

ابرخازن‌های پایه مکسن و چشم‌انداز آینده آن


طیبه محبی^۱، مجید میرزایی^{۲*} و مسعود همدانیان^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری گروه شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲. استادیار گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

۳. دانشیار گروه شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

دریافت: مرداد ۱۴۰۲ بازنگری: مهر ۱۴۰۲ پذیرش: مهر ۱۴۰۲

 <https://doi.org/10.30495/JACR1.1403.1044869>

چکیده

مکسن‌ها (MXene) به دلیل ساختار بی‌همتا و گروه‌های عامل شیمیایی قابل تنظیم، یک سری ویژگی شگفت‌انگیز دارند. کاربرد مکسن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی الکتروشیمیایی به‌ویژه نشان‌دادن پتانسیل بالا در کاربردهای ابرخازن توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. در مقایسه با سایر مواد، مکسن‌ها انعطاف مکانیکی بالا، چگالی انرژی بالا و کارایی الکتروشیمیایی خوبی دارند. بنابراین، به ویژه به‌عنوان مواد الکتروود برای ابرخازن‌ها مناسب هستند. با این حال، مشابه سایر مواد دو بعدی، به دلیل نیروهای قوی واندرالس، لایه‌های مکسن به‌ناچار انباشته می‌شوند که منجر به از دست‌دادن شدید مکان‌های فعال الکتروشیمیایی می‌شوند. اگر بتوان تجمع لایه‌های مکسن را به‌طور مؤثری مهار کرد، کارایی الکتروشیمیایی آن‌ها افزایش می‌یابد. بهینه‌سازی ساختاری مکسن‌ها و دوپه‌شدن آن‌ها با مواد دیگر دو راه‌برد مؤثر چشمگیر است. این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در سنتز مکسن، ویژگی اساسی، و مواد چندسازه را با تمرکز بر آخرین کارایی الکتروشیمیایی الکتروودها/دستگاه‌های مبتنی بر مکسن مرور می‌کند و چالش‌ها و فرصت‌های جدیدی را که مکسن در زمینه ذخیره‌سازی انرژی با آن مواجه است، ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: چندسازه، مکسن، ابرخازن

مقدمه

برابر بیشتر از خازن‌های معمولی انرژی ذخیره کنند [۱ و ۲]. به بیان دیگر، این دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی از راه یک سطح ویژه زیاد و واکنش اکسایش-کاهش ظرفیت زیادی تولید

ابرخازن‌ها چگالی انرژی و چگالی توان بالاتری نسبت به سایر ESD^۱ دارند. ابرخازن‌ها قادرند هزاران یا حتی ده‌ها هزار

1. Energy storage devices (ESD)

درصد ظرفیت خود را در دماهای پایین از دست بدهند [۱۰] و [۱۱].

اصول ذخیره‌سازی انرژی ابرخازن

بسته به سازوکار ذخیره انرژی، ابرخازن‌ها به دو گروه ابرخازن لایه دوگانه و شبه‌خازن فارادی تقسیم می‌شوند و به-عنوان یک ESD، میزان ذخیره انرژی آن وابسته به مقدار ظرفیت آن است [۱۲].

(۱) *خازن‌های الکتریکی لایه دوگانه (EDLC):* اصل ذخیره انرژی یک خازن لایه دوگانه این است که انرژی از راه لایه دوگانه تشکیل‌شده در سطح مشترک بین الکتروتود و الکترولیت، با سطح ویژه بالا مواد الکتروتود ذخیره می‌شود. توضیح دقیق این است که وقتی الکتروتود باردار می‌شود، تحت تأثیر نیروهای بین مولکولی، یک لایه دوگانه پایدار از بارهای با علامت مخالف بر سطح تماس الکتروتود و الکترولیت ظاهر می‌شود و به دلیل وجود موانع در سطح مشترک دو لایه، بارها خنثی نمی‌شوند. بنابراین، یک لایه دوگانه بر سطح الکتروتود تشکیل می‌شود که به آن لایه دوگانه فصل مشترک می‌گویند [۱۳].

۲. شبه‌خازن فارادی: برای شبه‌خازن فارادی، بار ذخیره‌شده نه تنها شامل بار ذخیره‌شده در پتانسیل مضاعف است، بلکه بار ذخیره‌شده با یون‌های الکترولیت در ماده فعال از راه واکنش‌های اکسایش-کاهش را نیز در بر می‌گیرد. الکتروتود تحت عمل میدان الکتریکی اعمال‌شده، باردار می‌شود و یون‌های موجود در الکترولیت از محلول به سطح مشترک الکتروتود-محلول حرکت می‌کنند و به دنبال آن یک واکنش الکتروشیمیایی در سطح مشترک انجام می‌شود و سپس بار وارد ماده فعال الکتروتود می‌شود و مقدار زیادی بار در الکتروتود ذخیره می‌شود. در حین بی‌بارشدن، بار ذخیره‌شده به شکل جریان از راه یک مدار خارجی آزاد می‌شود، در حالی که یون‌های الکترولیت که وارد ماده فعال شده‌اند دوباره وارد محلول الکترولیت می‌شوند [۱۴].

