسبت به کاتالیزی حرارتی سنتی.

بنابراین، استفاده از انرژی خورشیدی برای از بین بردن چندین آلاینده زیست محیطی از دیدگاه صرفه جویی در انرژی و اصلاح زیست محیطی حائز اهمیت است. تا به امروز، هزاران مطالعه در مورد تصفیه فوتوکاتالیزی آلاینده های مختلف گزارش شده است و مطالعات جدید به طور فزاینده ای در این زمینه انجام می شود. تعداد مقالات مجلات در مورد تخریب فوتوکاتالیزی به طور قابل توجهی در ۲۰ سال گذشته افزایش یافته است. اخیراً، محققان نیمه های متعددی مانند نیمه های اکسید فلز (MO_x) (85)، نیمه های نقره یا دو پایه (BBS)، نیمه های پلیمری (۸۷، ۸۶)، چارچوب های فلزی- آلی (MOFs) (۹۰، ۸۸) و نیمه های سولفید فلزی را برای از بین بردن عناصر مختلف ساخته اند. علاوه بر این، راهبردهای اصلاح مختلفی از جمله ساخت سیستم های اتصال ناهمگن، مهندسی نقص و بارگذاری کاتالیست کمکی پیشنهاد شده اند. با این حال، هنوز چالش های اساسی نظیر هزینه بالای نیمه رساناها، نرخ بهره برداری کمتر از انرژی خورشیدی و بازترکیب سریع جفت های الکترون-حفره تولید شده با نور وجود دارد، که مانع از کاربردهای زیست محیطی در مقیاس بزرگ این فناوری می شود. شکاف دانش مهم دیگر این است که سازوکار و سینتیک جامع و ترمودینامیک فوتوکاتالیز هنوز به طور کامل درک نشده است. در نتیجه، لازم است راهبردهای اصلاح نیمه های ها در فوتوکاتالیز برای حذف آلاینده های مختلف زیست محیطی به طور گسترده مورد بررسی قرار گیرد (۱۳، ۹۰).

۴-۱- تاثیر روش سنتز بر فعالیت فوتوکاتالیزی

پایانه های ایجاد شده در سطح مکسن در روش های سنتز متفاوت، متنوع است. در اچ کردن HF، پایانه های (O⁻، F⁻ و HO⁻) ایجاد می شوند که بر انتقال و فعالیت بار تأثیر می گذارند. اچ کردن نمک فلورید کنترل بهتری را ارائه می دهد که منجر به خلوص و رسانایی بالاتر می شود. همچنین اچ کردن شدید باعث ایجاد نقص هایی می شود که به عنوان مراکز نوترکیبی عمل می کنند، در حالی که این نقص ها کنترل شوند، می توانند جهت فرایند فوتوکاتالیست مفید باشند. اچ کردن/ لایه برداری اندازه نانو ورق را تعیین می کند. ورق های کوچکتر باعث افزایش سطح می شوند.

¹ Homogeneous

² Heterogeneous

³ Semiconductor

۴-۲-۲- فوتوکاتالیست های طرح Z^۱

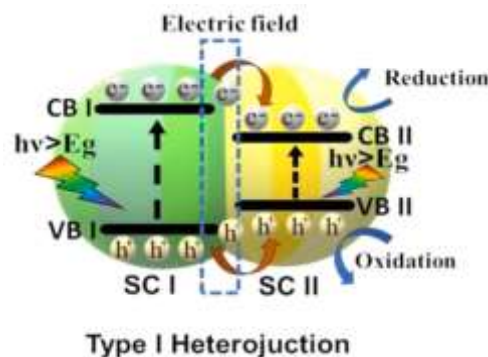
فوتوکاتالیست شامل زوج های میانی مانند (Fe^{3+}/Fe^{2+}) برای ایجاد کانال انتقال الکترون بین دو نیمه رسانای مختلف برای افزایش کارایی جداسازی بار و در نتیجه توانایی اکسایش-کاهش است (۸۵، ۹۰). دو نیمه هادی دارای سطوح انرژی متفاوتی هستند و در یک فرایند ایده آل، از الکترون های یکی از دو نیمه هادی برای کاهش زوج های میانی استفاده می شود، در حالی که از سوراخ های نیمه هادی دیگر برای اکسید کردن آنها استفاده می شود. با این حال، این سیستم به راه حل ها محدود می شود و دارای چندین معایب از جمله نیاز به جفت یون اکسایش-کاهش و پتانسیل واکنش های جانبی یا برگشتی است (۹۶، ۱۰۲).

۴-۲-۳- فوتوکاتالیست های تمام حالت جامد طرح Z^۲

پیشرفت های اخیر در فرایند فوتوکاتالیز، توسعه یک فوتوکاتالیست با طرح Z حالت جامد است. هدف این رویکرد نوآورانه غلبه بر محدودیت های معین طرح Z مرسوم با استفاده از یک هادی جامد به جای زوج های میانی است (۳۳-۳۸). این اجازه می دهد تا سیستم در فاز مایع یا گاز مورد استفاده قرار گیرد و طول انتقال بار را برای سرعت بخشیدن به فرایند انتقال شارژ کوتاه می کند. با این حال، توسعه یک طرح Z تمام حالت جامد در عمل نیاز به فرایندهای سنتز پیچیده و بسیار کنترل شده دارد، زیرا کنترل مکان ذرات فلزی، یعنی قراردادن آنها بین دو نیمه هادی، اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است. بنابراین، مسائل مربوط به طرح سنتی Z را حل نمی کند (۱۰۳، ۱۰۴).

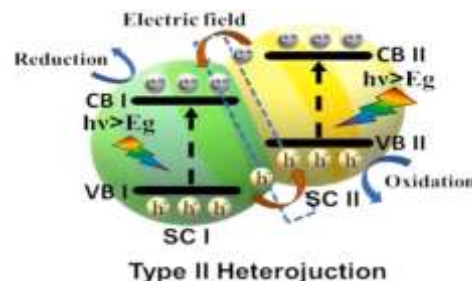
۴-۲-۴- فوتوکاتالیست های مستقیم طرح Z یا طرح S^۳

یک پیشرفت جدیدتر در حوزه فوتوکاتالیست، فوتوکاتالیست مستقیم طرح Z است (شکل ۷). این توسعه نوآورانه به دنبال غلبه بر محدودیت های مرتبط با فوتوکاتالیست های سنتی طرح Z است. برخلاف نسل های قبلی، فوتوکاتالیست های مستقیم طرح Z بدون نیاز به زوج های میانی یا هادی کار می کنند. اگرچه فوتوکاتالیست مستقیم طرح Z قابلیت های اکسایش-کاهش قابل توجهی را نشان می دهد و عملکردی استثنایی در تسهیل واکنش های نوری ارائه می دهد، اما محققان در مورد سازوکارهای عملیاتی آن متحیر بودند. برای رفع سردرگمی پیرامون سازوکار فوتوکاتالیست مستقیم با طرح Z، محققان به رهبری جیاگو یو، اصطلاح فوتوکاتالیست طرحواره S را ابداع کردند (۱۰۵). وقتی نور به فوتوکاتالیست می تابد، هر دو ماده SC (I) و ماده SC (II) نور را جذب می کنند. این باعث تحریک الکترون های آنها و جفت هایی از الکترون-حفره می شود.



شکل ۴: اتصالات ناهمگن نوع I (۹۶).

Figure 4: Type I heterogeneous connections (96).

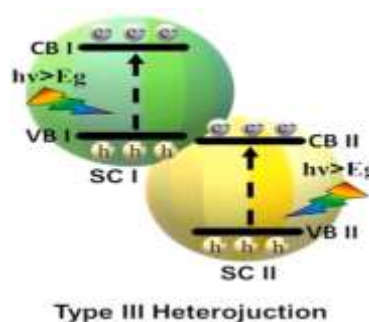


شکل ۵: اتصالات ناهمگن نوع II (۹۶).

Figure 5: Type II heterogeneous connections (96).

با این حال، بارهای تولید شده با ظرفیت اکسایش - کاهش کمتر به نیمه هادی ها منتقل می شوند و در نتیجه ظرفیت اکسایش - کاهش کمتری دارند.

در اتصالات ناهمگن نوع (III) (شکل ۶)، فاصله باند بین دو ماده به قدری زیاد است که هیچ انتقال باری بین این نیمه هادی وجود ندارد. بنابراین، این نوع پیوند ناهمگون برای کاربردهای فوتوکاتالیزی، کمتر مطلوب است (۹۹-۱۰۱).



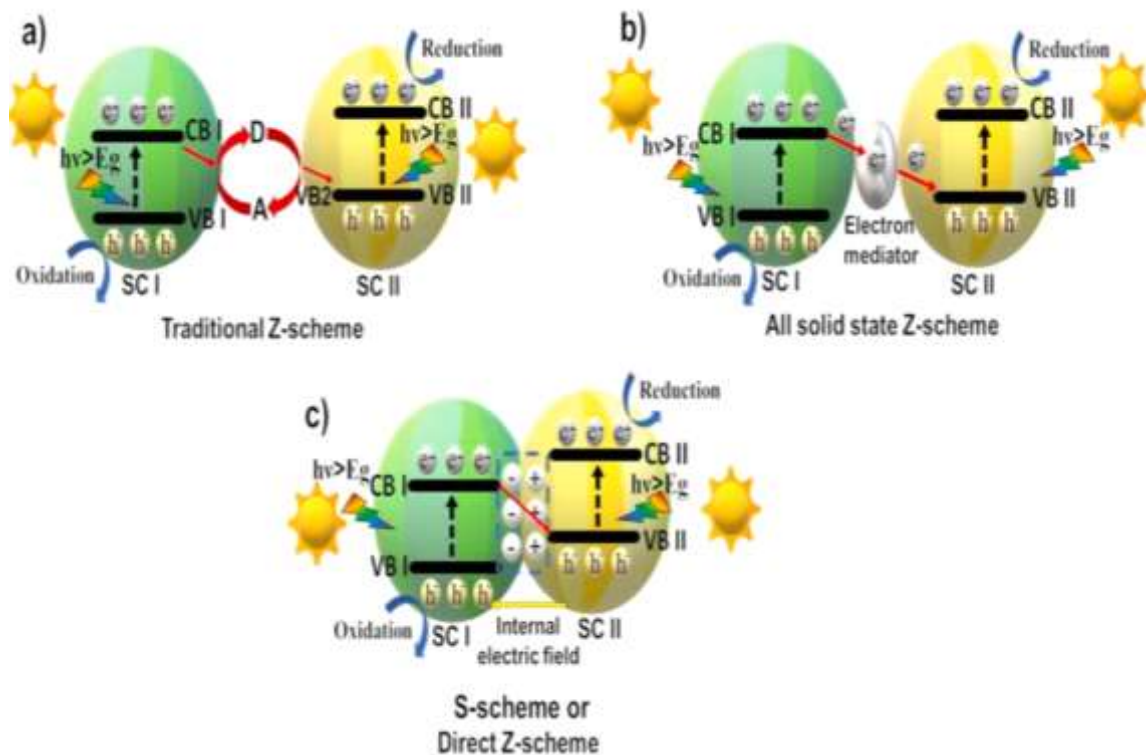
شکل ۶: اتصالات ناهمگن نوع III (۹۶).

