

پیشرفت‌های نوین در مهندسی مواد دوبعدی: از گرافن تا MXenes و کاربردهای آینده

محمد جواد اکبری^{۱,*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران Akbari.Mjj@gmail.com

چکیده

مواد دوبعدی (2D) طی دو دهه گذشته به عنوان یکی از مهم‌ترین کلاس‌های مواد نوین مورد توجه گسترده محققان قرار گرفته‌اند. از زمان کشف گرافن در سال ۲۰۰۴، خانواده بزرگی از مواد دوبعدی شامل دی‌کلکوژنیدهای فلزات واسطه (TMDs)، MXenes، نیتريد بور شش‌ضلعی (h-BN) و سایر ساختارهای لایه‌ای توسعه یافته‌اند. این مواد به دلیل خواص منحصر به فردی نظیر مساحت سطح بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی استثنایی، انعطاف‌پذیری مکانیکی، و قابلیت تنظیم خواص الکترونیکی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های ذخیره‌سازی انرژی، کاتالیز، الکترونیک، و زیست‌پزشکی پیدا کرده‌اند. این مقاله مروری جامع به بررسی آخرین پیشرفت‌ها در زمینه مهندسی مواد دوبعدی می‌پردازد. در ابتدا، روش‌های سنتز مقیاس‌پذیر شامل رسوب‌گذاری شیمیایی بخار (CVD)، تقشر مایع، و سنتز شیمیایی مرطوب بررسی می‌شود. سپس، خواص و کاربردهای گرافن و مشتقات آن، MXenes (به‌ویژه Ti_3C_2Tx)، و TMDs مورد تحلیل قرار می‌گیرد. کاربردهای این مواد در باتری‌های یونی، ابرخازن‌ها، کاتالیزگرهای تکامل هیدروژن، و سیستم‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر نیز بررسی می‌شود. در نهایت، چالش‌های موجود و چشم‌انداز آینده این حوزه تحقیقاتی مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مواد دوبعدی پتانسیل بالایی برای انقلاب در فناوری‌های انرژی پاک و الکترونیک نسل آینده دارند.

کلیدواژه‌ها: مواد دوبعدی، گرافن، MXenes، دی‌کلکوژنیدهای فلزات واسطه، ذخیره‌سازی انرژی، کاتالیز، نانومواد

۱- مقدمه

مواد دوبعدی (2D) کلاسی از مواد کریستالی هستند که از لایه‌های اتمی یا مولکولی تشکیل شده‌اند که توسط پیوندهای قوی درون لایه‌ای و پیوندهای ضعیف بین لایه‌ای (نیروهای واندروالس) به هم متصل می‌شوند [۱]. این ساختار منحصر به فرد باعث بروز خواص فیزیکی و شیمیایی استثنایی می‌شود که در مواد سه‌بعدی مشاهده نمی‌شود. کشف گرافن در سال ۲۰۰۴ توسط Geim و Novoselov نقطه عطفی در علم مواد محسوب می‌شود که راه را برای کشف و توسعه مواد دوبعدی دیگر هموار کرد [۲].

در طول دو دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای روی مواد دوبعدی صورت گرفته و خانواده بزرگی از این مواد شناسایی شده‌اند. از جمله مهم‌ترین کلاس‌های مواد دوبعدی می‌توان به گرافن و مشتقات آن، دی‌کلکوژنیدهای فلزات واسطه (TMDs)، MXenes، نیتريد بور شش‌ضلعی (h-BN)، فسفرین سیاه (BP)، و کربنیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) اشاره کرد [۳]. هر یک از این مواد دارای خواص منحصر به فردی هستند که آن‌ها را برای کاربردهای خاص مناسب می‌سازد.

از نظر کاربردی، مواد دوبعدی در زمینه‌های مختلفی نظیر ذخیره‌سازی انرژی، کاتالیز، الکترونیک، حسگرها، و زیست‌پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حوزه ذخیره‌سازی انرژی، این مواد به عنوان الکترودهای باتری‌های یونی، ابرخازن‌ها، و

پیل‌های سوختی استفاده می‌شوند [۴]. در کاتالیز، آن‌ها به عنوان کاتالیزگرهای موثر برای واکنش‌های تکامل هیدروژن، احیای CO_2 ، و فوتوکاتالیز عمل می‌کنند [۵]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، هنوز چالش‌های مهمی برای تجاری‌سازی مواد دوبعدی وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به روش‌های سنتز مقیاس‌پذیر، کنترل کیفیت، پایداری محیطی، و بهینه‌سازی خواص برای کاربردهای خاص اشاره کرد [۶]. این مقاله مروری جامع به بررسی وضعیت فعلی تحقیقات در زمینه مواد دوبعدی، کاربردهای آن‌ها، و چالش‌های آینده می‌پردازد.

۲- روش‌های سنتز مقیاس‌پذیر مواد دوبعدی

۲-۱- رسوب‌گذاری شیمیایی بخار (CVD)

روش رسوب‌گذاری شیمیایی بخار یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های تولید مواد دوبعدی با کیفیت بالا در مقیاس وسیع محسوب می‌شود [۷]. این روش بر اساس تجزیه حرارتی مواد پیش‌ساز در فاز گازی و رسوب محصولات روی سطح زیرلایه عمل می‌کند. CVD امکان کنترل دقیق ضخامت، یکنواختی، و کیفیت کریستالی فیلم‌های دوبعدی را فراهم می‌کند. برای سنتز گرافن، معمولاً از زیرلایه‌های فلزی نظیر مس یا نیکل استفاده می‌شود. فرآیند شامل قرار دادن زیرلایه فلزی در دمای بالا (معمولاً ۸۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) در حضور گاز حاوی کربن (مثل متان) می‌باشد [۸]. پیشرفت‌های اخیر نشان داده‌اند که می‌توان گرافن تک‌کریستال در مقیاس ویفری (۱۲ اینچ) تولید کرد [۹]. برای سنتز TMDs، روش CVD معمولاً شامل استفاده از اکسیدهای فلزی و منابع کلکوژن (گوگرد، سلنیم، یا تلوریم) می‌باشد. مثلاً برای سنتز MoS_2 ، از MoO_3 و پودر گوگرد در دمای ۶۵۰-۷۵۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود [۱۰]. کنترل دقیق پارامترهای فرآیند نظیر دما، فشار، و نسبت مواد پیش‌ساز برای حصول کیفیت مطلوب ضروری است. اگرچه CVD روش مؤثری برای تولید مواد دوبعدی با کیفیت بالا محسوب می‌شود، اما دارای محدودیت‌هایی نیز هست. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به نیاز به دمای بالا، کنترل دشوار تعداد لایه‌ها، و چالش‌های انتقال فیلم‌ها از زیرلایه رشد به زیرلایه‌های هدف اشاره کرد [۱۱].

۲-۲- لایه‌برداری مایع (Liquid Exfoliation)

لایه‌برداری مایع روشی است که در آن مواد لایه‌ای حجمی به ورقه‌های دوبعدی تک‌لایه یا چندلایه تبدیل می‌شوند. این روش شامل دو مرحله اصلی است: (۱) ضعیف کردن پیوندهای بین‌لایه‌ای از طریق افزایش فاصله بین لایه‌ها، و (۲) اعمال نیروی مکانیکی برای جداسازی لایه‌ها [۱۲].

یکی از روش‌های مؤثر لایه‌برداری مایع، روش اکسیداسیون شیمیایی است که معمولاً برای تولید اکسید گرافن (GO) استفاده می‌شود. در این روش، گرافیت با اسیدهای قوی نظیر اسید سولفوریک و نیتریک تیمار می‌شود که منجر به اکسیداسیون و افزایش فاصله بین لایه‌ها می‌شود [۱۳]. سپس می‌توان با استفاده از سونیکاسیون، اکسید گرافن را به صورت ورقه‌های تک‌لایه پراکنده کرد.

روش دیگر لایه‌برداری مایع، استفاده از حلال‌های آلی یا سورفکتانت‌ها است. در این روش، مواد لایه‌ای در حلال‌هایی با انرژی سطحی مناسب پراکنده می‌شوند و سپس با اعمال نیروی مکانیکی (سونیکاسیون یا همگن‌سازی) تقشر می‌یابند [۱۴]. این روش مزیت حفظ ساختار کریستالی مواد را دارد ولی بازده تولید آن معمولاً پایین است.