می‌کنند [۳ و ۴]. به‌طور ویژه، ابرخازن‌ها دارای ویژگی‌های زیر هستند.

۱. *ظرفیت الکتریکی بسیار بالا:* ابرخازن‌ها ظرفیت بزرگی دارند (۶۰۰۰ فارنهایت)، هزاران بار بزرگتر از خازن‌های تخت با همان حجم [۵].

۲. *توان ویژه بسیار بالا:* توان ویژه ابرخازن‌ها ده‌ها تا صدها برابر بیشتر از باتری‌ها است و می‌توانند جریان‌های بالایی از صدها تا هزاران آمپر را در مدت بسیار کوتاهی آزاد کنند. بنابراین، ابرخازن‌ها نسبت به سایر ESD برای توان خروجی بالا و زمان‌های باردار^۱ بی‌بارشدن^۲ کوتاه مناسب‌تر هستند [۶].

۳. *باردار و بی‌بارشدن بسیار سریع:* دو حالت باردارشدن ابرخازن شامل فرایند فیزیکی (باردار و بی‌بارشدن لایه الکتریکی دوگانه) و فرایند شیمیایی (فرایند الکتروشیمیایی برگشت‌پذیر و سریع الکترودهایی که مواد را روی سطح خود جذب می‌کنند) وجود دارد. با هم‌افزایی این دو فرایند مهندسی، ابرخازن‌ها می‌توانند با چگالی جریان بالا و در مدت بسیار کوتاهی با از دست‌دادن ظرفیت بسیار کم، باردار و بی‌بار شوند [۷].

۴. *عمر مفید بسیار طولانی:* در فرایند باردار و بی‌بارشدن، در یک ابرخازن با یک واکنش الکتروشیمیایی برگشت‌پذیر خوب، به‌راحتی پدیده استحاله ماده فعال رخ نمی‌دهد. بنابراین، عمر یک ابرخازن بسیار طولانی است. از دید نظری، عمر یک ابرخازن می‌تواند بی‌نهایت باشد، ولی در عمل می‌تواند به بیش از ۱۰۰۰۰۰ برابر برسد [۸ و ۹].

۵. *کارایی عالی در دمای پایین:* هنگامی که ابرخازن‌ها کار می‌کنند، بیشتر فرایند انتقال بار بر سطح ماده فعال الکتروتود انجام می‌شود. بنابراین، تحت تأثیر دما قرار نمی‌گیرد. برخلاف باتری‌ها که ظرفیت آن‌ها تحت تأثیر ترمودینامیک الکتروشیمیایی قرار می‌گیرد، باتری‌ها می‌توانند بیش از ۷۰

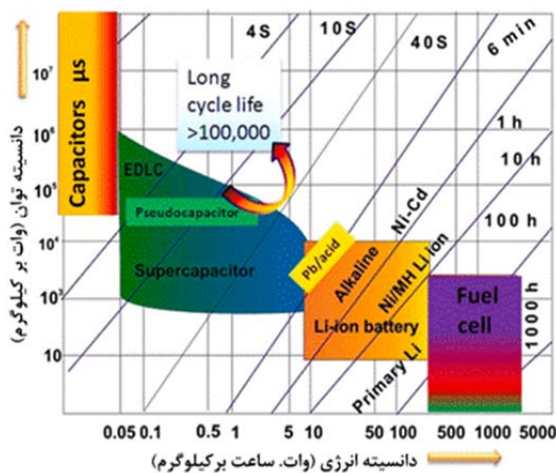
1. Charge

2. Discharge

3. Electric double layer capacitors (EDLC)

گروه‌بندی/ابرخازن‌ها

نمودار راگون نشان می‌دهد که ابرخازن چگالی انرژی بالاتری نسبت به خازن‌های معمولی دارد، ولی بسیار کمتر از باتری و پیل سوختی است (شکل ۱) [۱۷].



شکل ۱ نمودار راگون دستگاه‌های ذخیره انرژی [۱۷]

(دارای مجوز از ناشر مربوط)

ابرخازن چگالی توان بالایی نسبت به باتری و پیل سوختی دارد که آن را به یک نامزد مناسب در کاربردهای متعدد تبدیل می‌کند. لازم است چگالی انرژی ابرخازن را بهبود بخشید تا قابل مقایسه با باتری شود. مشکل چگالی انرژی پایین را می‌توان با افزایش ظرفیت خازن یا ولتاژ سلول برطرف کرد. به عنوان چگالی انرژی به طور مستقیم با ظرفیت خازن و مربع ولتاژ متناسب است ($E = 0.5CV^2$). پنجره با پتانسیل بالا (ولتاژ سلول) و ظرفیت خازنی را می‌توان با انتخاب مواد الکتروکاتود و الکتروانود مناسب بهبود بخشید [۱۸]. ظرفیت ابرخازن نوع EDLC را می‌توان با استفاده از مواد الکتروکاتود کربنی با تخلخل بالا و در نتیجه سطح بزرگتر بهبود بخشید. کارایی شبه‌خازن‌ها را می‌توان با استفاده از رسانایی بالا، نانومعماری سطح بالا و مواد الکتروکاتود حالت چند ظرفیتی بهبود بخشید [۱۹]. در نتیجه، چگالی انرژی ابرخازن هیبریدی را می‌توان با استفاده از چندسازه‌های مناسب به عنوان مواد شبه خازن و مواد EDLC

از آنجایی که معیارهای زیادی برای گروه‌بندی ابرخازن‌ها وجود دارد، این گزارش به طور عمده دو معیار را معرفی می‌کند [۱۵].