Figure 6: Type III heterogeneous connections (96).

³ Direct Z-scheme or S- scheme

¹ Z-scheme

² All-solid-state Z-scheme



شکل ۷: (a) طرح Z سنتی، (b) تمام حالت جامد طرح Z و (c) طرح S یا طرح Z مستقیم (۹۶).
Figure 7: a) Traditional Z-design, b) All-solid Z-design, and c) S-design or direct z-design (96).

ناچیز تولید شده نوری تحت نوترکیبی قرار می‌گیرند که منجر به ایجاد یک پتانسیل اکسایش-کاهش قوی می‌شوند (۱۰۶، ۱۰۷).

۵- کامپوزیت‌های مکسن‌ها در فرایند فوتوکاتالیزی برای حذف رنگ‌ها و آلاینده‌های دیگر

با توجه به شکل و ساختار مواد کامپوزیتی، ساختارهای ناهمگن دوبعدی/دوبعدی فعالیت فوتوکاتالیزی بیشتری نسبت به ساختارهای ناهمگن یک بعدی/صفربعدی و یک بعدی/دوبعدی تحت شرایط مشابه نشان می‌دهند. به این دلیل که ساختارهای ناهمگن دو بعدی/دوبعدی سطح تماس بین دو ماده را به حداکثر می‌رسانند در حالی که به طور هم‌زمان مکان‌های فعال سازی واکنش سطحی اضافی را برای فوتوکاتالیز ارائه می‌دهند. ادغام مکسن‌ها در سیستم‌های کامپوزیتی از مزایای ساختاری آنها برای افزایش تخریب فوتوکاتالیزی رنگ‌ها استفاده می‌کند. هنگامی که با یک نیمه رسانا (به عنوان مثال، TiO_2 ، ZnO ، یا $\text{g-C}_3\text{N}_4$) با مکسن‌ها جفت می‌شوند، مکسن‌ها به عنوان منبع غنی الکترون عمل می‌نمایند و انتقال الکترون‌های تولید شده توسط نور را از نوار رسانایی نیمه‌هادی تسهیل می‌کنند. این امر نوترکیبی الکترون-حفره را کاهش و طول عمر گونه‌های فعال را افزایش می‌دهد. جذب نور گسترده، نیمه‌هادی‌های خالص اغلب فقط نور UV

در طرح S، ماده نیمه رسانای اول توانایی بیشتری برای "کشیدن" الکترون‌ها دارد، در حالی که ماده نیمه رسانای دوم توانایی قوی‌تری برای "فشار دادن" آنها دارد. به دلیل این تفاوت، الکترون‌های ماده نیمه‌رسانای اول به سمت ماده نیمه‌رسانای دوم جریان می‌یابند. در همین حال، حفره‌ها از هم جدا می‌مانند. این جریان الکترون یک مسیر «گام مانند» ایجاد می‌کند. الکترون‌های موجود در ماده نیمه‌رسانای دو در واکنش‌های کاهش بسیار قوی می‌شوند و حفره‌های ماده نیمه رسانای اول در اکسید کردن بسیار قوی ظاهر می‌شود. این جداسازی باعث می‌شود فوتوکاتالیز کارآمدتر از زمانی باشد که مواد به تنهایی کار کنند. نکته کلیدی این است که این دو ماده با هم کار می‌کنند. الکترون‌ها و حفره‌های ضعیف (آنهايي که کار زیادی انجام نمی‌دهند) یکدیگر را خنثی می‌کنند و تنها الکترون‌های قوی باقی می‌مانند. نیمه‌رسانای اول و نیمه رسانای دوم نقاط قوت خود را به اشتراک می‌گذارند و سیستم قدرتمندی را ایجاد می‌کنند که از نور برای هدایت موثرتر واکنش‌ها استفاده می‌کند.

در واقع در فوتوکاتالیز ناهمگن طرح S، حفظ موثر الکترون‌های پراثری در CB فوتوکاتالیز (SC II)، سبب احیا (RP) و به همین ترتیب، نگه داشتن حفره‌های با ارزش فوتو مولد در VB فوتوکاتالیز (SC I)، سبب اکسایش (OP) می‌شود به طور هم‌زمان، حامل‌های بار

² Heterogeneous structures

¹ Composite

کردند که در عرض ۴۰ دقیقه ۹۹ درصد متیل اورانژ را در معرض نور مرئی تخریب می‌کند (۱۱۲).

کامپوزیت $\text{CeO}_2/\text{Mxene-TiO}_2$ آلاینده دارویی تتراسایکلین را هنگامی که یک ساعت در معرض نور مرئی قرار گرفت تا ۹۸ درصد تخریب کرد این در حالی است که غلظت آلاینده حدود ۳۹ میلی گرم بر لیتر بود و مقدار ۰/۷ گرم بر لیتر کاتالیست استفاده شد (۱۱۳).

در سیستم‌های نانوذرات مکسن/فلز، ترکیب فلزات پلاسمونیک مانند Ag یا Au روی مکسن‌ها، اثرات LSPR را تقویت می‌کند، میدان‌های الکتریکی محلی و تزریق الکترون داغ را بهبود می‌بخشد. به عنوان مثال، کامپوزیت‌های $\text{AgNP}/\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_3$ تخریب سریع ۹۹ درصد متیلن بلو در ۳۰ دقیقه و تخریب سریع ۹۹ درصد رودامین ب در ۴۰ دقیقه را در زیر نور مرئی نشان داده‌اند که قدرت هم‌افزایی پلاسمونیک-مکسن را نشان می‌دهد (۱۱۴).

فرایند تخریب معمولاً این مراحل را دنبال می‌کند:

۱. جذب رنگزا بر روی سطح کامپوزیت، که توسط پایانه‌های آب‌دوست مکسن تسهیل می‌شود.

۲. جذب نور و تولید حامل بار در نیمه‌هادی.

۳. انتقال الکترون به مکسن، ایجاد حفره در باند ظرفیت.

۴. تشکیل گونه‌های فعال به عنوان مثال، $\text{OH}^\bullet$ از اکسایش H_2O توسط حفره، $\text{O}_2^\bullet$ از کاهش O_2 توسط الکترون

۵. تجزیه مولکول‌های رنگزا به H_2O ، CO_2 و یون‌های معدنی.

در ادامه توضیحاتی در مورد سازوکار تخریب آلاینده رنگزا و دارویی توسط کامپوزیت‌های مکسن ارائه شده است.

همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، در اثر تحت تابش نور مرئی، هم در $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و هم در TiO_2 حفره و الکترون ایجاد می‌شود و الکترون‌های باند هدایت از $\text{g-C}_3\text{N}_4$ به باند هدایت TiO_2 منتقل می‌شوند تا O_2 را به رادیکال‌های سوپراکسید تبدیل کنند. حفره‌های ایجاد شده در باند ظرفیت از TiO_2 به باند ظرفیت از $\text{g-C}_3\text{N}_4$ منتقل می‌شوند و به راحتی با مولکول‌های آب واکنش می‌دهند تا رادیکال‌های هیدروکسیل را تشکیل دهند. حفره‌های باند ظرفیت از $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و گونه $\text{OH}^\bullet$ می‌توانند به طور مستقیم آلاینده‌های آلی را به یک واسطه کوچک یا مستقیماً به محصولات نهایی آب و دی اکسید کربن، اکسید کنند. سپس Ti_3C_2 می‌تواند به عنوان پل انتقال بار عمل کند تا بخشی از الکترون‌ها را از باند هدایت $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و حفره‌هایی از باند ظرفیت TiO_2 بپذیرد تا بازترکیب بار و حفره‌های تولید شده را بیشتر مهار کند (۱۱۶). جفت الکترون-حفره را می‌توان به طور موثر در سطح مشترک $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و TiO_2 جدا کرد و عملکرد فوتوکاتالیزی را بهبود بخشید (۱۲۰).

یا محدوده مرئی باریکی را جذب می‌کنند. مکسن‌ها با تشدید پلاسمون سطحی موضعی، می‌توانند جذب نور را در طیف مرئی یا نزدیک به مادون قرمز در هنگام ترکیب گسترش دهند و استفاده از انرژی خورشیدی را بهبود بخشند. مکان‌های فعال فراوان، پایانه‌های سطحی مکسن‌ها، مکان‌های واکنشی را برای جذب رنگزا و تولید گونه‌های فعال فراهم می‌کنند. کامپوزیت‌ها این را با ترکیب شیمی سطح مکسن‌ها با مکان‌های کاتالیزی مواد مشترک تقویت می‌کنند و جذب مولکول رنگزا و راندمان تخریب را بهبود می‌بخشند. گونه‌های فعال در فرایند فوتوکاتالیز، و الکترون‌ها و حفره‌های تولیدشده نوری در کامپوزیت‌ها، قادرند با آب یا اکسیژن واکنش می‌دهند تا گونه‌های فعال مانند رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) و رادیکال‌های سوپراکسید ($\text{O}_2^\bullet$) تولید کنند. مکسن‌ها همچنین این فرایند را با جلوگیری از نوترکیب الکترون-حفره و ایجاد مسیرهایی برای واکنش‌های اکسایش-کاهش کارآمد تقویت می‌کنند. اخیراً شائو و همکاران (۱۰۸) کشف کردند که نانو کامپوزیت‌های دو بعدی/دو بعدی $\text{CoAl-LDHs}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ تأثیر مطلوبی بر تجزیه هیدرو تتراسایکلین کلرید دارند. علاوه بر این، فعالیت فوتوکاتالیزی به دلیل تعامل هم‌افزایی بین CoAl-LDHs (نانو صفحه) و $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (مکسن) و اتصال شاتکی ایجاد شده در سطح تماس آنها برجسته شده است (۱۹).

نمونه‌هایی از کامپوزیت‌های مکسن در تجزیه رنگزا، عملکرد قابل توجهی را در تجزیه رنگزهایی مانند متیلن بلو (MB)، رودامین (RB)، و متیل اورانژ (MO) و غیره نشان داده‌اند. کامپوزیت $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ از طریق روش هیدروترمال سنتز می‌شوند، این کامپوزیت‌ها یک اتصال شاتکی را در رابط مکسن- TiO_2 تشکیل می‌دهند. مکسن به عنوان یک مخزن الکترون عمل می‌کند، در حالی که TiO_2 ، جفت الکترون-حفره را تحت نور UV ایجاد می‌کند. مطالعات بازده تخریب بیش از ۹۶ درصد را برای متیلن بلو (MB) گزارش می‌کنند که به افزایش جداسازی بار و افزایش تولید $\text{OH}^\bullet$ نسبت داده می‌شود (۱۰۹). ساختارهای ناهمگن $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4-\text{AgNP}$ یک فوتوکاتالیست فعال در نور مرئی ایجاد می‌کند که نیتريد کربن با مکسن‌ها جفت می‌شود تا پیوندهای ناهمگن دو بعدی/دو بعدی را تشکیل دهند. تماس بین لایه‌ها باعث انتقال الکترون از $\text{g-C}_3\text{N}_4$ به مکسن می‌شود و در عرض ۴۸۰ دقیقه بیش از ۸۱ درصد تخریب در معرض نور مرئی حاصل می‌شود (۱۱۰).