تقشر الکتروشیمیایی روش نوینی است که در آن از میدان الکتریکی برای تقشر مواد لایه‌ای استفاده می‌شود. این روش امکان تولید مواد دوبعدی با کیفیت بالا و در مقیاس نسبتاً بزرگ را فراهم می‌کند [۱۵]. علاوه بر این، امکان کنترل تعداد لایه‌ها و خواص سطحی محصول نیز وجود دارد.

۲-۳- سنتز شیمیایی مرطوب

سنتز شیمیایی مرطوب شامل روش‌های هیدروترمال و سولوترمال است که در آن واکنش‌های شیمیایی در دما و فشار بالا در محیط مایع صورت می‌گیرد [۱۶]. این روش امکان تولید مواد دوبعدی با مورفولوژی و اندازه کنترل شده را فراهم می‌کند و برای تولید مواد کامپوزیتی و دوپه شده بسیار مناسب است.

در روش هیدروترمال، مواد پیش‌ساز در محلول آبی در دمای ۱۵۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد و فشار اشباع بخار تحت واکنش قرار می‌گیرند. این روش برای سنتز اکسیدهای فلزی دوبعدی، هیدروکسیدهای لایه‌ای دوگانه (LDHs)، و مواد کامپوزیتی مناسب است [۱۷]. مزیت این روش سادگی فرآیند و امکان تولید مقیاس بزرگ است.

روش سولوترمال مشابه روش هیدروترمال است با این تفاوت که از حلال‌های آلی به جای آب استفاده می‌شود. این روش برای سنتز مواد حساس به آب یا مواد با خواص سطحی خاص مناسب است [۱۸]. امکان کنترل دقیق اندازه ذرات، شکل، و خواص سطحی از مزایای این روش محسوب می‌شود.

یکی از پیشرفت‌های اخیر در سنتز شیمیایی مرطوب، استفاده از روش‌های مدرن نظیر سنتز میکروویو و سنتز سونوشیمیایی است. این روش‌ها امکان کاهش زمان واکنش، کنترل بهتر مورفولوژی، و تولید مواد با خواص بهبود یافته را فراهم می‌کنند [۱۹].

۳- گرافن و مشتقات آن

۳-۱- ساختار و خواص گرافن

گرافن تک‌لایه‌ای از اتم‌های کربن است که در ساختار شش‌ضلعی (هانیکام) منظم شده‌اند. هر اتم کربن در گرافن به سه اتم کربن مجاور از طریق پیوندهای کووالانسی sp^2 متصل است [۲۰]. این ساختار منحصر به فرد باعث بروز خواص استثنایی گرافن می‌شود که آن را به یکی از مهم‌ترین مواد دوبعدی تبدیل کرده است.

گرافن دارای خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای است. مدول یانگ آن حدود ۱ ترا پاسکال و استحکام کششی آن حدود ۱۳۰ گیگا پاسکال است که آن را به یکی از قوی‌ترین مواد شناخته شده تبدیل می‌کند [۲۱]. علاوه بر این، گرافن انعطاف‌پذیری بالایی دارد و می‌تواند تا ۲۵ درصد کرنش تحمل کند بدون آن که ساختار کریستالی آن آسیب ببیند.

از نظر الکتریکی، گرافن رفتار نیمه‌فلزی دارد و حامل‌های بار آن (الکترون‌ها و حفره‌ها) رفتار شبیه به ذرات نسبیتی بدون جرم دارند [۲۲]. هدایت الکتریکی گرافن بسیار بالا است و می‌تواند تا 10^6 سیمنس بر متر برسد. تحرک الکترون‌ها در گرافن در دمای اتاق می‌تواند از ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر ولت ثانیه تجاوز کند.

هدایت حرارتی گرافن نیز بسیار بالا است و در دمای اتاق حدود ۵۰۰۰ وات بر متر کلین می‌باشد که آن را به یکی از بهترین هادی‌های حرارتی شناخته شده تبدیل می‌کند [۲۳]. این خاصیت باعث می‌شود که گرافن برای کاربردهای مدیریت حرارتی در الکترونیک بسیار مناسب باشد.

۳-۲- مشتقات گرافن

اگرچه گرافن خالص خواص استثنایی دارد، اما برای بسیاری از کاربردها نیاز به تعدیل خواص آن وجود دارد. مشتقات گرافن شامل اکسید گرافن (GO)، اکسید گرافن احیاشده (rGO)، و گرافن‌های عاملی شده با گروه‌های مختلف شیمیایی هستند [۲۴].

اکسید گرافن از طریق اکسیداسیون شیمیایی گرافیت تولید می‌شود و دارای گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار نظیر هیدروکسیل، اپوکسی، و کربوکسیل است. این گروه‌های عاملی باعث آبدوستی بالای GO می‌شوند و امکان پراکندگی آن در آب و سایر حلال‌های قطبی را فراهم می‌کنند [۲۵]. همچنین GO دارای خواص عایقی است که آن را از گرافن متمایز می‌کند.

اکسید گرافن احیاشده (rGO) از طریق احیای شیمیایی، حرارتی، یا الکتروشیمیایی GO تولید می‌شود. در این فرآیند، بخشی از گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار حذف می‌شوند و هدایت الکتریکی تا حدی بازیابی می‌شود [۲۶]. rGO ترکیبی از خواص گرافن و GO است و برای کاربردهای مختلف نظیر الکترودهای ابرخازن و کاتالیزورها مناسب است. گرافن‌های عاملی‌شده با عناصر یا گروه‌های مختلف نظیر نیتروژن، بور، گوگرد، یا گروه‌های آلی تولید می‌شوند. این عاملی‌سازی امکان تنظیم خواص الکتریکی، شیمیایی، و کاتالیتیکی گرافن را فراهم می‌کند [۲۷]. مثلاً گرافن دوپه‌شده با نیتروژن خواص کاتالیتیکی بهتری برای واکنش احیای اکسیژن نشان می‌دهد.

۳-۳- کاربردهای گرافن

گرافن و مشتقات آن کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف دارند. در حوزه الکترونیک، گرافن به عنوان کانال هادی در ترانزیستورهای اثر میدان، اتصالات شفاف، و مدارهای انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود [۲۸]. علاوه بر این، گرافن برای تولید صفحات نمایش انعطاف‌پذیر و شفاف بسیار مناسب است.

در زمینه ذخیره‌سازی انرژی، گرافن به عنوان مواد الکترودی در ابرخازن‌ها و باتری‌های یونی استفاده می‌شود. مساحت سطح بالای گرافن (تا ۲۶۳۰ متر مربع بر گرم) و هدایت الکتریکی عالی آن باعث می‌شود که ظرفیت الکتروشیمیایی بالایی داشته باشد [۲۹]. گرافن همچنین به عنوان حامل در آندهای سیلیکونی باتری‌های لیتیم-یون استفاده می‌شود. کاربردهای کاتالیتیکی گرافن نیز بسیار گسترده هستند. گرافن‌های عاملی‌شده به عنوان کاتالیزورهای فلزی آزاد برای واکنش‌های تکامل هیدروژن، احیای اکسیژن، و احیای CO₂ استفاده می‌شوند [۳۰]. مزیت این کاتالیزورها عدم استفاده از فلزات گرانبها و پایداری بالا در محیط‌های خورنده است.

در حوزه زیست‌پزشکی، گرافن و مشتقات آن برای کاربردهای تشخیصی، دارورسانی، و مهندسی بافت استفاده می‌شوند. اکسید گرافن به دلیل آبدوستی بالا و امکان عاملی‌سازی با بیومولکول‌ها، برای سامانه‌های هدفمند دارورسانی مناسب است [۳۱].

۴- نسل جدید مواد دوبعدی MXenes

۴-۱- معرفی و ساختار MXenes

MXenes خانواده‌ای از کاربیدها، نیتريد‌ها، و کاربونیتريد‌های فلزات واسطه دوبعدی هستند که برای اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط محققان دانشگاه درکسل کشف شدند [۳۲]. نام MXene از ترکیب MX که در آن M فلز واسطه و X کربن یا نیتروژن است و پسوند "ene" (به مانند گرافن) گرفته شده است. فرمول عمومی MXenes به صورت $Mn+1XnTx$ است که در آن $n = 1, 2, 3, 4$ و T نشان‌دهنده گروه‌های عاملی سطحی است [۳۳].