۱. با توجه به سازوکارهای ذخیره انرژی متفاوت، ابرخازن‌ها را می‌توان به ابرخازن‌های متقارن، ابرخازن‌های نامتقارن و ابرخازن‌های ترکیبی گروه‌بندی کرد.
 ۲. برپایه الکترولیت‌های متفاوت که می‌توان آن را به طور معمول به الکترولیت آبی و الکترولیت آلی گروه‌بندی کرد. الکترولیت مبتنی بر آب شامل سه نوع است، یکی الکترولیت اسیدی محلول آبی مانند H_2SO_4 که بیشتر از ۳۶ درصد الکترولیت‌ها را شامل می‌شود. دومی یک الکترولیت قلیایی است که به طور معمول از بازهای قوی مانند KOH و NaOH به عنوان الکترولیت و آب به عنوان حلال تشکیل می‌شود و سومی الکترولیت خنثی است که به طور معمول از KCl و NaCl به عنوان الکترولیت و آب به عنوان حلال تهیه می‌شود. الکترولیت‌های آلی به طور معمول از $LiClO_4$ به عنوان نماینده معمولی نمک‌های لیتیم و تترااتیل‌آمونیم تترافلوئوربورات ($TEABF_4$) به عنوان نماینده معمولی نمک‌های آمین چهارتایی و از حلال‌های آلی مانند پلی‌کربنات (PC^2)، استونیتریل (ACN^3)، گاما بوتیرولاکتون (GBL^4)، ترهالاز (THL^5) و غیره به عنوان حلال تهیه می‌شوند که در آن الکترولیت نزدیک به حلالیت سیر در حلال است. نوع دیگر شامل الکترولیت‌های حالت جامد می‌شود که به یک کانون پژوهشی در زمینه الکترولیت‌ها برای ابرخازن‌ها تبدیل شده‌اند، زیرا الکترولیت‌های حالت جامد برای باتری‌های لیتیم یون همچنان در حال گسترش هستند [۱۶].

1. Tetraethylammonium tetrafluoroborate (TEABF)
2. Polycarbonate (PC)
3. Acetonitrile (CAN)
4. Gamma-Butyrolactone (GBL)
5. Trehalase (THL)

به‌طورمستقیم الکتروُد ابرخازن را بدون پیونده^۱، تهیه کنند. با این حال، مکسن‌ها هنوز هم مشکلاتی دارند که باید حل شوند [۲۹]. برای مثال، روش تهیه مکسن نیاز به بهبود دارد، و مکسن‌های سنتی که با حکاکی^۲ با هیدروفلوئوریک اسید (HF) تهیه می‌شوند، دارای تعداد زیادی نقص هستند [۳۰]. از سوی دیگر، مکسن‌ها به‌راحتی در پتانسیل‌های آند بالاتر اکسید می‌شوند و بازده چرخه و طول عمر را کاهش می‌دهند [۳۱]. برای رسیدگی به مشکل‌های فوق، طراحی منطقی و ساخت الکتروُد‌های چندسازه مبتنی بر مکسن یک راه‌برد موثر در نظر گرفته می‌شود.

بهینه‌سازی ساختاری مکسن

مشکل انباشته‌شدن مواد دوبعدی مکسن کارایی الکتروشیمیایی مواد موجود در الکتروُد آن‌ها را تا حد زیادی محدود می‌کند. انتظار می‌رود راهبردهای معمولی مانند درج نانومواد و طراحی ساختار سه‌بعدی، مزایای مواد مکسن را کاهش داده و مزایای الکتروُد‌های آن‌ها را نسبت به سایر الکتروُد‌ها کاهش دهد. تانگ^۳ و همکارانش [۳۲] یک روش جدید اکسایش سولفوریک اسید را برای انباشتن دوباره لایه‌های پیوند مکسن با مقدار کمی از فراورده‌های فعال الکتروشیمیایی با بار منفی پیشنهاد کردند (شکل‌های ۲-الف و ب). مکسن به‌دست‌آمده از مسیر بهینه‌سازی شده ظرفیت خازنی سطحی بسیار بالا و کاربرد عملی زیادی دارد. ژانگ^۴ و همکارانش [۳۳] آئیل در دمای پایین مکسن (زیر ۴۰۰ درجه سلسیوس) را در محیط گاز آرگون برای بهبود ویژگی خازنی ماده مکسن انجام دادند. این شرایط منجر به تشکیل مکان‌های فعال تر C-Ti-O و حفره‌های بین‌لایه‌ای بزرگ‌تر شد. این مکسن می‌تواند انرژی خازنی بالایی (۴۲۹ F/g) را در یک الکتروُد سولفوریک اسید با چگالی انرژی ۲۹,۲ Wh/kg نشان دهد و ظرفیت خازنی را

بهبود بخشید [۲۰]. الکتروُدیت موردنظر با پنجره پتانسیل عملیاتی گسترده‌تر و هدایت یونی بالاتر با گران‌روی مناسب نیز از چگالی انرژی سود می‌برد.