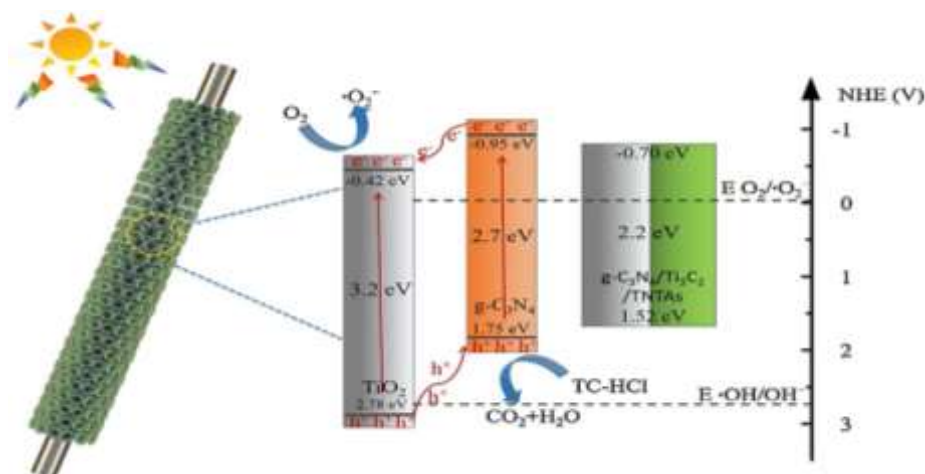
دیو^۳ و همکارانش یک آرایه نانولوله‌ای فوتوکاتالیست سه‌گانه $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2$ با روش نهشت بخار شیمیایی و رشد درجا آماده کرده‌اند، که در عرض ۹۰ دقیقه بیش از ۹۶ درصد تخریب رودامین ب و ۸۵ درصد کلرید تتراسایکلین را در معرض نور مرئی نشان می‌دهد (۱۱۵). کوانگ^۴ و همکارانش یک $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$ با روش هیدروترمال تهیه

³ Diao

⁴ Quang

¹ Shao

² Schottky-junction



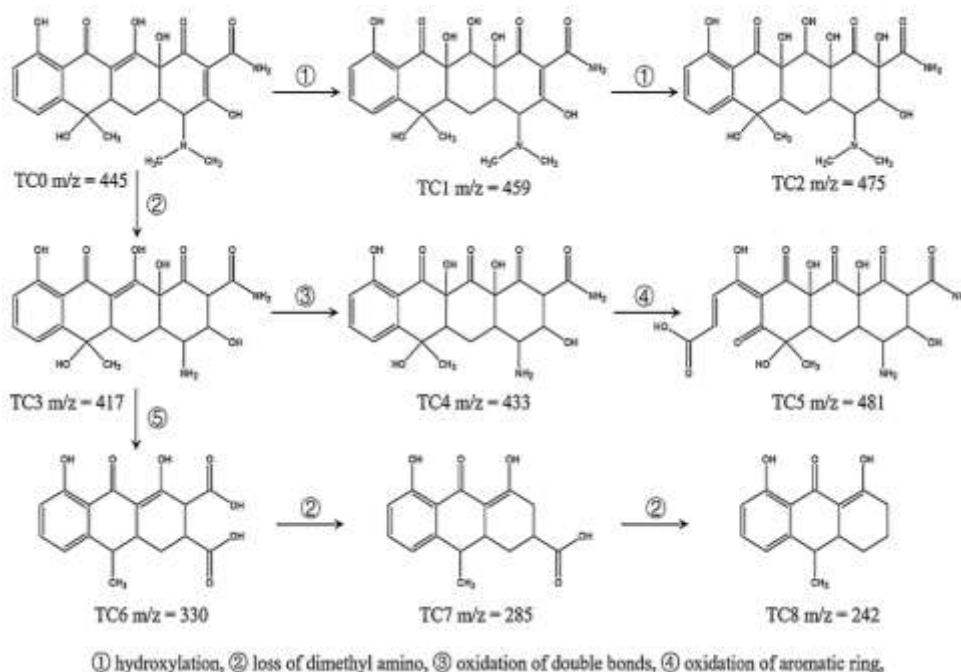
شکل ۸: سازوکار حذف آلاینده توسط کامپوزیت $g-C_3N_4-Ti_3C_2-TNTAs$ (۱۱۵).

Figure 8: Mechanism of pollutant degradation by $g-C_3N_4-Ti_3C_2-TNT$ composite (115)

هدایت TiO_2 به Ti_3C_2 MXene می‌کنند. در نتیجه، Ti_3C_2 MXene بار منفی انباشته کرد و TiO_2 بار مثبت داشت، که منجر به تشکیل سد شاتکی^۱ در رابط Ti_3C_2/TiO_2 به عنوان لایه بار فضا می‌شود. به ویژه، اتصال شاتکی^۱ می‌تواند به عنوان گیرنده الکترون عمل کند تا الکترون‌های تولید شده را به طور موثر جذب کند و از بازگشت الکترون‌ها به TiO_2 جلوگیری کند، که افزایش بازده فوتوکاتالیزی را تا حد زیادی تسهیل می‌کند.

مسیر تخریب پیشنهادی تتراسایکلین و ساختار شیمیایی مواد واسطه در شکل ۹ ارائه شده است.

سازوکار فوتوکاتالیزی پیشنهادی برای تخریب متیل اورانژ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در ابتدا، منبع نوری که فوتون‌های پرانرژی را حمل می‌کند، فعال می‌شود تا الکترون‌های القایی نوری تولید کند و حفره‌هایی روی نوار ظرفیت TiO_2 باقی بگذارد. در مرحله بعدی، فوتوالکترون‌ها به دلیل رسانایی الکتریکی بالای آن به سرعت از باند

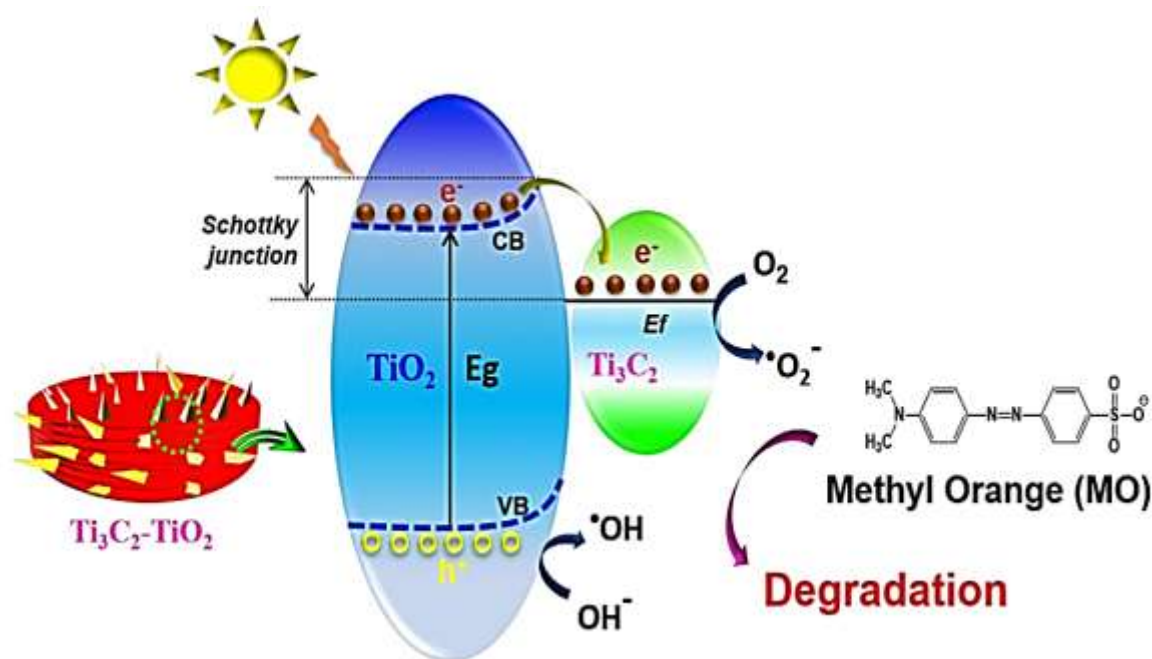


شکل ۹: مسیر پیشنهادی تخریب تتراسایکلین و ساختار شیمیایی مواد واسطه آن (۱۱۵).

Figure 9: Proposed degradation pathway of tetracycline and chemical structure of its intermediates (115).

² Schottky-junction

¹ Schottky barrier



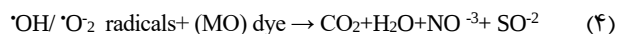
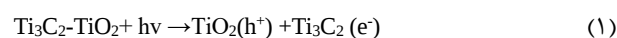
شکل ۱۰: سازوکار حذف آلاینده توسط کامپوزیت $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-TiO}_2$ (۱۱۲).

Figure 10: Mechanism of pollutant degradation by $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-TiO}_2$ composite (112).