MXenes از طریق حذف انتخابی لایه‌های A از فازهای MAX تولید می‌شوند. فازهای MAX خانواده‌ای از کاربیدها و نیتريد‌های سه‌تایی با فرمول عمومی $Mn+1AXn$ هستند که در آن A معمولاً آلومینیم، سیلیسیم، یا گالیم است [۳۴]. فرآیند حذف انتخابی معمولاً با استفاده از اسید فلوئوریدریک (HF) یا ترکیبات حاوی فلوئور انجام می‌شود.

ساختار MXenes شامل لایه‌های فلزی که بین آن‌ها اتم‌های کربن یا نیتروژن قرار دارند، می‌باشد. سطح MXenes معمولاً با گروه‌های عاملی نظیر -OH، -O، و -F پوشیده شده است که خواص آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۵]. تا به امروز، بیش از ۳۰ ترکیب MXene به صورت تجربی سنتز شده‌اند و محاسبات نظری وجود بیش از ۱۰۰ ترکیب ممکن را پیش‌بینی می‌کنند.

۴-۲- خواص MXenes

MXenes دارای ترکیبی منحصر به فرد از خواص فلزی و سرامیکی هستند. آن‌ها هدایت الکتریکی بالایی دارند که در برخی موارد تا ۲۰۰۰۰ سیمنس بر متر می‌رسد [۳۶]. این هدایت الکتریکی بالا در کنار آبدوستی طبیعی MXenes، آن‌ها را برای کاربردهای الکتروشیمیایی بسیار مناسب می‌سازد.

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد MXenes، قابلیت تنظیم فاصله بین لایه‌ها از طریق درهم‌آمیختن یون‌ها یا مولکول‌هاست. این خاصیت امکان ذخیره‌سازی یون‌های مختلف و استفاده از آن‌ها در کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی را فراهم می‌کند [۳۷]. همچنین MXenes دارای ظرفیت حجمی بالایی برای ذخیره‌سازی یون‌های لیتیم، سدیم، و پتاسیم هستند. خواص مکانیکی MXenes نیز قابل توجه است. آن‌ها انعطاف‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند به شکل فیلم‌های نازک خودایستا تشکیل شوند. مدول ینگ MXenes معمولاً در محدوده ۲۰۰-۴۰۰ گیگا پاسکال است که آن‌ها را برای کاربردهای مکانیکی مناسب می‌سازد [۳۷].

MXenes همچنین دارای خواص نوری جالبی هستند. آن‌ها در طیف مرئی و مادون قرمز جذب قابل توجهی دارند و می‌توانند برای کاربردهای پلاسمونیک و فوتوترمال استفاده شوند [۳۸]. این خاصیت آن‌ها را برای کاربردهای زیست‌پزشکی نظیر درمان سرطان با حرارت مناسب می‌سازد.

۴-۳- Ti_3C_2Tx مهم‌ترین عضو خانواده MXenes

Ti_3C_2Tx اولین و مطالعه‌شده‌ترین عضو خانواده MXenes است که از حذف انتخابی آلومینیم از فاز MAX مربوط به Ti_3AlC_2 تولید می‌شود [۴۰]. این MXene دارای ساختار سه‌لایه‌ای تیتانیم با لایه‌های کربن در بین آن‌ها است و سطح آن با گروه‌های عاملی مختلف پوشیده شده است.

Ti_3C_2Tx دارای هدایت الکتریکی بسیار بالایی است که در شرایط بهینه تا ۱۵۰۰۰ سیمنس بر متر می‌رسد. این هدایت الکتریکی بالا در کنار آبدوستی طبیعی آن، Ti_3C_2Tx را به انتخاب مناسبی برای الکترودهای ابرخازن‌ها و باتری‌های آبی تبدیل می‌کند [۴۱].

ظرفیت حجمی Ti_3C_2Tx برای ذخیره‌سازی انرژی بسیار بالا است. در ابرخازن‌ها، این ماده می‌تواند ظرفیت تا ۹۰۰ فاراد بر سانتی‌متر مکعب ارائه دهد که آن را به یکی از بهترین مواد برای ذخیره‌سازی انرژی با چگالی بالا تبدیل می‌کند [۴۲]. این ظرفیت بالا ناشی از ذخیره‌سازی شبه-ظرفیتی یون‌ها در فضای بین لایه‌ها و در سطح است.

Ti_3C_2Tx همچنین در کاربردهای کاتالیتیکی عملکرد مناسبی نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که این MXene می‌تواند به عنوان کاتالیزگر برای واکنش تکامل هیدروژن (HER) عمل کند و با بهینه‌سازی گروه‌های عاملی سطحی، فعالیت کاتالیتیکی آن قابل بهبود است [۴۳].

۴-۴- سایر MXenes مهم

علاوه بر Ti_3C_2Tx ، MXenes دیگری نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که هر یک دارای خواص منحصر به فرد هستند. V_2CTx یکی از این MXenes است که دارای خواص الکتروشیمیایی عالی برای ذخیره‌سازی یون‌های لیتیم است [۴۴]. این MXene همچنین دارای مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون در مقایسه با Ti_3C_2Tx است.

Nb_2CTx و Mo_2CTx دیگر اعضای مهم خانواده MXenes هستند که برای کاربردهای کاتالیتیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. Nb_2CTx دارای خواص ابررسانایی در دمای پایین است که آن را برای کاربردهای الکترونیک کوانتومی جالب می‌سازد [۴۵]. Mo_2CTx نیز دارای فعالیت کاتالیتیکی بالا برای واکنش تکامل هیدروژن است.

اخیراً، MXenes آنترابی بالا (High-Entropy MXenes) نیز معرفی شده‌اند که در آن چندین فلز مختلف در لایه‌های فلزی حضور دارند [۴۶]. این MXenes دارای خواص منحصر به فردی هستند که از ترکیب خواص فلزات مختلف ناشی می‌شود و امکان تنظیم دقیق‌تر خواص را فراهم می‌کنند.

۵- دی‌کلکوژنیدهای فلزات واسطه (TMDs)

۵-۱- ساختار و خواص کلی TMDs

دی‌کلکوژنیدهای فلزات واسطه (TMDs) خانواده بزرگی از مواد دوبعدی با فرمول عمومی MX_2 هستند که در آن M فلز واسطه (مو، تنگستن، رنیم و غیره) و X کلکوژن (گوگرد، سلیسیم، تلوریم) است [۴۷]. ساختار TMDs شامل لایه‌ای از اتم‌های فلزی است که بین دو لایه از اتم‌های کلکوژن قرار گرفته‌اند و این سه لایه از طریق پیوندهای کووالانسی قوی به هم متصل شده‌اند.

TMDs دارای انواع مختلف ساختار کریستالی هستند که شامل H_2 ، T_1 و T' می‌باشند. فاز H_2 دارای ساختار منشوری شش‌ضلعی است و معمولاً پایدارترین فاز محسوب می‌شود. فاز T_1 دارای ساختار اکتاهدرال است و معمولاً ناپایدار است و به فاز H_2 تبدیل می‌شود. فاز T_1 نیز یک ساختار اکتاهدرال اعوجاج‌یافته است که در برخی TMDs مشاهده می‌شود [۴۸]. یکی از ویژگی‌های مهم TMDs، تغییر خواص الکترونیکی آن‌ها از حالت حجمی به تک‌لایه است. بسیاری از TMDs در حالت حجمی دارای گاف نواری غیرمستقیم هستند، در حالی که در حالت تک‌لایه دارای گاف نواری مستقیم می‌شوند [۴۹]. این تغییر باعث افزایش قابل توجه بازده فوتولومینسانس می‌شود و آن‌ها را برای کاربردهای اپتوالکترونیکی مناسب می‌سازد.

۵-۲- MoS_2 نماینده مهم TMDs

دی‌سولفید مولیبدن (MoS_2) یکی از مطالعه‌شده‌ترین اعضای خانواده TMDs است. MoS_2 در حالت تک‌لایه دارای گاف نواری مستقیم حدود ۱.۸ الکترون‌ولت است که آن را برای کاربردهای اپتوالکترونیکی و فوتوولتائیک مناسب می‌سازد [۵۰]. همچنین، MoS_2 دارای تحرک الکترونی قابل قبولی است که آن را برای کاربردهای الکترونیکی مناسب می‌کند.