ابرخازن مکسن

امروزه دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESD) نقشی حیاتی در الکترونیک هوشمند، منسوجات پوشیدنی و بازیافت منابع ایفا می‌کنند [۲۱ و ۲۲]. باتری‌های قابل باردارشدن (شامل یون‌های لیتیوم، سدیم، پتاسیم و روی) و ابرخازن‌ها به‌عنوان ESD امیدوارکننده برای توسعه پایدار الکترونیک هوشمند در نظر گرفته می‌شوند. اگرچه باتری‌ها چگالی انرژی بالا دارند، ولی در بیشتر موارد، عمر چرخه و نرخ باردار/بی‌بارشدن آن‌ها ایده‌آل نیست [۲۳ و ۲۴]. در مقابل، ابرخازن‌ها (همچنین، به‌عنوان خازن‌های دو لایه الکتروشیمیایی EDLC شناخته می‌شوند) برای ذخیره بار به جذب/واجذب فیزیکی یون‌ها با مواد کربنی نانومتخلخل متکی هستند [۲۵]. این سازوکار نرخ باردار/بی‌بارشدن بالایی را ایجاد می‌کند (نشان دهنده چگالی توان بالا)، ولی به‌طوراساسی چگالی انرژی قابل دستیابی در ابرخازن‌ها را به‌دلیل ماهیت پیچیده تخلخل در الکتروُد‌ها محدود می‌کند [۲۶]. نیاز زیادی برای یافتن نانومواد جدیدی وجود دارد که بتوانند سازوکارهای ذخیره بار متفاوتی را برای ابرخازن‌ها فراهم کنند. مکسن از n+1 لایه از فلزهای واسطه اولیه (M) با n لایه کربن یا نیتروژن (X) درهم‌تنیده و با فرمول کلی $M_n + 1X_nT_x$ است که در آن T_x عامل حکاکی است [۲۷]. گروه‌های عامل سطحی، مانند -OH، -F، -O و غیره، به‌طوربنیادی می‌توانند تعداد زیادی مکان فعال با قابلیت زیاد برای اصلاح سطح و بارگذاری کارآمد مواد فعال، فراهم کنند [۲۸]. با بهره‌گیری از شیمی سطح غنی و ترکیب قابل‌تنظیم مکسن، این ترکیب‌های دوبعدی رسانندگی الکتریکی عالی، آب‌دوستی، ویژگی یونی بین‌لایه‌ای، استحکام مکانیکی بالا و ظرفیت ویژه حجمی عالی دارند که می‌توانند

1. Binder

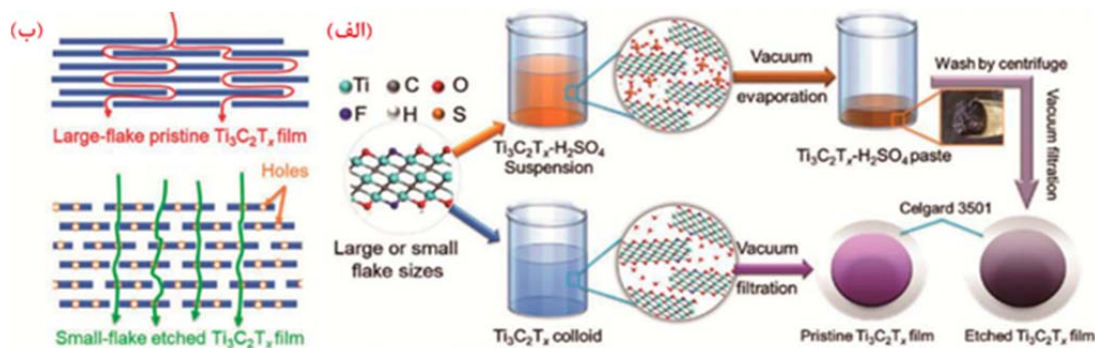
2. Etching

3. Tang

4. Zhang

مگاپاسکال) را بدون کاهش انعطاف‌پذیری و ظرفیت خازنی خوب (۱۹۰ F/g) در ۱۹۰ F/g در ۱ mol/l H₂SO₄ با سرعت اسکن ۱۰mV/s) و حفظ ظرفیت خازنی بالا (۸۷/۴ درصد پس از ۵۰۰۰ چرخه)، نشان می‌دهد.

پس از ۵۰۰۰ چرخه در ۸۹ درصد حفظ کند. کای و همکارانش [۳۴]، با الهام از ساختار ملات و آجر لایه مروارید، یک لایه مروارید مکسن مستقل را از راه یک ستون لایه‌به‌لایه ایجاد کردند. «لایه مروارید» مکسن استحکام مکانیکی عالی (۷۸/۳



شکل ۲ طرحواره‌ای از فرایند حکاکی نانوصفحه‌های Ti₃C₂T_x و ساختار سلسله مراتبی نانومتخلخل به‌دست آمده (الف) و طرحواره‌ای از بهینه‌سازی مسیر یونی در فیلم S-Etched Ti₃C₂T_x در مقایسه با فیلم L [۳۲] (ب) (دارای مجوز از ناشر مربوط)