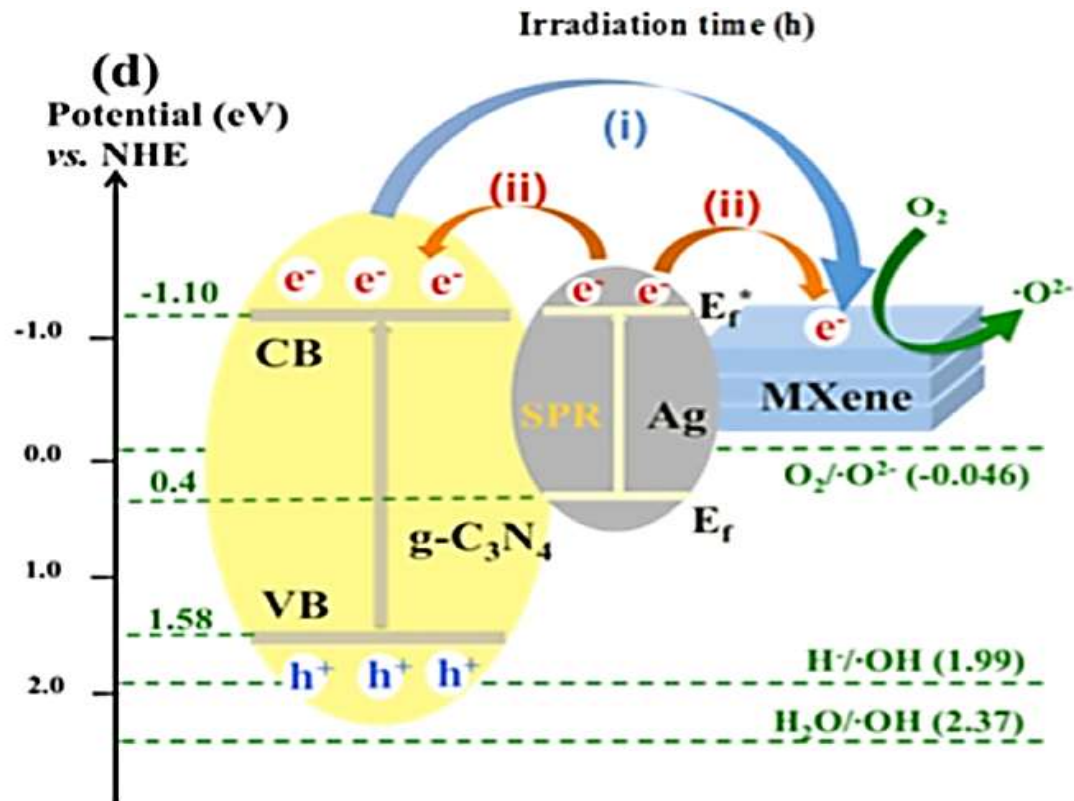
سازوکار تخریب نوری معمولی مولکول‌های آلی شامل واکنش‌های اکسایش-کاهش با تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌باشد. اکسایش گروه‌های هیدروکسیل و مولکول‌های آب توسط حفره‌های تولید شده نوری، برای تشکیل رادیکال‌های $\text{OH}^\bullet$ یکی از سازوکارهای اصلی است. الکترون‌های القا شده با نور می‌توانند از طریق مانع شاتکی شکل گرفته در رابط $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx MXene}$ به ورقه‌های $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx MXene}$ مهاجرت کنند و حفره‌ها را روی باند ظرفیت TiO_2 باقی بگذارند. این فرایند جداسازی بار را با کاهش شانس نوترکیبی و افزایش طول عمر الکترون‌های فوتوتولید شده ارتقا می‌دهد. در جزئیات بیشتر، الکترون‌های فوتو مولد به سرعت از TiO_2 به سطح مکسن مهاجرت می‌کنند، که به عنوان یک مخزن الکترون عمل می‌کند. مراکز واکنشی غنی از الکترون در سطح Ti_3C_2 مسئول تشکیل رادیکال $\text{O}_2^{\bullet-}$ هستند.

از طرف دیگر، حفره‌های فوتو مولد می‌توانند گروه‌های هیدروکسیل سطحی روی ذرات TiO_2 ، مولکول‌های آب اطراف و به طور بالقوه گروه‌های OH را روی سطح مکسن اکسید کنند. نانوذرات فلزی انتقالی توسط چندین محقق ثابت شده است. وجود نانوذرات فلزی روی سطح اکسید شده مکسن / Ti_2C می‌تواند مراکز واکنش‌پذیری بیشتری را فراهم کند، به‌ویژه در نتیجه مهاجرت به سمت رنگ‌ها می‌تواند منجر به تغییر شود. رسوب نانوذرات فلزی می‌تواند به طور قابل توجهی فعالیت فوتوکاتالیزی TiO_2 را افزایش دهد (۱۱۴-۱۱۷). در جدول ۲ اطلاعات جامعی در مورد ساختار کامپوزیت‌های مکسن، شرایط واکنش و حذف آلاینده ارائه شده است.

پس از قرار گرفتن بر روی Ti_3C_2 MXenes، الکترون‌های تولید شده نوری به سطح مهاجرت می‌کنند و با مولکول‌های اکسیژن واکنش می‌دهند تا رادیکال‌های سوپراکسید، دی اکسید کربن تولید کنند. در آن زمان، حفره‌های تولید شده نوری با مولکول‌های یون هیدروکسیل جذب شده واکنش می‌دهند تا رادیکال‌های هیدروکسیل را ایجاد کنند. در نهایت، رادیکال‌ها، با قابلیت اکسایش قوی، مولکول‌های متیل اورانژ را مستقیماً به محصولات اکسیداسیون تجزیه می‌کنند. سازوکار را می‌توان بر اساس واکنش‌های (۱-۴) توصیف کرد (۱۱۲).

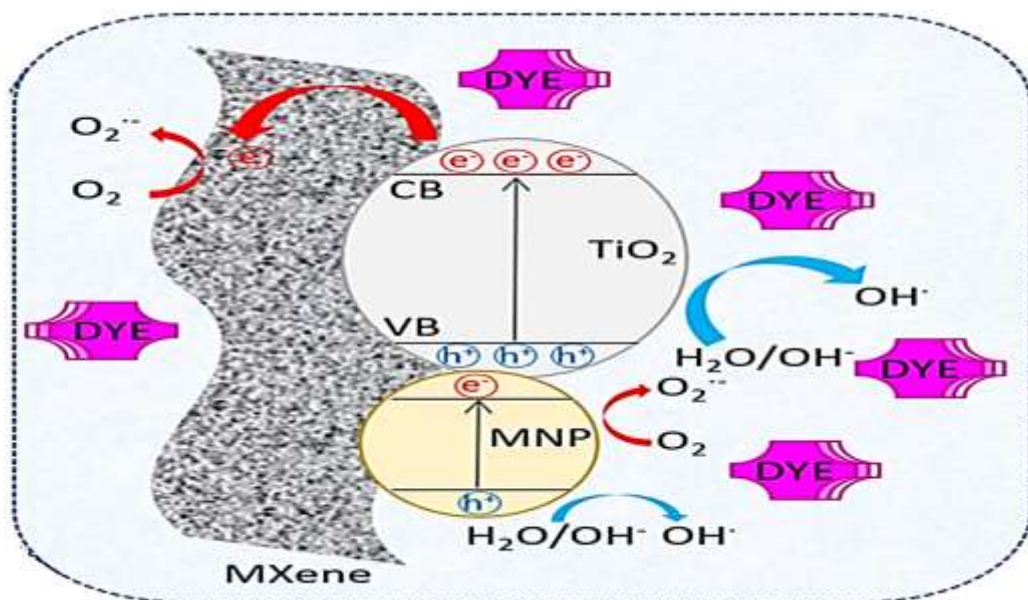


همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، هنگامی که متالوئید Ti_3C_2 MXene با نوع n $\text{g-C}_3\text{N}_4$ در تماس است، الکترون‌ها از $\text{g-C}_3\text{N}_4$ به Ti_3C_2 MXene توسط سد شاتکی مهاجرت می‌کنند. هنگامی که CN/M-Ag تحت نور مرئی روشن می‌شود، الکترون‌های آزاد در Ag به دلیل رزونانس پلاسمون سطحی به حالت‌های انرژی بالاتر برانگیخته می‌شوند و سپس آن الکترون‌ها از AgNPs به $\text{g-C}_3\text{N}_4$ و CB Ti_3C_2 منتقل می‌شوند. الکترون‌های القا شده با نور با اکسیژن واکنش می‌دهند و متعاقباً رادیکال‌های هیدروکسیل تشکیل می‌شوند (۱۱۰).



شکل ۱۱: سازوکار حذف آلاینده توسط کامپوزیت $\text{C}_3\text{N}_4/\text{MXene}/\text{AgNPs}$ (۱۱۰).

Figure 11: Mechanism of pollutant degradation by $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-TiO}_2$ composite (110).



شکل ۱۲: سازوکار حذف آلاینده توسط کامپوزیت $\text{AgNP}/\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_3$ (۱۱۴).

Figure 12: Schematic of pollutant removal by $\text{AgNP}/\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_3$ composite (114).

جدول ۲: کامپوزیت های مکسن، شرایط واکنش فوتوکاتالیزی و حذف آلاینده آلی.

Table 2. MXenes composites, photocatalytic reaction conditions, and organic pollutant removal.

Photocatalyst	Substrate of degradation	Morphology	Reaction conditions	Light source	Yield	Ref.
MoS ₂ @Ti ₃ C ₂ Nanohybrid	Liquid paraffin (LP)	MoS ₂ nanosheets/Ti ₃ C ₂ sheets Multilayer	A certain amount of sample + 2.0 g of deionized water and 1.0 g of LP + 10 mL dichloromethane as the sacrifice reagent, 30 min dark adsorption	1000 W highpressure mercury lamp	> 90 %	(118)
α -Fe ₂ O ₃ /ZnFe ₂ O ₄ @Ti ₃ C ₂	Rhodamine B (RhB)	α -Fe ₂ O ₃ /ZnFe ₂ O ₄ nanoparticles/Ti ₃ C ₂ nanosheets Multilayer	20 mg catalyst + 100 mL 10 mg/L substrate, 30 min dark adsorption	300 W Xe lamp	>98%	(119)
	Cr(VI)				90%	
Ag ₃ PO ₄ /Ti ₃ C ₂	Tetracycline (TC)	2D Ti ₃ C ₂ /Ag ₃ PO ₄ particles Monolayer	20 mg catalyst + 50 mL 20 mg/L substrate, 30 min dark adsorption	300 W Xe lamp (≥ 420 nm)	80%	(120)
0D/2D Bi ₃ TaO ₇ /Ti ₃ C ₂	Methylene blue	Bi ₃ TaO ₇ nanoparticles/Ti ₃ C ₂ Nanosheets Multilayer	50 mg catalyst + 100 mL 10 mg/L , 60 min dark adsorption 20 mg catalyst + 50 mL 10 mg/L	300 W Xe lamp (≥ 420 nm)	99%	(121)
Ti ₃ C ₂ /SrTiO ₃ composites	2,4-Dinitrophenol (2,4-DNP) Tetracycline hydrochloride (TC-H) Thiamphenicol (TPL) Chloramphenicol (CPL) UO ₂	2D Ti ₃ C ₂ /SrTiO ₃ particles Multilayer	20 mg catalyst + 60 mL 50 ppm substrate, 8 h dark adsorption	300 W Xe lamp (l = 320–2500 nm)	77%	(122)
(111) TiO _{2-x} /Ti ₃ C ₂	Methylene blue (MB)	TiO ₂ nanoparticles/Ti ₃ C ₂ Nanosheets, Multilayer	10 mg catalyst+200mL 20 mg/L	500 W Xe lamp (l 4 400 nm)	75%	(123)
(001) TiO ₂ /Ti ₃ C ₂	Methyl orange (MO)	TiO ₂ square nanosheets/Ti ₃ C ₂ nanosheets, Multilayer	10 mg catalyst + 200 mL 20 mg/L substrate, 60 min dark adsorption	300 W Xe lamp	>98%	(124)
CdS@Ti ₃ C ₂ @TiO ₂	Sulfachloropyridazine(SCP)	CdS nanoparticles/Ti ₃ C ₂ @TiO ₂ bulk	50 mg catalyst + 200 mL 20 mg/L	Light intensity 300 mW cm ⁻² (l = 400–1050 nm)	95%	(125)
	Methylene Blue				80%	
2D/2D Ti ₃ C ₂ /Porous g-C ₃ N ₄	Phenol	2D/2D Ti ₃ C ₂ /PCN nanocomposite Multilayer with ultrasonication	20 mg catalyst + 50 mL 10 mg/L	500 W Xe lamp (l 4 400 nm)	98%	(126)
Ti ₃ C ₂ -OH/Bi ₂ WO ₆ composites	Rhodamine B	Porous spherical structure	10 mg catalyst + 50 mL 2 , 10, 5 Mol/L substrate, 30 min dark adsorption	300 W Xe lamp (l = 400–2500 nm)	77%	(127)
MT/ZnCoS	Tetracycline (TC)	-	optimal dosages of (0.3 g/L) and PAA (2 mM) within 15 min	-	> 80 %	(128)