MoS_2 دارای خواص کاتالیتیکی عالی برای واکنش تکامل هیدروژن (HER) است. مطالعات نشان داده‌اند که لایه‌های MoS_2 حاوی مکان‌های فعال برای جذب هیدروژن هستند و فعالیت کاتالیتیکی آن با افزایش تراکم لایه‌ها افزایش می‌یابد [۵۱]. این خاصیت MoS_2 را به جایگزین مناسبی برای کاتالیزگرهای پلاتینی در فرآیند تولید هیدروژن تبدیل می‌کند.

در حوزه ذخیره‌سازی انرژی، MoS_2 به عنوان مواد آندی در باتری‌های لیتیم-یون مورد استفاده قرار می‌گیرد. ظرفیت نظری MoS_2 برای ذخیره‌سازی لیتیم حدود ۶۷۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم است که بسیار بالاتر از گرافیت متداول (۳۷۲ میلی‌آمپر ساعت بر گرم) است [۵۲]. با این حال، MoS_2 با مشکلات هدایت الکتریکی پایین و تغییرات حجمی طی فرآیند شارژ-دشارژ مواجه است.

۵-۳- WS_2 و سایر TMDs

دی‌سولفید تنگستن (WS_2) یکی دیگر از اعضای مهم خانواده TMDs است که خواص مشابه MoS_2 دارد. WS_2 در حالت تک‌لایه دارای گاف نواری مستقیم حدود ۲.۱ الکترون‌ولت است که آن را برای کاربردهای فوتوولتائیک و فوتوکاتالیز مناسب می‌سازد [۵۳]. WS_2 همچنین دارای پایداری بهتری در برابر اکسیداسیون نسبت به MoS_2 است.

WSe₂ و MoSe₂ نیز اعضای مهم خانواده TMDs هستند که برای کاربردهای اپتوالکترونیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مواد دارای گاف نواری کوچک‌تری نسبت به سولفیدها هستند و برای کاربردهای مادون قرمز مناسب‌تر هستند [۵۴]. WSe₂ همچنین دارای خواص p-type طبیعی است که آن را برای ساخت مدارهای مکمل CMOS مناسب می‌سازد.

ReS₂ و ReSe₂ TMDs منحصر به فردی هستند که برخلاف سایر اعضای این خانواده، دارای آنیزوتروپی بالا در صفحه هستند. این خاصیت آن‌ها را برای کاربردهای خاص نظیر فوتودتکتورهای قطبی حساس مناسب می‌سازد. [۵۵]

۵-۴- کاربردهای TMDs

TMDs کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف دارند. در حوزه الکترونیک، آن‌ها به عنوان کانال هادی در ترانزیستورهای اثر میدان استفاده می‌شوند. ترانزیستورهای مبتنی بر TMDs دارای نسبت on/off بالا و مصرف انرژی پایین هستند که آن‌ها را برای کاربردهای الکترونیک کم‌مصرف مناسب می‌سازد [۵۶].

در کاربردهای اپتوالکترونیکی، TMDs برای ساخت فوتودتکتورها، LED، و لیزرهای پیوسته استفاده می‌شوند. گاف نواری مستقیم TMDs تک‌لایه آن‌ها را برای این کاربردها بسیار مناسب می‌سازد [۵۷]. همچنین، امکان تنظیم خواص نوری از طریق کنترل تعداد لایه‌ها یا اعمال کرنش وجود دارد.

TMDs همچنین در حوزه کاتالیز کاربردهای مهمی دارند. آن‌ها به عنوان کاتالیزگرهای موثر برای واکنش‌های تکامل هیدروژن، تکامل اکسیژن، و احیای CO₂ استفاده می‌شوند [۵۸]. فعالیت کاتالیتیکی TMDs می‌تواند از طریق ایجاد نقص، دوپیچ، یا تشکیل ساختارهای هیبریدی بهبود یابد.

۶- کاربردهای مواد دوبعدی در ذخیره‌سازی انرژی

۶-۱- ابرخازن‌ها

ابرخازن‌ها دستگاه‌هایی هستند که انرژی را از طریق فرآیندهای الکتروستاتیک یا فرآیندهای فارادی سریع ذخیره می‌کنند. مواد دوبعدی به دلیل مساحت سطح بالا، هدایت الکتریکی عالی، و قابلیت دسترسی آسان یون‌ها، برای کاربرد در ابرخازن‌ها بسیار مناسب هستند [۵۹].

گرافن و مشتقات آن به طور گسترده در ابرخازن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. گرافن دارای مساحت سطح نظری ۲۶۳۰ متر مربع بر گرم است که آن را برای ذخیره‌سازی بار الکتروستاتیک مناسب می‌سازد [۶۰]. ظرفیت نظری گرافن برای ابرخازن‌های دولایه الکتریکی حدود ۵۵۰ فاراد بر گرم است، اگرچه مقادیر عملی معمولاً پایین‌تر هستند.

MXenes، به‌ویژه Ti₃C₂Tx، عملکرد فوق‌العاده‌ای در ابرخازن‌ها نشان می‌دهند. آن‌ها دارای ظرفیت حجمی بسیار بالایی هستند که ناشی از ذخیره‌سازی شبه-ظرفیتی یون‌ها در فضای بین لایه‌ها است [۶۱]. Ti₃C₂Tx می‌تواند ظرفیت تا ۱۵۰۰ فاراد بر سانتی‌متر مکعب در الکترولیت‌های آبی ارائه دهد که آن را به یکی از بهترین مواد برای ابرخازن‌های چگال تبدیل می‌کند.

TMDs نیز در ابرخازن‌ها کاربرد دارند، اگرچه معمولاً به دلیل هدایت الکتریکی پایین‌تر، با مواد رسانا ترکیب می‌شوند. WS₂ و MoS₂ می‌توانند از طریق فرآیندهای شبه-ظرفیتی انرژی ذخیره کنند و ظرفیت قابل قبولی ارائه دهند [۶۲].

۶-۲- باتری‌های لیتیم-یون

باتری‌های لیتیم-یون رایج‌ترین نوع باتری‌های قابل شارژ هستند که در دستگاه‌های الکترونیکی و خودروهای برقی استفاده می‌شوند. مواد دوبعدی کاربردهای مهمی به عنوان مواد آندی، کاتدی، و افزودنی در این باتری‌ها دارند [۶۳].

گرافن به عنوان مواد حامل و رسانا در آیندهای سیلیکونی استفاده می‌شود. سیلیکون دارای ظرفیت بسیار بالایی برای ذخیره‌سازی لیتیم است (۴۲۰۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم) اما با مشکل تغییرات حجمی شدید مواجه است. گرافن می‌تواند این تغییرات حجمی را تحمل کند و هدایت الکتریکی آن را بهبود بخشد [۶۴].

MXenes نیز در باتری‌های لیتیم-یون کاربرد دارند. آن‌ها می‌توانند یون‌های لیتیم را بین لایه‌های خود ذخیره کنند و ظرفیت قابل قبولی ارائه دهند Ti_3C_2Tx . می‌تواند ظرفیت حدود ۴۰۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم برای ذخیره‌سازی لیتیم ارائه دهد [۶۵]. مزیت MXenes نسبت به سایر مواد، هدایت الکتریکی بالای آن‌ها است که نیاز به مواد رسانا را کاهش می‌دهد.

TMDs نیز به عنوان مواد آندی در باتری‌های لیتیم-یون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. MoS_2 ظرفیت نظری ۶۷۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم دارد اما با مشکلات هدایت الکتریکی پایین و تغییرات حجمی مواجه است [۶۶]. این مشکلات می‌تواند از طریق ترکیب با مواد رسانا و کنترل مورفولوژی تا حدی حل شود.

۶-۳- باتری‌های فراتر از لیتیم

با توجه به محدودیت منابع لیتیم، باتری‌های مبتنی بر سایر یون‌ها نظیر سدیم، پتاسیم، و آلومینیم مورد توجه قرار گرفته‌اند. مواد دوبعدی به دلیل قابلیت تنظیم فاصله بین لایه‌ها و انعطاف‌پذیری ساختاری، برای این کاربردها مناسب هستند [۶۷]. در باتری‌های سدیم-یون، MXenes عملکرد بسیار خوبی نشان می‌دهند. Ti_3C_2Tx می‌تواند یون‌های سدیم را به طور مؤثر ذخیره کند و ظرفیت قابل قبولی ارائه دهد. مزیت MXenes این است که آن‌ها تغییرات حجمی کمتری طی فرآیند شارژ-دشارژ دارند [۶۸].