شد که هیدرونیوم موجود در H₂SO₄ با اتم‌های اکسیژن موجود در سطح Ti₃C₂T_x، هنگام باردارایی بارشدن شبه‌خازن، در الکترولیت اسیدی پیوند برقرار می‌کند. این روند در مورد (NH₄)₂SO₄ و MgSO₄ EDLC نیز مشاهده شده است. Ti₃C₂T_x بارگذاری شده بر پارچه کربن مشتق از ابریشم به- عنوان یک ماده الکتروود برای ساخت ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر استفاده شده است. ظرفیت منطقه‌ای mFcm⁻² ۳۶۲ با انعطاف‌پذیری عالی، پایداری چرخه‌ای را نشان داد [۳۷]. ابرخازن‌های مبتنی بر مکسن همگی نشان داده‌اند که به‌دلیل قوی بودن پیوند M-X و ظرفیت ویژه برتر، پایداری چرخه‌ای عالی دارند. دالانجیس^۳ و همکارانش [۳۷] اثر سطوح اصلاح- شده شیمیایی مکسن Ti₃C₂T_x با DMSO را گزارش کرد. پایانه‌های اکسیژن بر سطوح، به بهبود ظرفیت ویژه این مواد کمک می‌کند. Ti₃C₂T_x در الکترولیت اسیدی H₂SO₄، ظرفیت ۴۱۵ Fcm⁻³ را در ۵ Ag⁻¹ نشان داد، بدون اینکه

لوکاتسکایا^۱ و همکارانش [۳۵] اثر بین‌لایه‌ای کردن الکتروشیمیایی کاتیون‌هایی مانند Na⁺، K⁺، NH₄⁺، Mg²⁺ و Al³⁺ را بر قابلیت‌های ذخیره‌سازی مکسن Ti₃C₂، گزارش کرد. این مکسن در محلول‌های نمکی آبی متفاوت قرار داده شد تا کاتیون‌ها به‌صورت خودبه‌خودی در هم قرار بگیرند. با چنین فرایندی، الکتروود Ti₃C₂ افزایش ظرفیتی در حدود ۳۰۰ Fcm⁻³ را نشان داد. مقدرهای به‌دست‌آمده بیشتر از مواد کربن متخلخل بود. این نتیجه‌ها پژوهشگران را قادر می‌سازد تا استفاده از مکسن را در ابرخازن‌ها متمرکز کنند. پژوهش‌های گسترده انجام‌شده تا به امروز، نشان داده شده که مکسن Ti₃C₂ ماهیت شبه‌خازنی دارد. هو^۲ و همکارانش [۳۶] سازوکار پایه‌ای را در Ti₃C₂T_x با الکترولیت‌های اسیدی گزارش کرد. با کمک طیف‌سنجی رامان درجا، فرایندهای باردارایی بارشدن در الکتروودهای Ti₃C₂T_x در الکترولیت‌های حاوی یون سولفات متفاوت (H₂SO₄، (NH₄)₂SO₄ و MgSO₄) مطالعه و مشاهده

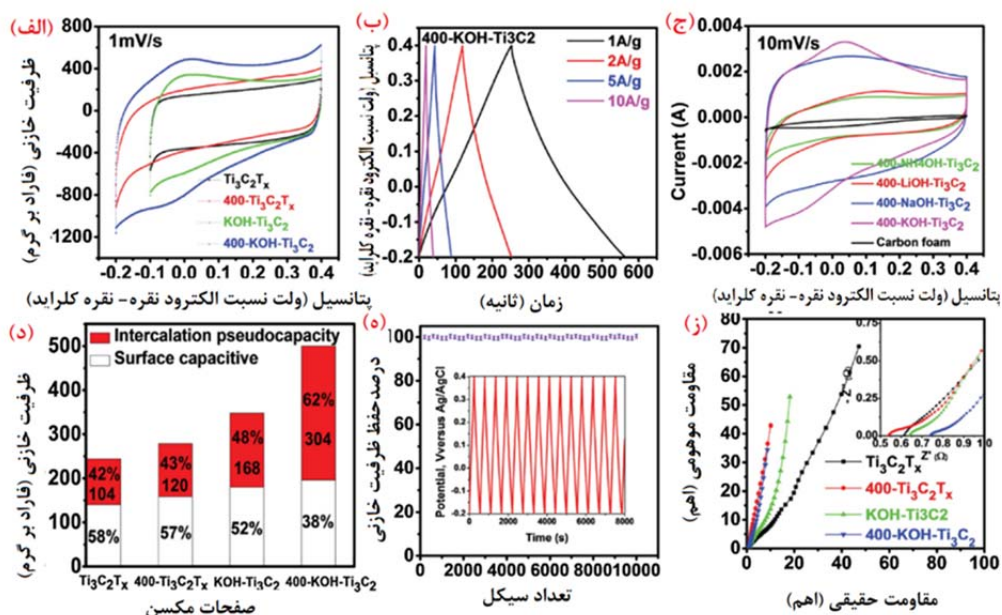
1. Lukatskaya

2. Hu

3. Dall'Agnese

گروه‌های عاملی خاتمه یافته با F- با گروه‌های OH- انتخاب شد. مگسن با نمک پایه در دماهای بالاتر کلسینه شد تا پایانه‌های سطحی را تغییر دهد و کاتیون‌های K⁺ را در آن بگنجانند. پارامتر شبکه در چنین حالتی افزایش و در نتیجه فاصله بین لایه‌ها افزایش یافت. ظرفیت ثقلی ۵۱۷ Fg⁻¹ با نرخ تخلیه ۱ Ag⁻¹ با ظرفیت نگهداری حدود ۹۹ درصد پس از ۱۰۰۰۰ چرخه به‌دست آمد. کارایی الکتروشیمیایی اصلاح‌شده سطحی و مسکن Ti₃C₂ با کاتیون مربوط در شکل ۳ نشان داده شده است.