۶- سینتیک واکنش فوتوکاتالیزی

مواد دو بعدی مکسن، ترکیبی منحصر به فرد از خواص را ارائه می‌دهند که آنها را به فوتوکاتالیست‌های امیدوارکننده یا کاتالیست‌های کمکی در کامپوزیت تبدیل می‌کند. درک سینتیک واکنش‌های فوتوکاتالیزی آنها برای بهینه‌سازی عملکرد آنها و طراحی سیستم‌های کارآمدتر برای کاربردهای مختلف امری مهم است. در واقع سینتیک فوتوکاتالیزی، سرعت انجام یک واکنش فوتوکاتالیزی را توصیف می‌کند. این نشان می‌دهد که واکنش‌دهنده‌ها با چه سرعتی تحت شرایط خاص شدت نور، بارگذاری کاتالیست، دما و غلظت اولیه واکنش‌دهنده به محصولات تبدیل می‌شوند. ثابت سرعت بالاتر نشان‌دهنده واکنش سریعتر است. در یک تحقیق لانگ^۱ و همکارانش، برای تخریب متیلن بلو با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر توسط کامپوزیت MXene/NH₂-MIL-88B Ti₃C₂ به سینتیک مرتبه اول با ثابت سرعت $k = 0.00881$ رسیدند (۱۱۷). مواد مختلفی برای حذف آلاینده‌ها استفاده شده است که سینتیک حذف آلاینده‌ها در برخی از آنها نیز مطالعه شده است (۱۲۹-۱۴۱).

۷- نتیجه‌گیری

ظهور مکسن‌ها و کامپوزیت‌های آن به عنوان فوتوکاتالیست برای تخریب رنگ‌ها و دیگر آلاینده‌های آلی از آب، پتانسیل تحول‌پذیر آن‌ها را در حل به چالش‌های زیست‌محیطی، به‌ویژه در زمینه تصفیه آب و پساب نشان می‌دهد. ساختار دو بعدی (2D) منحصربه‌فرد مکسن‌ها، با مساحت سطح بالا، پایانه‌های سطح قابل تنظیم و رسانایی الکتریکی استثنایی، آنها را به انتخاب شایسته برای کاربردهای فوتوکاتالیزی

تبدیل می‌کند. روش سنتز آنها، چه از طریق اچ کردن انتخابی فازهای MAX و چه سایر روش‌های جایگزین از پایین به بالا و از بالا به پایین موجبات توانایی آنها را، برای جداسازی حامل بار کارآمد، افزایش جذب نور و برهم‌کنش قوی با مولکول‌های رنگزا و دیگر آلاینده‌ها را فراهم می‌کند که از پیش‌نیازهای مؤثر فرایند فوتوکاتالیز است. مکسن هنگامی که مواد دیگر را در کامپوزیت‌های مبتنی بر مکسن همراهی می‌کند، اثرات هم‌افزایی مطلوبی از خود نشان می‌دهد که به طور قابل توجهی عملکرد فوتوکاتالیزی را افزایش می‌دهد. این کامپوزیت‌ها از نقش مکسن‌ها به عنوان کاتالیست‌های کمکی یا غنی از الکترون، با کاهش تلفات نو ترکیب و افزایش تولید گونه‌های فعال که برای تخریب رنگزا و دیگر آلاینده‌ها حیاتی است استفاده می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های مکسن کارایی تجزیه قابل توجهی برای طیف وسیعی از رنگ‌های آلی نشان می‌دهد که اغلب از فوتوکاتالیست‌های مستقل تحت تابش نور ماورابنفش و نور مرئی پیشی می‌گیرند. در اکثر این موارد کامپوزیت‌ها با استفاده از گونه‌های فعال حاصل از تهییج نوری (رادیکال‌های هیدروکسیل، سوپراکسید و حفره‌ها) تخریب فوتوکاتالیزی را با استفاده از طرح‌های متنوع فوتوکاتالیست (طرح Z و یا S) پیش می‌برند. با وجود گام‌های امیدوارکننده اخیر، چالش‌ها در بهینه‌سازی فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر مکسن همچنان ادامه دارد. پایداری فوتوکاتالیست‌ها در شرایط اکسایش طولانی مدت، مقیاس‌پذیری روش‌های سنتز آنها و درک عمیق‌تر رابطه بین ساختار فوتوکاتالیست‌ها و کاربرد آنها، مستلزم بررسی بیشتر است. پتانسیل مکسن‌ها در فرایند فوتوکاتالیز همچنان گسترده است و مسلماً در آینده نزدیک، راه‌حل‌های نوآورانه‌ای را برای رفع چالش‌های محیط‌زیست و اصلاح فناوری‌های تصفیه آب و پساب رنگی پایدار ارائه می‌دهد.

۸- مراجع

- Singh BJ, Chakraborty A, Sehgal R. A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *J Environ Manage.* 2023;348:119230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>.
- Bagheri A, Hoseinzadeh H, Hayati B, Mahmoodi NM, Mehraeen E. Post-synthetic functionalization of the metal-organic framework: Clean synthesis, pollutant removal, and antibacterial activity. *J Environ Chem Eng* 2021;9:104590. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104590>.
- Lin L, Yang H, Xu X. Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: a review. *Front Environ Sci.* 2022;10:880246. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>.
- Mishra RK, Fresh Water availability and Its Global challenge. *Br J Multidiscip Adv Stud.* 2023;4:1-78. <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0208>.
- Salehi M. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environ Int.* 2022;158:106936. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>.
- Holkar CR, Jadhav AJ, Pinjari D V., Mahamuni NM, Pandit AB. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *J Environ Manage.* 2016;182:351-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>.
- Mani S, Chowdhary P, Bharagava RN. Textile wastewater dyes: toxicity profile and treatment approaches. In: Bharagava, R., Chowdhary, P. (eds) *Emerging and eco-friendly approaches for waste management*. Springer, Singapore. 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8669-4_11.

¹ Long

8. Mojiri A, Bashir MJK. Wastewater treatment: current and future techniques. *Water (Switzerland)*. 2022;14:448. <https://doi.org/10.3390/w14030448>.
9. Wang H, Li X, Zhao X, Li C, Song X, Zhang P, et al. A review on heterogeneous photocatalysis for environmental remediation: From semiconductors to modification strategies. *Chinese J Catal*. 2022;43:178–214. [http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067\(21\)63910-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067(21)63910-4).
10. Nakata K, Fujishima A. TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *J Photochem Photobiol C Photochem Rev*. 2012;13(3):169–89. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001>.
11. Balapure A, Ray Dutta J, Ganesan R. Recent advances in semiconductor heterojunctions: a detailed review of the fundamentals of photocatalysis, charge transfer mechanism and materials. *RSC Appl Interfaces*. 2024;1:43–69. <https://doi.org/10.1039/D3LF00126A>.
12. Banerjee S, Pillai SC, Falaras P, O'shea KE, Byrne JA, Dionysiou DD. New insights into the mechanism of visible light photocatalysis. *J Phys Chem Lett*. 2014;5:2543–54. <https://doi.org/10.1021/jz501030x>.
13. Sun Y, Meng X, Dall'Agnese Y, Dall'Agnese C, Duan S, Gao Y, et al. 2D mxenes as co-catalysts in photocatalysis: synthetic methods. *Nano-Micro Lett*. 2019;11:79. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0309-6>.
14. Mishra S, Sundaram B. A review of the photocatalysis process used for wastewater treatment. *Mater Today Proc*. 2024;102:393–409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.147>.
15. Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, Lu J, Niu J, Heon M, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Adv Mater*. 2011;23:4248–53. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>.
16. Anasori B, Lukatskaya MR, Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nat Rev Mater*. 2017;2:16098. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.98>.
17. Dadashi Firouzjaei M, Karimiziarani M, Moradkhani H, Elliott M, Anasori B. MXenes: the two-dimensional influencers. *Mater Today Adv*. 2022;13:100202. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100202>.
18. Schultz T, Frey NC, Hantanasirisakul K, Park S, May SJ, Shenoy VB, et al. Surface termination dependent work function and electronic properties of Ti₃C₂T_x mxene. *Chem Mater*. 2019;31:6590–7. <https://doi.org/10.1021/acs.Chemmater.9b00414>.
19. Yu H, Jiang H, Zhang S, Feng X, Yin S, Zhao W. Review of Two-Dimensional MXenes (Ti₃C₂T_x) Materials in Photocatalytic Applications. *Processes*. 2023;11:1413. <https://doi.org/10.3390/pr11051413>.
20. Ghidui M, Naguib M, Shi C, Mashtalir O, Pan LM, Zhang B, Yang J, Gogotsi Y, Billinge SJL, Barsoum MW, Synthesis and characterization of two-dimensional Nb₄C₃ (MXene). *Chem Commun*. 2014;50:9517–9520. <https://doi.org/10.1039/C4CC03366C>.
21. Kewate OJ, Hussain I, Tyagi N, Saxena S, Zhang K, Rajamansingh EG, Chinnappan N, Joshi H, Punniyakoti S, Nb-based mMXenes: structures, properties, synthesis, and application towards supercapacitors. *J. Energy Storage* 2024; 94:112445. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109299>.
22. Jakubczak M, Bury D, Abiyyu M, Purbayanto K, Wójcik A, Moszczyńska D, et al. Understanding the mechanism of Nb - MXene bioremediation with green microalgae. *Sci Rep*. 2022;1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18154-3>
23. Rasheed PA, Pandey RP, Banat F, Hasan SW. Review recent advances in niobium MXenes: synthesis, properties, and emerging applications. *Matter* 2022;5: 546–572. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.12.021>
24. Ahmed T, Piya AA, Daula Shamim SU. Recent advances in Zr and Hf-based MXenes and their hetero-structure as novel anode materials for Ca-ion batteries: theoretical insights from DFT approach. *Nanoscale Adv*. 2024;6:3441–9. <https://doi.org/10.1039/D4NA00140K>
25. Elsa G, Hanan A, Walvekar R, Numan A, Zirconium-based MXenes: Synthesis, properties, applications, and prospects. *Coord Chem Rev*. 2025;526:216355. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216355>
26. Papadopoulou KA, Chroneos A, Christopoulos SRG. Ion incorporation on the Zr₂CS₂ MXene monolayer towards better-performing rechargeable ion batteries. *J Alloys Compd*. 2022;922:166240. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166240>.
27. Syamsai R, Grace AN. Synthesis, properties and performance evaluation of vanadium carbide MXene as supercapacitor electrodes. *Ceram Int*. 2020;46:5323–30. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.283>
28. Vahidmohammadi A, Hadjikhani A, Shahbazmohamadi S, Beidaghi M. Two-Dimensional Vanadium Carbide (MXene) as a High-Capacity Cathode Material for Rechargeable Aluminum Batteries. *ACS Nano*. 2017;11:11135–44. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05350>.
29. Sukanya R, Hasan M, Karthik R, Ranjith Kumar D, Kamaraj E, Milton A, et al. In situ decoration of 0D-nickel boride on 2D-vanadium MXene composites: An advanced electrode material for high energy density supercapacitors. *Chem Eng J*. 2024;497(April): 154928. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154928>.
30. Satishkumar P, Isloor AM, Rao LN, Farnood R. Fabrication of 2D Vanadium MXene Polyphenylsulfone Ultrafiltration membrane for enhancing the water flux and for effective separation of humic acid and dyes from wastewater. *ACS Omega*. 2024;9:25766–78. <https://doi.org/10.1021/acso mega.3c10078>
31. Zeng Q, Wang B, Lai X, Li H, Chen Z, Zeng X, et al. A multifunctional flame-retardant TA-MXene based nanocoating for cotton fabric. *Prog Org Coat*. 2024;189:108333. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108333>.
32. Dong L, Chu H, Li Y, Ma X, Pan H, Zhao S, et al. Surface functionalization of Ta₄C₃ MXene for broadband ultrafast photonics in the near-infrared region. *Appl Mater Today*. 2022;26:101341. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101341>.
33. Zhao J, Wen J, Bai L, Xiao J, Zheng R, Shan X, et al. One-step synthesis of few-layer niobium carbide MXene as a promising anode material for high-rate lithium ion batteries. *Dalton Trans*. 2019;48:14433–14439. <https://doi.org/10.1039/C9DT03260F>
34. Syamsai R, Rodriguez JR, Pol VG, Le Q Van. Double transition metal MXene as anodes for Li - ion batteries. *Sci Rep*. 2021;11:688. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79991-8>.
35. Li X, Bai Y, Shi X, Su N, Nie G, Zhang R, et al. Applications of MXene (Ti₃C₂T_x) in photocatalysis: A review. *Mater Adv*. 2021;2(5):1570–94. <https://doi.org/10.1039/D0MA00938E>.
36. Akhtar S, Singh J, Tran TT, Roy S, Lee E, Kim J. Synthesis and optical properties of light-emitting V₂N MXene quantum dots. *Opt Mater*. 2023;138:113660. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113660>.
37. Sun P, Liu J, Liu Q, Yu J, Chen R, Zhu J, et al. Stable 3D porous N-MXene/NiCo₂S₄ network with Ni–O atomic bridging for