گرافن و مشتقات آن نیز در باتری‌های سدیم-یون کاربرد دارند. گرافن nitrogen-doped می‌تواند یون‌های سدیم را به طور مؤثر ذخیره کند و پایداری چرخه‌ای خوبی از خود نشان دهد [۶۹]. TMDs نیز برای باتری‌های سدیم-یون مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج امیدوارکننده‌ای به دست آمده است.

۷- کاربردهای کاتالیتیکی مواد دوبعدی

۷-۱- کاتالیز تکامل هیدروژن (HER)

واکنش تکامل هیدروژن (HER) یکی از مهم‌ترین واکنش‌های الکتروکاتالیتیکی برای تولید هیدروژن از طریق تجزیه آب است. مواد دوبعدی به دلیل مساحت سطح بالا و قابلیت تنظیم خواص الکترونیکی، کاتالیزگرهای مناسبی برای این واکنش محسوب می‌شوند [۷۰].

MoS_2 یکی از بهترین کاتالیزگرهای غیرفلزی برای HER شناخته شده است. مطالعات نشان داده‌اند که فعالیت کاتالیتیکی MoS_2 عمدتاً در لبه‌های آن متمرکز است، در حالی که سطح بی‌زال آن فعالیت کمتری دارد [۷۱]. بنابراین، افزایش تراکم لبه‌ها از طریق کنترل مورفولوژی یا ایجاد نقص می‌تواند فعالیت کاتالیتیکی را بهبود بخشد.

گرافن خالص فعالیت کاتالیتیکی پایینی برای HER دارد، اما می‌تواند از طریق دوپینگ با عناصر نظیر نیتروژن، بور، یا فسفر فعال شود. گرافن nitrogen-doped فعالیت کاتالیتیکی قابل توجهی برای HER نشان می‌دهد که ناشی از تغییر چگالی الکترونی اطراف اتم‌های نیتروژن است [۷۲].

MXenes نیز برای HER مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطالعات نظری نشان می‌دهند که برخی MXenes مثل Mo_2C می‌توانند فعالیت کاتالیتیکی مناسبی برای HER داشته باشند. با این حال، گروه‌های عاملی سطحی تأثیر قابل توجهی بر فعالیت کاتالیتیکی دارند [۷۳].

۷-۲- کاتالیز تکامل اکسیژن (OER)

واکنش تکامل اکسیژن (OER) واکنش مکمل HER در فرآیند تجزیه آب است و از نظر سینتیکی چالش برانگیزتر است. این واکنش شامل انتقال چهار الکترون است و نیاز به کاتالیزگرهای فعال و پایدار دارد [۷۴]. اکسیدهای فلزی دوبعدی نظیر NiO ، Co_3O_4 و MnO_2 کاتالیزگرهای مناسبی برای OER محسوب می‌شوند. این مواد می‌توانند به شکل ورقه‌های نازک تولید شوند و فعالیت کاتالیتیکی بالایی از خود نشان دهند [۷۵]. هیدروکسیدهای لایه‌ای دوگانه (LDHs) نیز کاتالیزگرهای مؤثری برای OER هستند. گرافن و مشتقات آن می‌توانند به عنوان حامل برای نانوذرات کاتالیزگر OER استفاده شوند. گرافن اکسید می‌تواند با گونه‌های فلزی عاملی‌سازی شود و فعالیت کاتالیتیکی قابل توجهی برای OER نشان دهد [۷۶]. MXenes نیز برای OER مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برخی MXenes می‌توانند فعالیت کاتالیتیکی قابل قبولی برای OER نشان دهند، اگرچه معمولاً نیاز به بهینه‌سازی گروه‌های عاملی سطحی دارند [۷۷].

۷-۳- کاتالیز احیای CO_2

احیای الکتروشیمیایی CO_2 فرآیندی است که می‌تواند CO_2 را به محصولات مفید نظیر CO ، متان، اتان، و الکل‌ها تبدیل کند. این فرآیند از نظر زیست‌محیطی مهم است زیرا می‌تواند به کاهش غلظت CO_2 در اتمسفر کمک کند [۷۸]. مواد دوبعدی کاربن‌دار نظیر گرافن nitrogen-doped و $\text{g-C}_3\text{N}_4$ کاتالیزگرهای مناسبی برای احیای CO_2 محسوب می‌شوند. این مواد می‌توانند CO_2 را به CO یا سایر محصولات کربنی تبدیل کنند [۷۹]. مزیت این کاتالیزگرها عدم استفاده از فلزات گرانبها و پایداری بالا در شرایط واکنش است. TMDs نیز برای احیای CO_2 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. MoS_2 و WS_2 می‌توانند فعالیت کاتالیتیکی قابل قبولی برای احیای CO_2 نشان دهند، به‌ویژه زمانی که با مواد رسانا ترکیب شوند [۸۰]. MXenes نیز برای احیای CO_2 مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برخی MXenes می‌توانند CO_2 را به CO یا سایر محصولات احیا کنند، اگرچه انتخاب‌پذیری و بازده آن‌ها نیاز به بهبود دارد [۸۱].

۸- کاربردهای نوظهور و آینده‌نگر

۸-۱- الکترونیک انعطاف‌پذیر

الکترونیک انعطاف‌پذیر یکی از حوزه‌های مهم کاربرد مواد دوبعدی است. این مواد به دلیل انعطاف‌پذیری مکانیکی بالا و حفظ خواص الکتریکی تحت کرنش، برای ساخت دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف‌پذیر مناسب هستند [۸۲]. گرافن به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و هدایت الکتریکی عالی، برای ساخت الکترودهای شفاف انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. این الکترودها می‌توانند در صفحات نمایش انعطاف‌پذیر، سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر، و حسگرهای پوشیدنی بکار روند [۸۳].

MXenes نیز برای الکترونیک انعطاف‌پذیر کاربرد دارند. آن‌ها می‌توانند به شکل فیلم‌های نازک خودایستا تشکیل شوند و تحت کرنش‌های مکانیکی خواص الکتریکی خود را حفظ کنند [۸۴]. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ به‌ویژه برای ساخت آنتن‌های انعطاف‌پذیر و تداخل‌سنج‌های الکترومغناطیسی مناسب است.

TMDs نیز در الکترونیک انعطاف‌پذیر کاربرد دارند. آن‌ها می‌توانند به عنوان کانال نیمه‌هادی در ترانزیستورهای انعطاف‌پذیر استفاده شوند [۸۵]. MoS_2 و WS_2 تحت کرنش‌های مکانیکی گاف نواری تغییر می‌کنند که می‌تواند برای ساخت حسگرهای کرنش استفاده شود.

۸-۲- کاربردهای زیست پزشکی

مواد دوبعدی کاربردهای گسترده‌ای در زیست پزشکی دارند که شامل تشخیص، درمان، و مهندسی بافت می‌شود. این مواد به دلیل مساحت سطح بالا، قابلیت عاملی سازی، و خواص نوری منحصر به فرد، برای این کاربردها مناسب هستند [۸۶]. گرافن و مشتقات آن در بیوسنسینگ کاربرد دارند. گرافن اکسید می‌تواند با بیومولکول‌ها نظیر DNA، پروتئین، و آنزیم‌ها عاملی سازی شود و به عنوان بستر برای تشخیص حساس مولکول‌های زیستی استفاده شود [۸۷]. حسگرهای مبتنی بر گرافن می‌توانند غلظت‌های بسیار پایین آنالیت‌ها را تشخیص دهند.

MXenes نیز در کاربردهای زیست پزشکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. آن‌ها دارای خواص فوتوترمال هستند و می‌توانند برای درمان سرطان با حرارت استفاده شوند [۸۸]. Ti_3C_2Tx می‌تواند تحت تابش لیزر مادون قرمز نزدیک گرم شود و سلول‌های سرطانی را از بین ببرد.

TMDs نیز در زیست پزشکی کاربرد دارند. آن‌ها می‌توانند به عنوان نانوحامل برای دارورسانی هدفمند استفاده شوند [۸۹]. WS_2 و MoS_2 دارای سمیت پایین و قابلیت تجزیه زیستی هستند که آن‌ها را برای کاربردهای درونی مناسب می‌سازد.