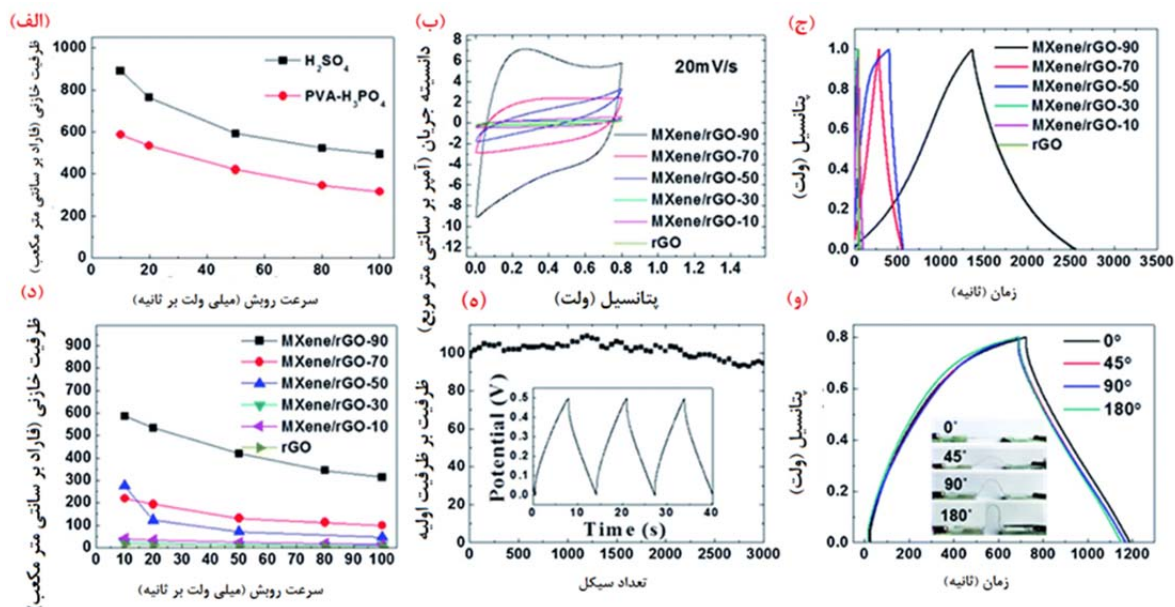
تخریب چشمگیری تا ۱۰۰۰۰ چرخه اتفاق بیفتد. لی و همکارانش [۳۸] ظرفیت گرانشی Ti₃C₂T_x بهبودیافته در مقایسه با مقدار گزارش شده پیشین آن (۲۴۵ Fg⁻¹) را گزارش کرد. با اصلاح سطح مگسن با کاتیون‌هایی مانند K⁺، چگالی بالاتر ۲۷/۴ WhKg⁻¹ را می‌توان به‌دست آورد و آن‌ها را مناسب‌ترین نامزد برای الکترودهای ابرخازن کرد. پودر Ti₃AlC₂ در محلول‌های HF حکاکی شدند تا Al تشکیل‌دهنده Ti₃C₂ را حذف کنند. در نتیجه حکاکی، گروه‌های OH- و F- بر سطوح مگسن ایجاد می‌شود. پیوند Ti-F در محلول‌های بازی ناپایدار است. بنابراین، KOH برای جایگزینی



شکل ۳ کارایی الکتروشیمیایی مگسن و الکترودهای مگسن اصلاح‌شده سطحی در سامانه سه الکترودی [۳۸] (دارای مجوز از ناشر مربوط) (نمودارهای ولت‌آمپرسنجی در ۱ mVs⁻¹ برای الکترودهای متفاوت مبتنی بر مگسن در H₂SO₄ یک مولار (الف)، منحنی‌های باردارایی بارشدن گالوانوستاتیک برای ورق‌های ۴۰۰-KOH-Ti₃C₂ مگسن در چگالی جریان ۱، ۲، ۵ و ۱۰ Ag⁻¹ (ب)، نمودارهای ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای در ۱۰ mV s⁻¹ برای دیگر ورق‌های مگسن بین لایه‌های شده کاتیونی با کمترین گروه‌های پایانه سطحی (ج)، مقایسه ظرفیت خازنی برای صفحه‌های مگسن (در نرخ روبش ۱ mV s⁻¹) (ظرفیت کل به شبه‌ظرفیت بین لایه‌ای و سهم خازنی سطحی تقسیم می‌شود (اعداد داخلی ۱۰۴، ۱۲۰، ۱۶۸، ۱۰۴ و ۳۰۴ به بخشی از شبه‌ظرفیت بین لایه‌ای اشاره دارند) (د)، آزمون حفظ خازنی الکترودی ۴۰۰-KOH-Ti₃C₂ در H₂SO₄ یک مولار (خطوط آبی نوار خطا بودند) (همچنین، داده‌های چرخه گالوانوستاتیک جمع‌آوری شده در ۱ Ag⁻¹ نشان داده شده است) (ه) و داده‌های طیف‌سنجی رهنبدی الکتروشیمیایی الکترودهای متفاوت مبتنی بر مگسن (همچنین، ناحیه فرکانس بالا بزرگنمایی شده است) (و))