- printed hybrid micro-supercapacitors. *Chem Eng J.* 2024;493:152731. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152731>.
38. Feng X, Bai T, Xiao B. Prediction of surface termination preference of out-of-plane ordered double-transition metal MXenes (o-MXenes) from first-principles calculations. *J Phys Conf Ser.* 2022;2321:012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2321/1/012012>.
 39. Liu D, Lu Q, Xuan C, Xiao L, Zhao F, Feng X, et al. In situ generation of a $Ti_3C_2T_x$ ($T_x = F, O$ and OH) MXene decorated CuO nanocomposite with extraordinary catalytic activity for TKX-50 thermal decomposition. *Mater Chem Front.* 2023;7:2851-2859. <https://doi.org/10.1039/D2QM01244H>.
 40. Verger L, Natu V, Carey M, Barsoum MW. MXenes: An Introduction of Their Synthesis, Select Properties, and Applications. *Trends Chem.* 2019;1:656-69. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.04.006>.
 41. Verma R, Sharma A, Dutta V, Chauhan A, Pathak D, Ghotekar S. Recent trends in synthesis of 2D MXene - based materials for sustainable environmental applications. *Emergent Mater.* 2024;7:35-62. <https://doi.org/10.1007/s42247-023-00591-z>.
 42. Yan A, Tan S, Taimoor H, Awan A, Cheng F, Zhang M, et al. Recent advances in the use of MXenes for photoelectrochemical sensors. *Chem Eng J.* 2024;482:148774. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148774>.
 43. Zhang CJ, Pinilla S, McEvoy N, Cullen CP, Anasori B, Long E, et al. Oxidation Stability of Colloidal Two-Dimensional Titanium Carbides (MXenes). *Chem Mater.* 2017;29:4848-56. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b00745>.
 44. Li N, Peng J, Ong W jun, Ma T, Zhang P, Jiang J. Perspective MXenes : An Emerging Platform for Wearable Electronics and Looking Beyond. *Matter.* 2021;4:377-407. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.10.024>.
 45. Wang Z. A Review on MXene: Synthesis , Properties and Applications on Alkali Metal Ion Batteries. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021;714:042030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/714/4/042030>.
 46. Alhabeib M, Maleski K, Mathis TS, Sarycheva A, Hatter CB, Uzun S, et al. Selective Etching of Silicon from Ti_3SiC_2 (MAX) To Obtain 2D Titanium Carbide (MXene). *Angew Chemie Int Ed.* 2018;57:5444-5448. <https://doi.org/10.1002/anie.201802232>.
 47. Alhabeib M, Maleski K, Anasori B, Lelyukh P, Clark L, Sin S, et al. Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide ($Ti_3C_2T_x$ MXene). *Chem Mater.* 2017;29(18):7633-44. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847>.
 48. Cockreham CB, Zhang X, Li H, Hammond-pereira E, Sun J, Saunders SR, et al. Inhibition of $AlF_3 \cdot 3H_2O$ Impurity Formation in Ti_3C_2T . *ACS Appl. Energy Mater.* 2019;2:8145-8152. <https://doi.org/10.1021/acsaeam.9b01618>.
 49. Ghidui M, Lukatskaya MR, Zhao MQ, Gogotsi Y, Barsoum MW. Conductive two-dimensional titanium carbide "clay" with high volumetric capacitance. *Nature.* 2015;516:78-81. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13970>.
 50. Rahman M, Al Mamun MS. Future prospects of MXenes: synthesis, functionalization, properties, and application in field effect transistors. *Nanoscale Adv.* 2023;6:367-85. <https://doi.org/10.1039/D3NA00874F>.
 51. Sokol M, Natu V, Kota S, Barsoum MW. On the Chemical Diversity of the MAX Phases. *Trends Chem.* 2019;1:210-223. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.02.016>.
 52. Liu F, Zhou A, Chen J, Jia J, Zhou W, Wang L, et al. Preparation of Ti_3C_2 and Ti_2C MXenes by fluoride salts etching and methane adsorptive properties. *Appl Surf Sci.* 2017;416:781-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.239>.
 53. Karlsson LH, Birch J, Halim J, Barsoum MW, Persson POÅ. Atomically Resolved Structural and Chemical Investigation of Single MXene Sheets. *Nano Lett.* 2015;15:4955-60. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00737>.
 54. Urbankowski P, Anasori B, Makaryan T, Er D, Kota S, Walsh PL, et al. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene). *Nanoscale.* 2016;8:11385-11391. <https://doi.org/10.1039/C6NR02253G>.
 55. Peng C, Wei P, Chen X, Zhang Y, Zhu F, Cao Y, et al. A hydrothermal etching route to synthesis of 2D MXene (Ti_3C_2 , Nb_2C): Enhanced exfoliation and improved adsorption performance. *Ceram Int.* 2018;44:18886-93. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.124>.
 56. Yang S, Zhang P, Wang F, Ricciardulli AG, Lohe MR, Blom PWM, et al. Fluoride-Free Synthesis of Two-Dimensional Titanium Carbide (MXene) Using A Binary Aqueous System. *Angew Chemie.* 2018;130:15717-15721. <https://doi.org/10.1002/ange.201809662>.
 57. Sun W, Shah SA, Chen Y, Tan Z, Gao H, Habib T, et al. Electrochemical etching of Ti_2AlC to Ti_2CT_x (MXene) in low-concentration hydrochloric acid solution. *J Mater Chem A.* 2017;5:21663-21668. <https://doi.org/10.1039/C7TA05574A>.
 58. Li M, Lu J, Luo K, Li Y, Chang K, Chen K, et al. Element Replacement Approach by Reaction with Lewis Acidic Molten Salts to Synthesize Nanolaminated MAX Phases and MXenes. *J Am Chem Soc.* 2019;141(11):4730-4737. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b00574>.
 59. Luo J, Matios E. Interfacial structure design of MXene-based nanomaterials for electrochemical energy storage and conversion. *InfoMat* 2020;2:1057-76. <https://doi.org/10.1002/inf2.12118>.
 60. Liu L, Orbay M, Luo S, Duluard S, Shao H, Harmel J. Exfoliation and Delamination of $Ti_3C_2T_x$ MXene Prepared via Molten Salt Etching Route. *ACS Nano* 2022;16:111-118. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08498>.
 61. Yu H, Wang Y, Jing Y, Ma J, Du C feng, Yan Q. Surface modified mxene-based nanocomposites for electrochemical energy conversion and storage. *Small* 2019;15:1901503. <https://doi.org/10.1002/sml.201901503>.
 62. Tang Q, Zhou Z, Shen P. Are MXenes promising anode materials for li ion batteries? Computational studies on electronic properties and Li storage capability of Ti_3C_2 and $Ti_3C_2X_2$ ($X = F, OH$) Monolayer. *J. Am. Chem. Soc.* 2012;134:16909-16916. <https://doi.org/10.1021/ja308463r>.
 63. Lukatskaya MR, Bak S min, Yu X, Yang X qing, Barsoum MW. Probing the mechanism of high capacitance in 2d titanium carbide using in situ x-ray absorption spectroscopy. *Adv. Energy Mater.* 2015;5:1500589. <https://doi.org/10.1002/aenm.201500589>.
 64. Zdravil L, Zahradnicek R, Mohan R, Sedlacek P, Nejdil L, Schmiedova V, et al. Preparation of graphene quantum dots through liquid phase exfoliation method. *J Lumin.* 2018;204:203-208. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.08.017>.
 65. Xu Y, Wang X, Zhang L, Lv F. Chem Soc Rev Recent progress in two-dimensional inorganic. *Chem Soc Rev.* 2018;47:586-625. <http://dx.doi.org/10.1039/C7CS00500H>.
 66. Yang X, Jia Q, Duan F, Hu B, Wang M, He L, et al. Multiwall carbon nanotubes loaded with MoS_2 quantum dots and MXene quantum dots : Non-Pt bifunctional catalyst for the methanol oxidation and oxygen reduction reactions in alkaline solution.