۸-۳- کاربردهای محیط زیستی

مواد دوبعدی کاربردهای مهمی در حفاظت از محیط زیست دارند که شامل تصفیه آب، تصفیه هوا، و حذف آلاینده‌ها می‌شود. این مواد به دلیل مساحت سطح بالا و قابلیت عاملی سازی، جاذب‌های مؤثری برای آلاینده‌های مختلف محسوب می‌شوند [۹۰].

گرافن اکسید به دلیل حضور گروه‌های عاملی اکسیژن دار، قابلیت بالایی برای جذب فلزات سنگین، رنگ‌ها، و آلاینده‌های آلی دارد. این ماده می‌تواند به عنوان جاذب در فرآیندهای تصفیه آب استفاده شود [۹۱]. علاوه بر این، GO می‌تواند برای ساخت غشاهای تصفیه با انتخاب پذیری بالا استفاده شود.

MXenes نیز برای کاربردهای محیط زیستی مناسب هستند. آن‌ها می‌توانند یون‌های فلزی سنگین را جذب کنند و برای تصفیه آب استفاده شوند [۹۲]. Ti_3C_2Tx قابلیت بالایی برای جذب یون‌های سرب، کادمیم، و جیوه دارد.

TMDs نیز در کاربردهای محیط زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها می‌توانند به عنوان فوتوکاتالیزگر برای تجزیه آلاینده‌های آلی تحت تابش نور مرئی استفاده شوند [۹۳]. MoS_2 و WS_2 فعالیت فوتوکاتالیتیکی مناسبی برای تجزیه رنگ‌ها و سایر آلاینده‌ها دارند.

۹- چالش‌ها و محدودیت‌ها

۹-۱- چالش‌های سنتز و تولید

یکی از مهم‌ترین چالش‌های مواد دوبعدی، تولید مقیاس پذیر آن‌ها با کیفیت یکنواخت است. روش‌های سنتز فعلی معمولاً با کیفیت بالا اما مقیاس کوچک دارند (مثل تقشر مکانیکی) یا مقیاس بزرگ اما کیفیت متغیر (مثل تقشر مایع) [۹۴]. کنترل تعداد لایه‌ها یکی از چالش‌های مهم در سنتز مواد دوبعدی است. خواص بسیاری از این مواد به شدت به تعداد لایه‌ها وابسته است و کنترل دقیق آن در مقیاس بزرگ دشوار است [۹۵]. روش CVD که کیفیت بالایی دارد، هنوز با مشکل کنترل تعداد لایه‌ها مواجه است.

انتقال فیلم‌های دوبعدی از زیرلایه رشد به زیرلایه‌های هدف نیز چالش مهمی است. این فرآیند معمولاً باعث آسیب به فیلم، آلودگی، یا تشکیل چین و چروک می‌شود. توسعه روش‌های انتقال بهبود یافته یا رشد مستقیم روی زیرلایه‌های هدف ضروری است.

۹-۲- پایداری و اکسیداسیون

بسیاری از مواد دوبعدی، به ویژه MXenes، در برابر اکسیداسیون حساس هستند. این مواد در حضور اکسیژن و رطوبت تجزیه می‌شوند که محدودیت جدی برای کاربردهای عملی آنها محسوب می‌شود. توسعه روش‌های محافظت از این مواد یا بهبود پایداری آنها ضروری است.

گرافن نیز در شرایط خاص ممکن است اکسیده شود، اگرچه پایداری بهتری نسبت به MXenes دارد. TMDs معمولاً پایداری بهتری دارند اما برخی از آنها نیز در شرایط خاص ممکن است تجزیه شوند. روش‌های مختلفی برای بهبود پایداری مواد دوبعدی پیشنهاد شده‌اند که شامل پوشش‌دهی با لایه‌های محافظ، ذخیره‌سازی در محیط‌های بی‌هوازی، و تعدیل شیمیایی سطح است. با این حال، هنوز راه‌حل کاملی برای این مشکل یافت نشده است.

۱۰- نتیجه‌گیری

مواد دوبعدی طی دو دهه گذشته از مرحله تحقیقات پایه به مرحله کاربردهای عملی رسیده‌اند. از گرافن که نقطه آغاز این انقلاب بود تا MXenes و TMDs که امکانات جدیدی فراهم کرده‌اند، این مواد پتانسیل بالایی برای تحول در فناوری‌های مختلف نشان داده‌اند. کاربردهای آنها در ذخیره‌سازی انرژی، کاتالیز، الکترونیک، و زیست‌پزشکی نشان‌دهنده تنوع و قابلیت‌های بالای این مواد است.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌های مهمی همچنان باقی مانده‌اند. سنتز مقیاس‌پذیر، کنترل کیفیت، پایداری، و هزینه تولید از جمله مسائلی هستند که باید حل شوند. حل این چالش‌ها نیاز به همکاری بین دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی، و صنایع دارد.

آینده مواد دوبعدی بسیار امیدوارکننده است. کشف مواد جدید، بهبود روش‌های سنتز، و توسعه کاربردهای نوین می‌تواند این حوزه را به مرحله‌ای جدید از بلوغ برساند. مواد دوبعدی قطعاً نقش مهمی در فناوری‌های آینده ایفا خواهند کرد و می‌توانند به حل چالش‌های جهانی نظیر انرژی پاک، محیط زیست، و سلامت کمک کنند. در نهایت، مواد دوبعدی نمونه‌ای از قدرت علم مواد در تغییر جهان هستند. از یک کشف علمی ساده در آزمایشگاه تا فناوری‌هایی که زندگی روزمره را تغییر می‌دهند، این مواد نشان‌دهنده اهمیت تحقیقات بنیادی و کاربردی در پیشرفت بشر هستند.

مراجع

1. Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A., & Castro Neto, A. H. (2016). 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353(6298), aac9439.
2. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669.
3. Anasori, B., & Gogotsi, Y. (2022). MXenes: trends, growth, and future directions. *Graphene and 2D Materials*, 7(3), 75-79.
4. Wang, X., Gu, W., Das, P., Li, C., Li, Z. T., Jin, J., ... & Shao, M. (2025). Chemistry of Two-Dimensional Materials for Sustainable Energy and Catalysis. *Accounts of Materials Research*, 6(1), 45-56.

5. Choi, Y., Kim, J., Lee, J., Chen, X., Seo, B., Kim, Y., ... & Park, S. (2025). Recent Progress on 2D-Material-Based Smart Textiles: Materials, Methods, and Multifunctionality. *Advanced Engineering Materials*, 27(1), 2500188.
6. Yang, K., Li, B., Li, Z., Wang, Y., Chen, H., Wang, C., ... & Zhang, G. (2025). The two-dimensional materials in multidimensional applications. *Materials Science and Engineering: B*, 313, 117815.
7. Zhang, Y., Zhang, L., & Zhou, C. (2013). Review of chemical vapor deposition of graphene and related applications. *Accounts of Chemical Research*, 46(10), 2329-2339.
8. Li, X., Cai, W., An, J., Kim, S., Nah, J., Yang, D., ... & Ruoff, R. S. (2009). Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science*, 324(5932), 1312-1314.
9. Wang, M., Huang, M., Sha, D., Liu, B., Zhang, C., Sheng, Y., ... & Liu, Z. (2021). Single-crystal, large-area, fold-free monolayer graphene. *Nature*, 596(7873), 519-524.
10. Kang, K., Xie, S., Huang, L., Han, Y., Huang, P. Y., Mak, K. F., ... & Park, J. (2015). High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity. *Nature*, 520(7549), 656-660.
11. Duong, D. L., Yun, S. J., & Lee, Y. H. (2017). van der Waals layered materials: opportunities and challenges. *ACS nano*, 11(12), 11803-11830.
12. Coleman, J. N., Lotya, M., O'Neill, A., Bergin, S. D., King, P. J., Khan, U., ... & Nicolosi, V. (2011). Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 331(6017), 568-571.
13. Stankovich, S., Dikin, D. A., Piner, R. D., Kohlhaas, K. A., Kleinhammes, A., Jia, Y., ... & Ruoff, R. S. (2007). Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon*, 45(7), 1558-1565.
14. Paton, K. R., Varrla, E., Backes, C., Smith, R. J., Khan, U., O'Neill, A., ... & Coleman, J. N. (2014). Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature Materials*, 13(6), 624-630.
15. Abdelkader, A. M., Valles, C., Cooper, A. J., Kinloch, I. A., & Dryfe, R. A. (2014). Alkali reduction of graphene oxide in molten halide salts: production of corrugated graphene derivatives for high-performance supercapacitors. *ACS nano*, 8(11), 11225-11233.