دستگاه دو الکترودی مونتاژ شده بررسی شد. با سولفوریک اسید یک مولار به عنوان یک الکترولیت، ظرفیت ویژه 89.07 Fcm^{-3} در 10 mV/s به دست آمد. ابرخازن انعطاف پذیر با یک الکترولیت حالت جامد ژل $\text{PVA}/\text{H}_3\text{PO}_4$ ساخته شد و ظرفیت برابر با 58.64 Fcm^{-3} در 10 mV/s از خود نشان داد. افزون بر این، جذب سطحی دو لایه الکتريکی به دلیل لایه‌های GO اتفاق می افتد، و اتم‌های تیتانیوم در واکنش‌های اکسایش و کاهش شرکت می کنند که موجب ایجاد شبه‌خازن می شود. از این رو، این چندسازه‌ها رفتار الکتروشیمیایی بهبود یافته‌ای را نشان می دهند که در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۹].

برای تقویت بیشتر ویژگی نشان داده شده با مکسن‌ها و بهبود ویژگی خازنی آن‌ها، مکسن‌ها با مواد متفاوت دیگر مانند اکسیدهای فلزی، مواد کربنی و بسپارها به صورت چندسازه ساخته شدند. ژو و همکارانش سنتز الیاف مکسن/گرافن را با استفاده از اثر هم‌افزایی موجود بین بلورهای مایع گرافن اکسیدها و ورقه‌های مکسن گزارش کرد. مخلوط $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{GO}$ از یک نازل به حمام حاوی آب یون زدوده و ۵ درصد وزنی CaCl_2 تزریق شد. با توجه به نیروی کولمبی که ورق‌های مکسن منفی و لایه‌های GO را به هم پیوند می دهد، الیاف MXene/GO به دست آمد و ویژگی الکتروشیمیایی آن در یک



شکل ۴ مقایسه ظرفیت‌های حجمی FSC های مبتنی بر فیبر MXene/rGO-90 در الکترولیت‌های H_2SO_4 یک مولار و $\text{PVA}-\text{H}_3\text{PO}_4$ جامد در سرعت‌های روبش متفاوت (الف)، منحنی‌های CV در 20 mV s^{-1} (ب)، منحنی‌های GCP در 0.2 mA cm^{-2} (ج)، ظرفیت‌های حجمی در نرخ‌های متفاوت اسکن FSC های حالت جامد MXene/rGO ساخته شده با مقدار مکسن متفاوت (۰، ۱۰، ۵۰، ۷۰، و ۹۰ درصد وزنی) (د)، پایداری چرخه‌ای (در 2 mA cm^{-2}) FSC های مبتنی بر فیبر MXene/rGO-90 حالت جامد (ه) و ویژگی خمشی FSC های مبتنی بر حالت جامد MXene/rGO-77 (و) در زوایای خمشی متفاوت (و) [۳۹] (دارای مجوز از ناشر مربوط)

فعال است در حالی که پلاتین یک الکتروکاتالیزور شماره شده است. برای بهبود چگالی انرژی دستگاه ساده، هر دو الکتروکاتالیزور را می‌توان با مواد فعال ساخت. بسته به استفاده از الکتروکاتالیزور شماره شده، می‌توان آن را به ابرخازن متقارن یا نامتقارن گروه‌بندی کرد. در ابرخازن نامتقارن، از الکترودهایی با مواد متفاوت برای تقویت پنجره پتانسیل کلی استفاده می‌شود. اگرچه برای ساخت دستگاه نامتقارن به یک الکتروکاتالیزور شماره شده مناسب نیاز است. از سوی دیگر، در ابرخازن متقارن، هر دو الکتروکاتالیزور با مواد فعال مشابهی ساخته می‌شوند. کارایی الکتروشیمیایی الکتروکاتالیزور در الکتروکاتالیزور می‌تواند با روش‌های دو و سه الکتروکاتالیزور اندازه‌گیری کرد. سامانه دو الکتروکاتالیزور که از آند و کاتد ساخته شده است بیشتر در دستگاه‌های مبتنی بر الکتروکاتالیزور جامد و سلول‌های سکه‌ای استفاده می‌شود.