- Appl Surf Sci. 2018;464:78-87. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.09.069>.
67. Shao B, Liu Z, Zeng G, Wang H, Liang Q, He Q, et al. Two-dimensional transition metal carbide and nitride (MXene) derived quantum dots (QDs): synthesis, properties, applications and prospects. J Mater Chem. A. 2020;8:7508-7535. <https://doi.org/10.1039/D0TA01552K>.
68. Zhang T, Jiang X, Li G, Yao Q, Yang J. A Red-Phosphorous-Assisted Ball-Milling Synthesis of Few- Layered $Ti_3C_2T_x$ (MXene) Nanodot Composite. ChemNanoMat 2018;4:56–60. <https://doi.org/10.1002/cnma.201700232>.
69. Yu X, Cai X, Cui H, Lee SW, Yu XF, Liu B, Fluorine-free preparation of titanium carbide MXene quantum dots with high near-infrared photothermal performances for cancer therapy. Nanoscale 2017;9:17859-17864. <https://doi.org/10.1039/C7NR05997C>
70. Rahman UU, Humayun M, Ghani U, Usman M, Ullah H, Khan A, El-Metwaly NM, Khan A. MXenes as emerging materials: synthesis, properties, and applications. Molecules. 2022; 27(15):4909. <https://doi.org/10.3390/molecules27154909>.
71. Zhou C, Tan K.B, Han W, Wang L, Lu M. A review of mxene-derived quantum dots: synthesis, characterization, properties, and applications. Particuology. 2024;19,50-71. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.12.016>.
72. Xu Q, Cai W, Li W, Sreenivasan T, He Z, Ong W jun, et al. Two-dimensional quantum dots: fundamentals, photoluminescence mechanism and their energy and environmental applications. Mater Today Energy. 2018;10:222–40. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.09.005>.
73. Cheng H, Ding L xin, Chen G feng, Zhang L, Xue J, Wang H. Molybdenum Carbide Nanodots Enable Efficient Electrocatalytic Nitrogen Fixation under Ambient Conditions. Adv Mat. 2018;30:1803694. <https://doi.org/10.1002/adma.201803694>
74. Wang Y, Li C, Han X, Liu D, Zhao H, Li Z, et al. Ultrasmall Mo_2C nanoparticle-decorated carbon polyhedrons for enhanced microwave absorption. ACS Appl Nano Mater. 2018;1:5366–5376. <https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01479>.
75. Zhang J, Kong N, Uzun S, Levitt A, Seyedin S, Lynch PA, et al. Scalable Manufacturing of Free-Standing , Strong $Ti_3C_2T_x$ MXene Films with Outstanding Conductivity. Adv. Mat. 2020;32:2001093. <https://doi.org/10.1002/adma.202001093>
76. Wang R, Young Jang W, Zhang W, Venkata Reddy C, Kakarla RR, Li C, et al. Emerging two-dimensional (2D) MXene-based nanostructured materials: Synthesis strategies, properties, and applications as efficient pseudo-supercapacitors. Chem Eng J. 2023;472: 144913. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144913>.
77. Rabeie B, Mahkam M, Mahmoodi NM, Lan CQ. Graphene quantum dot incorporation in the zeolitic imidazolate framework with sodalite (SOD) topology: Synthesis and improving the adsorption ability in liquid phase. J Environ Chem Eng. 2021;9(6):106303. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106303>
78. Rabeie B, Mahmoodi NM, Mahkam M. Morphological diversity effect of graphene quantum dot / MIL88A (Fe) composites on dye and pharmaceuticals (tetracycline and doxycycline) removal. J Environ Chem Eng. 2022;10:108321. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108321>.
79. Russo V, Hmoudah M, Broccoli F, Iesce MR. Applications of metal organic frameworks in wastewater treatment : A review on adsorption and photodegradation. Front Chem Eng. 2020; 2:581487. <https://doi.org/10.3389/fceng.2020.581487>.
80. Kandisa RV, Saibaba KV N. Dye Removal by Adsorption: A Review. Int J Biodegrad Bioremediat. 2016;7:6. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000371>.
81. Huang Z, Zeng Q, Liu Y, Xu Y, Li R, Hong H, et al. Facile synthesis of 2D TiO_2 @MXene composite membrane with enhanced separation and antifouling performance. J Memb Sci. 2021;640:119854. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119854>.
82. Kadhom M, Deng B. Metal-organic frameworks (MOFs) in water filtration membranes for desalination and other applications. Appl Mater Today. 2018;11:219–30. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.02.008>
83. Wang T, Li M, Xu H. et al. MXene sediment-based poly(vinyl alcohol)/sodium alginate aerogel evaporator with vertically aligned channels for highly efficient solar steam generation. Nano-Micro Lett. 2024;16:220. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01433-1>.
84. Hosseiniabadi-Farahani Z, Hosseini-Monfared H, Mahmoodi NM, Graphene oxide nanosheet: preparation and dye removal from binary system colored wastewater. Desalin Water Treat. 2015;56: 2382-2394.
85. Rabeie B, Mahmoodi NM, Dargahi A, Hayati B, Rezakhani Moghaddam H. Magnetic COF/MOF hybrid: An efficient Z-scheme photocatalyst for the visible light-assisted degradation of tetracycline and malachite green. J Mol Liq. 2025;421:126869. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.126869>.
86. Rabeie B, Mahmoodi NM, Hayati B, Dargahi A, Rezakhani Moghaddam H. Chitosan adorned with ZIF-67 on ZIF-8 biocomposite: A potential LED visible light-assisted photocatalyst for wastewater decontamination. Int J Biol Macromol. 2024;282:137405. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137405>
87. Rabeie B, Mahmoodi NM. Green and environmentally friendly architecture of starch-based ternary magnetic biocomposite (Starch/MIL100/CoFe₂O₄): Synthesis and photocatalytic degradation of tetracycline and dye. Int J Biol Macromol. 2024;274:133318. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133318>.
88. Hoseinzadeh H, Bakhtiari M, Seifpanahi-Shabani K, Oveisi M, Hayati B, Rabeie B, et al. Synthesis of the metal-organic framework – Copper oxide nanocomposite and LED visible light organic contaminants (dye and pharmaceutical) destruction ability in the water. Mater Sci Eng B. 2021;274:115495. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115495>
89. Rabeie B, Mahmoodi NM. Hierarchical ternary titanium dioxide decorated with graphene quantum dot/ZIF-8 nanocomposite for the photocatalytic degradation of doxycycline and dye using visible light. J Water Process Eng. 2023;54:103976. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103976>.
90. Rabeie B, Mahmoodi NM. Heterogeneous MIL-88A on MIL-88B hybrid: A promising eco-friendly hybrid from green synthesis to dual application (Adsorption and photocatalysis) in tetracycline and dyes removal. J Colloid Interface Sci. 2024;654:495–522. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.060>.
91. Li Y, Xia Z, Yang Q, Wang L, Xing Y. Review on g-C₃N₄-based S-scheme heterojunction photocatalysts. J Mater Sci Technol. 2022;125:128–44. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.02.035>
92. Low J, Yu J, Jaroniec M, Wageh S, Al-Ghamdi AA. Heterojunction Photocatalysts. Adv Mater. 2017;29:1601694. <https://doi.org/10.1002/adma.201601694>.