16. Zhan, J., Zhang, Z., Qian, X., Wang, C., Xie, Z., & Qian, Y. (1998). Solvothermal synthesis of nanocrystalline MoS₂ from MoO₃ and elemental sulfur. *Journal of solid state chemistry*, 141(1), 270-273.
17. Deng, D., Novoselov, K. S., Fu, Q., Zheng, N., Tian, Z., & Bao, X. (2016). Catalysis with two-dimensional materials and their heterostructures. *Nature nanotechnology*, 11(3), 218-230.
18. Wang, J., Polleux, J., Lim, J., & Dunn, B. (2007). Pseudocapacitive contributions to electrochemical energy storage in TiO₂ (anatase) nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(40), 14925-14931.
19. Bang, J. H., & Suslick, K. S. (2010). Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials. *Advanced materials*, 22(10), 1039-1059.
20. Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature materials*, 6(3), 183-191.
21. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385-388.
22. Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of modern physics*, 81(1), 109.
23. Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano letters*, 8(3), 902-907.
24. Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Advanced materials*, 22(35), 3906-3924.
25. Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical society reviews*, 39(1), 228-240.
26. Pei, S., & Cheng, H. M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210-3228.
27. Wang, X., Li, X., Zhang, L., Yoon, Y., Weber, P. K., Wang, H., ... & Dai, H. (2009). N-doping of graphene through electrothermal reactions with ammonia. *Science*, 324(5928), 768-771.
28. Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature nanotechnology*, 5(7), 487-496.

29. Stoller, M. D., Park, S., Zhu, Y., An, J., & Ruoff, R. S. (2008). Graphene-based ultracapacitors. *Nano letters*, 8(10), 3498-3502.
30. Jiao, Y., Zheng, Y., Jaroniec, M., & Qiao, S. Z. (2015). Design of electrocatalysts for oxygen-and hydrogen-involving energy conversion reactions. *Chemical Society Reviews*, 44(8), 2060-2086.
31. Yang, K., Feng, L., Shi, X., & Liu, Z. (2013). Nano-graphene in biomedicine: theranostic applications. *Chemical Society Reviews*, 42(2), 530-547.
32. Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., ... & Barsoum, M. W. (2011). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Advanced materials*, 23(37), 4248-4253.
33. VahidMohammadi, A., Rosen, J., & Gogotsi, Y. (2021). The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes). *Science*, 372(6547), eabf1581.
34. Barsoum, M. W. (2013). MAX phases: properties of machinable ternary carbides and nitrides. John Wiley & Sons.
35. Khazaei, M., Ranjbar, A., Arai, M., Sasaki, T., & Yunoki, S. (2017). Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(10), 2488-2503.
36. Mathis, T. S., Maleski, K., Goad, A., Sarycheva, A., Anayee, M., Foucher, A. C., ... & Gogotsi, Y. (2021). Modified MAX phase synthesis for environmentally stable and highly conductive Ti_3C_2 MXene. *ACS nano*, 15(4), 6420-6429.
37. Ghidui, M., Lukatskaya, M. R., Zhao, M. Q., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2014). Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance. *Nature*, 516(7529), 78-81.
38. Wyatt, B. C., Rosenkranz, A., & Anasori, B. (2021). 2D MXenes: tunable mechanical and tribological properties. *Advanced Materials*, 33(17), 2007973.
39. Hantanasirisakul, K., & Gogotsi, Y. (2018). Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes). *Advanced materials*, 30(52), 1804779.
40. Samyilingam, I., Kadirgama, K., Samyilingam, L., Ramasamy, D., Ghazali, M. F., Aslfattahi, N., ... & Saidur, R. (2024). Review of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene Nanofluids: Synthesis, Characterization, and Applications. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14189-1413.

41. Lukatskaya, M. R., Kota, S., Lin, Z., Zhao, M. Q., Shpigel, N., Levi, M. D., ... & Gogotsi, Y. (2017). Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides. *Nature Energy*, 2(8), 17105.
42. Mashtalir, O., Naguib, M., Mochalin, V. N., Dall'Agnese, Y., Heon, M., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2013). Intercalation and delamination of layered carbides and carbonitrides. *Nature communications*, 4(1), 1716.
43. Seh, Z. W., Fredrickson, K. D., Anasori, B., Kibsgaard, J., Strickler, A. L., Lukatskaya, M. R., ... & Vojvodic, A. (2016). Two-dimensional molybdenum carbide (MXene) as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution. *ACS Energy Letters*, 1(3), 589-594.
44. Dall'Agnese, Y., Taberna, P. L., Gogotsi, Y., & Simon, P. (2015). Two-dimensional vanadium carbide (MXene) as positive electrode for sodium-ion capacitors. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(12), 2305-2309.
45. Kamysbayev, V., Filatov, A. S., Hu, H., Rui, X., Lagunas, F., Wang, D., ... & Talapin, D. V. (2020). Covalent surface modifications and superconductivity of two-dimensional metal carbide MXenes. *Science*, 369(6506), 979-983.
46. Nemani, S. K., Zhang, B., Wyatt, B. C., Hood, Z. D., Manna, S., Khaledialidusti, R., ... & Anasori, B. (2021). High-entropy 2D carbide MXenes: TiVNbMoC₃ and TiVCrMoC₃. *ACS nano*, 15(8), 12815-12825.
47. Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L. J., Loh, K. P., & Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature chemistry*, 5(4), 263-275.
48. Qian, X., Liu, J., Fu, L., & Li, J. (2014). Quantum spin Hall effect in two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Science*, 346(6215), 1344-1347.
49. Splendiani, A., Sun, L., Zhang, Y., Li, T., Kim, J., Chim, C. Y., ... & Wang, F. (2010). Emerging photoluminescence in monolayer MoS₂. *Nano letters*, 10(4), 1271-1275.
50. Mak, K. F., Lee, C., Hone, J., Shan, J., & Heinz, T. F. (2010). Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor. *Physical review letters*, 105(13), 136805.
51. Hinnemann, B., Moses, P. G., Bonde, J., Jørgensen, K. P., Nielsen, J. H., Horch, S., ... & Nørskov, J. K. (2005). Biomimetic hydrogen evolution: MoS₂ nanoparticles as catalyst for hydrogen evolution. *Journal of the American Chemical Society*, 127(15), 5308-5309.

52. Stephenson, T., Li, Z., Olsen, B., & Mitlin, D. (2014). Lithium ion battery applications of molybdenum disulfide (MoS₂) nanocomposites. *Energy & Environmental Science*, 7(1), 209-231.
53. Zhao, W., Ghorannevis, Z., Chu, L., Toh, M., Kloc, C., Tan, P. H., & Eda, G. (2013). Evolution of electronic structure in atomically thin sheets of WS₂ and WSe₂. *ACS nano*, 7(1), 791-797.
54. Huang, S., Ling, X., Liang, L., Kong, J., Terrones, H., Meunier, V., & Dresselhaus, M. S. (2014). Probing the interlayer coupling of twisted bilayer MoS₂ using photoluminescence spectroscopy. *Nano letters*, 14(10), 5500-5508.
55. Tongay, S., Sahin, H., Ko, C., Luce, A., Fan, W., Liu, K., ... & Wu, J. (2014). Monolayer behaviour in bulk ReS₂ due to electronic and vibrational decoupling. *Nature communications*, 5(1), 3252.
56. Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V., & Kis, A. (2011). Single-layer MoS₂ transistors. *Nature nanotechnology*, 6(3), 147-150.
57. Lopez-Sanchez, O., Lembke, D., Kayci, M., Radenovic, A., & Kis, A. (2013). Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂. *Nature nanotechnology*, 8(7), 497-501.
58. Voiry, D., Salehi, M., Silva, R., Fujita, T., Chen, M., Asefa, T., ... & Chhowalla, M. (2013). Conducting MoS₂ nanosheets as catalysts for hydrogen evolution reaction. *Nano letters*, 13(12), 6222-6227.
59. Simon, P., Gogotsi, Y., & Dunn, B. (2014). Where do batteries end and supercapacitors begin? *Science*, 343(6176), 1210-1211.
60. El-Kady, M. F., & Kaner, R. B. (2013). Scalable fabrication of high-power graphene micro-supercapacitors for flexible and on-chip energy storage. *Nature communications*, 4(1), 1475.
61. Gogotsi, Y., & Penner, R. M. (2018). Energy storage in nanomaterials—capacitive, pseudocapacitive, or battery-like? *ACS nano*, 12(3), 2081-2083.
62. Acerce, M., Voiry, D., & Chhowalla, M. (2015). Metallic 1T phase MoS₂ nanosheets as supercapacitor electrode materials. *Nature nanotechnology*, 10(4), 313-318.
63. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18(5), 252-264.

64. Li, N., Chen, Z., Ren, W., Li, F., & Cheng, H. M. (2012). Flexible graphene-based lithium ion batteries with ultrafast charge and discharge rates. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(43), 17360-17365.
65. Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2017). 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nature Reviews Materials*, 2(2), 1-17.
66. Wang, H., Wu, Y., Yuan, X., Zeng, G., Zhou, J., Wang, X., & Chew, J. W. (2018). Clay-inspired MXene-based electrochemical devices and photo-electrocatalyst: state-of-the-art progresses and challenges. *Advanced Materials*, 30(12), 1704561.
67. Kundu, D., Talaie, E., Duffort, V., & Nazar, L. F. (2015). The emerging chemistry of sodium ion batteries for electrochemical energy storage. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(11), 3431-3448.
68. Zhao, M. Q., Ren, C. E., Ling, Z., Lukatskaya, M. R., Zhang, C., Van Aken, K. L., ... & Gogotsi, Y. (2015). Flexible MXene/carbon nanotube composite paper with high volumetric capacitance. *Advanced Materials*, 27(2), 339-345.
69. Wen, Y., Rufford, T. E., Chen, X., Li, N., Lyu, M., Dai, L., & Wang, L. (2017). Nitrogen-doped graphene and porous carbon derived from cotton for high-performance supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 342, 535-545.
70. Zheng, Y., Jiao, Y., Jaroniec, M., & Qiao, S. Z. (2015). Advancing the electrochemistry of the hydrogen-evolution reaction through combining experiment and theory. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(1), 52-65.
71. Jaramillo, T. F., Jørgensen, K. P., Bonde, J., Nielsen, J. H., Horch, S., & Chorkendorff, I. (2007). Identification of active edge sites for electrochemical H₂ evolution from MoS₂ nanocatalysts. *Science*, 317(5834), 100-102.
72. Gong, K., Du, F., Xia, Z., Durstock, M., & Dai, L. (2009). Nitrogen-doped carbon nanotube arrays with high electrocatalytic activity for oxygen reduction. *Science*, 323(5915), 760-764.
73. Pandey, M., Vojvodic, A., Thygesen, K. S., & Jacobsen, K. W. (2015). Electronic structure and catalytic activity of MXenes for the hydrogen evolution reaction. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(8), 1577-1585.
74. Suen, N. T., Hung, S. F., Quan, Q., Zhang, N., Xu, Y. J., & Chen, H. M. (2017). Electrocatalysis for the oxygen evolution reaction: recent development and future perspectives. *Chemical Society Reviews*, 46(2), 337-365.

75. Gong, M., Li, Y., Wang, H., Liang, Y., Wu, J. Z., Zhou, J., ... & Dai, H. (2013). An advanced Ni-Fe layered double hydroxide electrocatalyst for water oxidation. *Journal of the American Chemical Society*, 135(23), 8452-8455.
76. Zhu, Y. P., Guo, C., Zheng, Y., & Qiao, S. Z. (2017). Surface and interface engineering of noble-metal-free electrocatalysts for efficient energy conversion processes. *Accounts of chemical research*, 50(4), 915-923.
77. Li, Z., Zhuang, Z., Lv, F., Zhu, H., Zhou, L., Luo, M., ... & Mai, L. (2018). The marriage of the FeN₄ moiety and MXene boosts oxygen reduction catalysis: Fe single atom anchored on N-doped Ti₃C₂ as an efficient ORR electrocatalyst. *Advanced materials*, 30(43), 1803220.
78. Qiao, J., Liu, Y., Hong, F., & Zhang, J. (2014). A review of catalysts for the electroreduction of carbon dioxide to produce low-carbon fuels. *Chemical Society Reviews*, 43(2), 631-675.
79. Kumar, B., Llorente, M., Froehlich, J., Dang, T., Sathrum, A., & Kubiak, C. P. (2012). Photochemical and photoelectrochemical reduction of CO₂. *Annual review of physical chemistry*, 63, 541-569.
80. Asadi, M., Kim, K., Liu, C., Addepalli, A. V., Abbasi, P., Yasaei, P., ... & Salehi-Khojin, A. (2016). Nanostructured transition metal dichalcogenide electrocatalysts for CO₂ reduction in ionic liquid. *Science*, 353(6298), 467-470.
81. Handoko, A. D., Fredrickson, K. D., Anasori, B., Convey, K. W., Johnson, L. R., Gogotsi, Y., ... & Vojvodic, A. (2017). Tuning the basal plane functionalization of two-dimensional metal carbides (MXenes) to control hydrogen evolution activity. *ACS applied energy materials*, 1(1), 173-180.
82. Akinwande, D., Petrone, N., & Hone, J. (2014). Two-dimensional flexible nanoelectronics. *Nature communications*, 5(1), 5678.
83. Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J. S., Zheng, Y., ... & Iijima, S. (2010). Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature nanotechnology*, 5(8), 574-578.
84. Iqbal, A., Sambyal, P., & Koo, C. M. (2020). 2D MXenes for electromagnetic shielding: a review. *Advanced functional materials*, 30(47), 2000883.
85. Castellanos-Gomez, A. (2015). Why all the fuss about 2D semiconductors? *Nature Photonics*, 10(4), 202-204.

86. Kang, M. S., Jang, H. J., Jo, H. J., Raja, I. S., & Han, D. W. (2024). MXene and Xene: promising frontier beyond graphene in tissue engineering and regenerative medicine. *Nanoscale Horizons*, 9(1), 93-133.
87. Chung, C., Kim, Y. K., Shin, D., Ryoo, S. R., Hong, B. H., & Min, D. H. (2013). Biomedical applications of graphene and graphene oxide. *Accounts of chemical research*, 46(10), 2211-2224.
88. Han, X., Huang, J., Lin, H., Wang, Z., Li, P., Chen, Y., ... & Huang, Y. (2018). 2D ultrathin MXene-based drug-delivery nanoplatfrom for synergistic photothermal ablation and chemotherapy of cancer. *Advanced healthcare materials*, 7(9), 1701394.
89. Cheng, L., Liu, J., Gu, X., Gong, H., Shi, X., Liu, T., ... & Liu, Z. (2014). PEGylated WS₂ nanosheets as a multifunctional theranostic agent for in vivo dual-modal CT/photoacoustic imaging guided photothermal therapy. *Advanced Materials*, 26(12), 1886-1893.
90. Peng, X., Peng, L., Wu, C., & Xie, Y. (2014). Two dimensional nanomaterials for flexible supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 43(10), 3303-3323.
91. Zhu, J., Yang, D., Yin, Z., Yan, Q., & Zhang, H. (2014). Graphene and graphene-based materials for energy storage applications. *Small*, 10(17), 3480-3498.
92. Ding, L., Wei, Y., Li, L., Zhang, T., Wang, H., Xue, J., ... & Huang, J. (2018). MXene molecular sieving membranes for highly efficient gas separation. *Nature communications*, 9(1), 155.
93. Zhu, M., Huang, Y., Deng, Q., Zhou, J., Pei, Z., Xue, Q., ... & Zhi, C. (2016). Highly flexible, freestanding supercapacitor electrodes with enhanced performance obtained by hybridizing polypyrrole chains with MXene. *Advanced Energy Materials*, 6(21), 1600969.
94. Lin, L., Peng, H., & Liu, Z. (2019). Synthesis challenges for graphene industry. *Nature materials*, 18(6), 520-524.
95. Cai, Z., Liu, B., Zou, X., & Cheng, H. M. (2018). Chemical vapor deposition growth and applications of two-dimensional materials and their heterostructures. *Chemical reviews*, 118(12), 6091-6133.