93. Yang H. A short review on heterojunction photocatalysts: Carrier transfer behavior and photocatalytic mechanisms. *Mater Res Bull.* 2021;142:111406. <https://doi.org/10.1016/j.matresbull.2021.111406>.
94. Meng A, Cheng B, Tan H, Fan J, Su C, Yu J. TiO_2 /polydopamine S-scheme heterojunction photocatalyst with enhanced CO_2 -reduction selectivity. *Appl Catal B Environ.* 2021;289:120039. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120039>.
95. Liu S, Chen L, Liu T, Cai S, Zou X, Jiang J, et al. Rich S vacant $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CuInS}_2$ hollow heterojunction for highly efficient selective photocatalytic CO_2 reduction. *Chem Eng J.* 2021;424:130325. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130325>.
96. Salazar-Marín D, Oza G, Real JAD, Cervantes-Urbe A, Pérez-Vidal H, Kesarla MK, et al. Distinguishing between type II and S-scheme heterojunction materials: A comprehensive review. *Appl Surf Sci Adv.* 2024;19:100536. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100536>.
97. Serpone N, Maruthamuthu P, Pichat P, Pelizzetti E, Hidaka H. Exploiting the interparticle electron transfer process in the photocatalysed oxidation of phenol, 2-chlorophenol and pentachlorophenol: chemical evidence for electron and hole transfer between coupled semiconductors. *J Photochem Photobiol. A: Chem.* 1995;85:247-255. [https://doi.org/10.1016/1010-6030\(94\)03906-B](https://doi.org/10.1016/1010-6030(94)03906-B).
98. Serpone N, Borgarello E, Gratzel M. Visible light induced generation of hydrogen from H_2S in mixed semiconductor dispersions; improved efficiency through inter-particle electron transfer. *J Chem Soc Chem Commun.* 1984;6:342-344. <https://doi.org/10.1039/C39840000342>.
99. Xue J, Bao J. Interfacial charge transfer of heterojunction photocatalysts: Characterization and calculation. *Surf. Interfaces.* 2021;25:101265. <https://doi.org/10.1016/j.surfint.2021.101265>.
100. Wang Z, Lin Z, Shen S, Zhong W, Cao S. Advances in designing heterojunction photocatalytic materials. *Chinese J Catal.* 2021;42:710-30. [http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067\(20\)63698-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63698-1).
101. Yuan Y, Guo R, Tang H, Li F, Ji X, Yin L, Zeng D, Li Z, Sheng, et al. A review of metal oxide-based Z-scheme heterojunction photocatalysts: actualities and developments. *Mater Today Energy.* 2021;21:100829. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100829>.
102. Liao G, Li C, Liu S, Yong F, Fang B. Emerging frontiers of Z-scheme photocatalytic systems. *Trends Chem.* 2021;4:111-27. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.11.005>.
103. Ge M, Li Z. Recent progress in Ag_3PO_4 -based all-solid-state Z-scheme photocatalytic systems. *Chinese J Catal.* 2017;38:1794-803. [http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62905-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62905-X).
104. Wu F, Li X, Liu W, Zhang S. Highly enhanced photocatalytic degradation of methylene blue over the indirect all-solid-state Z-scheme $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-RGO-TiO}_2$ nanoheterojunctions. *Appl Surf Sci.* 2017;405:60-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.285>.
105. Xu Q, Zhang L, Cheng B, Fan J, Yu J. S-scheme heterojunction photocatalyst. *Chem.* 2020;6:1543-1559. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.06.010>.
106. Low J, Jiang C, Cheng B, Wageh S, Al-Ghamdi AA. A review of direct Z-scheme photocatalysts. *Small.* 2017;13:1700080. <https://doi.org/10.1002/smlt.201700080>.
107. Li X, Garlisi C, Guan Q, Anwer S, Al-ali K, Palmisano G, et al. A review of material aspects in developing direct Z-scheme photocatalysts. *Mater. Today.* 2021;47:75-107. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.02.017>.
108. Shao B, Liu Z, Zeng G, Liu Y, Liang Q, He Q. Synthesis of 2D/2D $\text{CoAl-LDHs/Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ Schottky-junction with enhanced interfacial charge transfer and visible-light photocatalytic performance. *Appl Catal B Environ.* 2021;286:119867. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119867>.
109. Zhang S, Cai M, Wu J, Wang Z, Lu X, Li K, et al. photocatalytic degradation of TiO_2 via incorporating Ti_3C_2 MXene for methylene blue removal from water. *Catal. Commun.* 2023;174:106594. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106594>.
110. Ding X, Li C, Wang L, Feng L, Han D, Wang W. Fabrication of hierarchical $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{MXene-AgNPs}$ nanocomposites with enhanced photocatalytic performances. *Mater Lett.* 2019;247:174-7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.02.125>.
111. Diao Y, Yan M, Li X, Zhou C, Peng B, Chen H. In-situ grown of $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ nanotube arrays on Ti meshes for efficient degradation of organic pollutants under visible light irradiation. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp.* 2020;594:124511. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124511>.
112. Quang V, Khoa T, Nguyen T, Quang, Khan A. Photocatalytic degradation of methyl orange dye by $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-TiO}_2$ heterojunction under solar light. *Chemosphere.* 2021;276:130154. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130154>.
113. Akbari M, Rasouli J, Rasouli K, Ghaedi S, Mohammadi M, Rajabi H, et al. MXene-based composite photocatalysts for efficient degradation of antibiotics in wastewater. *Sci Rep.* 2024;14:31498. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83333-3>.
114. Othman Z, Sinopoli A, Mackey HR, Mahmoud KA. Efficient Photocatalytic Degradation of organic dyes by $\text{AgNPs/TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene Composites under UV and Solar Light. *ACS Omega.* 2021;6:33325-33338. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03189>.
115. Diao Y, Yan M, Li X, Zhou C, Peng B, Chen H, et al. In-situ grown of $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ nanotube arrays on Ti meshes for efficient degradation of organic pollutants under visible light irradiation. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp.* 2020;594:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124511>.
116. Li M, Lai C, Yi H, Huang D, Qin L, Liu X, et al. Multiple charge-carrier transfer channels of Z-scheme bismuth tungstate-based photocatalyst for tetracycline degradation: Transformation pathways and mechanism. *J Colloid Interface Sci.* 2019;555:770-82. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.08.035>.
117. Long R, Yu Z, Tan Q, Feng X, Zhu X, Li X, et al. Ti_3C_2 MXene/ $\text{NH}_2\text{-MIL-88B(Fe)}$: Research on the adsorption kinetics and photocatalytic performance of an efficient integrated photocatalytic adsorbent. *Appl Surf Sci.* 2021;570:151244. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151244>.
118. Jiao S, Liu L. Friction-induced enhancements for photocatalytic degradation of $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$ nanohybrid. *Ind Eng Chem Res.* 2019;58(39):18141-8. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03680>.
119. Zhang H, Li M, Zhu C, Tang Q, Kang P, Cao J. Preparation of magnetic $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2$ MXene with excellent photocatalytic performance. *Ceram Int.* 2020;46:81-8. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.236>.
120. Cai T, Wang L, Liu Y, Zhang S, Dong W, Chen H, et al. $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2$ MXene interface materials as a Schottky catalyst with enhanced photocatalytic activities and anti-

- photocorrosion performance. *Appl Catal B Environ*. 2018;239:545–54. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.08.053>.
121. Li K, Lu X, Zhang Y, Liu K, Huang Y, Liu H. Bi₃TaO₇/Ti₃C₂ heterojunctions for enhanced photocatalytic removal of water-borne contaminants. *Environ Res*. 2020;185:109409. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109409>.
 122. Deng H, Li ZJ, Wang L, Yuan LY, Lan JH, Chang ZY, et al. Nanolayered Ti₃C₂ and SrTiO₃ composites for photocatalytic reduction and removal of uranium (VI). *ACS Appl Nano Mater*. 2019;2:2283–94. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00205>.
 123. Peng C, Wang H, Yu H, Peng F. (111) TiO₂-x/Ti₃C₂: Synergy of active facets, interfacial charge transfer and Ti³⁺ doping for enhance photocatalytic activity. *Mater Res Bull*. 2017;89:16–25. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.12.049>.
 124. Peng C, Yang X, Li Y, Yu H, Wang H, Peng F. Hybrids of Two-Dimensional Ti₃C₂ and TiO₂ Exposing {001} Facets toward Enhanced Photocatalytic Activity. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2016;8(9):6051–60. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b11973>.
 125. Liu Q, Tan X, Wang S, Ma F, Znad H, Shen Z, et al. MXene as a non-metal charge mediator in 2D layered CdS@Ti₃C₂@TiO₂ composites with superior Z-scheme visible light-driven photocatalytic activity. *Environ Sci Nano*. 2019;6(10):3158–69. <https://doi.org/10.1039/C9EN00567F>.
 126. Liu N, Lu N, Yu HT, Chen S, Quan X. Efficient day-night photocatalysis performance of 2D/2D Ti₃C₂/Porous g-C₃N₄ nanolayers composite and its application in the degradation of organic pollutants. *Chemosphere*. 2020;246: 125760. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125760>.
 127. Fang H, Pan Y, Yin M, Pan C. Enhanced photocatalytic activity and mechanism of Ti₃C₂-OH/Bi₂WO₆:Yb³⁺, Tm³⁺ towards degradation of RhB under visible and near infrared light irradiation. *Mater Res Bull*. 2020;121:110618. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.110618>.
 128. Li S, Zhang T, Zheng H, Niu J, Zhang W, Ma J, et al. Efficient photo-Fenton degradation of water pollutants via peracetic acid activation over sulfur vacancies-rich metal sulfides/MXenes. *Appl Catal B Environ*. 2025;366:125000. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.125000>.
 129. Mahmoodi NM, Mokhtari-Shourijeh Z, Preparation of aminated nanoporous nanofiber by solvent casting/porogen leaching technique and dye adsorption modeling. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2016;65:378-389. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.05.042>.
 130. Foroughifar N, Mobinikhaledi A, Rabeie B, Jalili L, DABCO as a mild and efficient catalyst for the synthesis of tetrahydropyrimidines. *Rev Roum Chim* 2013;58:491-495.
 131. Mahmoodi NM, Ghadirli MM, Hayati B, Mahmoodi B, Rabeie B, Synthesis of ZIF-8 composite (g-C₃N₄@ ZIF-8/Ag₃PO₄) as a catalyst for the malachite green and tetracycline degradation. *Inorg Chem Commun*. 2025;177:114345. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114345>.
 132. Ayar S, Tajik H, Mahmoodi NM, Fallah Moafi H, Rabeie B. Removal of malachite green dye from wastewater using metal-organic mold biocomposite (ZIF-67) and polymer (carboxymethyl cellulose). *J Stud Color World*. 2024;14(4):285-301. <https://doi.org/10.30509/jscw.2024.167336.1197> [In Persian].
 133. Mazarji M, Mahmoodi NM, Bidhendi GN, Li A, Li M, James A, Mahmoodi B, Pan J, Synthesis, Characterization, and Enhanced Photocatalytic Dye Degradation: Optimizing Graphene-Based ZnO-CdSe Nanocomposites via Response Surface Methodology. *J. Alloys Compd*. 2025;1010:177999. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177999>.
 134. Mahmoodi NM, Mokhtari-Shourijeh Z, Modified poly (vinyl alcohol)-triethylenetetramine nanofiber by glutaraldehyde: preparation and dye removal ability from wastewater. *Desalin Water Treat*. 2016;57:20076-20083. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1109562>.
 135. Mahmoodi NM, Hosseinabadi-Farahani Z, Chamani H, Dye adsorption from single and binary systems using NiO-MnO₂ nanocomposite and artificial neural network modeling. *Environ Prog Sustain*. 2017;36:111-119. <https://doi.org/10.1002/ep.12452>.
 136. Mahmoodi NM, Maghsoodi A, Kinetics and isotherm of cationic dye removal from multicomponent system using the synthesized silica nanoparticle. *Desalin Water Treat*. 2015;54:562-571. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.880158>.
 137. Oshani F, Kargari A, Norouzbeigi R, Mahmoodi NM, Role of Fabrication Parameters on Microstructure and Permeability of Geopolymer Microfilters. *Chem Eng Res Des*. 2024;210:190-201. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.08.009>.
 138. Dousti S, Mahmoodi B, Bijari M, Shahbazi A, Investigating the Effect of Various Precursors in the Synthesis and Improvement of the Photocatalytic Performance of Graphite Carbon Nitride in the Degradation of Rhodamine B Dye Under Visible Light. *J Color Sci Tech*. 2024;18(2):135-150. <https://doi.org/10.30509/JCST.2024.167291.1224> [In Persian].
 139. Mahmoodi NM, Bakhtiari M, Oveisi M, Mahmoodi B, Hayati B, Green synthesis of eco-friendly magnetic metal-organic framework nanocomposites (AlFum-graphene oxide) and pollutants (dye and pharmaceuticals) removal capacity from water. *Mater Chem Phys*. 2023;302:127720. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127720>.
 140. Ahmadi S, Mahmoodi B, Kazemini M, Mahmoodi NM, Photocatalytic degradation of dye (Reactive Red 198) and pharmaceutical (tetracycline) using MIL-53 (Fe) and MIL-100 (Fe): catalyst synthesis and pollutant degradation. *Pigm Resin Technol*. 2023;52:357-368. <https://doi.org/10.1108/PRT-05-2022-0067>.
 141. Shokrgozar A, Seifpanahi-Shabani K, Mahmoodi B, Mahmoodi NM, Khorasheh F, Baghalha M, Synthesis of Ni-Co-CNT nanocomposite and evaluation of its photocatalytic dye (Reactive Red 120) degradation ability using response surface methodology. *Desalin Water Treat* 2021;216:389-400. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26804>.

How to cite this article:

B. Rabeie . MXenes: From introduction of structure and synthesis to photocatalytic ability to degrade dyes and organic pollutants in water. *J Stud Color World*. 2025;15(1):91-114. <https://doi.org.10.30509/jscw.2025.167478.1222> [In Persian].