ابرخازن‌های متقارن

سان^۳ ([۴۲]) نانوصفحه‌های لایه‌لایه مکسن را روی زیرلایه کبالت نیکل سولفید/پارچه کربن (CC) با پاشیدن مکسن بر سطح نیکل کبالت سولفید تهیه کردند. نانوصفحه‌ها نه تنها ظرفیت ویژه عالی در چگالی جریان بالا به دست آوردند، بلکه پایداری چرخه‌ای بهتری نیز داشتند. الکترودها برای دستیابی به بیشینه ظرفیت ویژه ۲۳۲۶ F/g در چگالی جریان ۱ A/g و پایداری چرخه‌ای ۹۳/۸ درصد در چگالی جریان ۱۰ A/g بهینه شدند. نتیجه‌ها نشان دادند که پوشش سطحی مناسب مکسن می‌تواند به‌طور همزمان رسانندگی و نفوذ یون کبالت نیکل سولفید را بهبود بخشد که منجر به کارایی الکتروشیمیایی عالی می‌شود. بنابراین، ویژگی الکتروشیمیایی عالی این الکتروکاتالیزور هیبریدی، آن را به یک گزینه برجسته برای ESD انعطاف‌پذیر با کارایی بالا تبدیل می‌کند. بسیاری دیگر از افزودنی‌های امیدوارکننده‌ای هستند که می‌توان آن‌ها را با PEDOT^۴ ترکیب کرد تا ویژگی مکانیکی مواد، به‌ویژه بسپارهای رسانا را

در کار وانگ^۱ و همکارانش به‌کارگیری روش لایه‌برداری فاز مایع برای رشد یک لایه سه بعدی از پلاکت‌های هیدروکسید لایه دوگانه نیکل-آلومینیم (LDH) روی مکسن Ti_3C_2 گزارش شده است. شبکه سه بعدی LDH به ایجاد یک مسیر سریع برای حرکت یون و فراهم کردن سطح وسیعی برای واکنش‌های اکسایش و کاهش کمک می‌کند. بستر مکسن رسانا به بهبود رسانندگی الکتروکاتالیزور کمک می‌کند. چندسازه مکسن/LDH ظرفیت خاصی برابر با 1061 Fg^{-1} در چگالی جریان 1 Ag^{-1} با حفظ ظرفیت حدود ۷۰ درصد پس از ۴۰۰۰ چرخه از خود نشان می‌دهد. [۴۰]. ون^۲ و همکارانش افزایش پارامتر شبکه C بین صفحه‌های مکسن $Ti_3C_2T_x$ را از ۱/۹۲ به ۲/۴۶ نانومتر با معرفی اتم ناهمگون نیتروژن در ساختار مکسن گزارش کرد. مکسن‌ها در گاز آمونیاک در دماهای متفاوت ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت در یک کوره لوله‌ای گرمادهی شدند. اتم‌های N جایگزین اتم‌های C در $Ti_3C_2T_x$ شدند و در نتیجه فاصله لایه‌ها در مکسن‌ها افزایش یافت. مکسن‌های $N-Ti_3C_2T_x$ در مقایسه با $Ti_3C_2T_x$ حدود ۴۶ درصد افزایش در ظرفیت گرانشی خود داشتند. الکترودهای چندسازه ظرفیت ویژه‌ای معادل 1 Fg^{-1} در ۱۹۲ H_2SO_4 یک مولار و 1 Fg^{-1} در الکتروکاتالیزور $MgSO_4$ یک مولار نشان دادند [۴۱].

چندسازه‌های مبتنی بر مکسن برای ابرخازن‌ها

در ابرخازن هیبریدی، هر دو سازوکار، EDLC و واکنش‌های اکسایش و کاهش فارادیک، رخ می‌دهند که منجر به بهبود دو برابری ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. ظرفیت ویژه بالای ابرخازن هیبریدی به‌طور عمده به شبه‌خازن نسبت داده می‌شود. با این وجود، پایداری چگالی توان مرتبط با مواد EDLC است. سه راهبرد ساده، متقارن، و نامتقارن برای ساخت ابرخازن وجود دارد. در یک ابرخازن ساده، الکتروکاتالیزور کار یک ماده

1. Wang

2. Wen

3. Sun

4. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)

دادند و از آن‌ها به‌عنوان مواد شبه‌خازنی برای ابرخازن‌ها استفاده کردند. توزیع یکنواخت ذره‌های اکسید فلز بر نانوصفحه‌های مکسن ماده شبه‌خازن را قادر می‌سازد تا مکان‌های فعال‌تری داشته باشد و اثر هم‌افزایی بین اکسید کبالت و اکسید نیکل کارایی الکتروشیمیایی را تا حد زیادی بهبود بخشد. با استفاده از تعداد دفعاتی که اکسید فلز به‌عنوان یک عامل متغیر رسوب داده شد، این ماده ظرفیت الکتروشیمیایی بهینه 196.0 F/g را با چگالی جریان 1 A/g نشان داد که همچنان پس از 8000 چرخه، 90.2 درصد ظرفیت خازنی را پس از آن حفظ کرد که پایداری عالی چرخه‌ای بالایی را نشان می‌دهد. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ به‌عنوان نوعی از خانواده مکسن، دارای رسانندگی الکتریکی بسیار بالا، انعطاف‌پذیری خوب و فعالیت الکتروشیمیایی بالا است، ولی مشکل اجتناب‌ناپذیر خود انباشتگی فیلم $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ به‌طور جدی ناحیه خاصی از فیلم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مانع از انتقال یون در فیلم می‌شود.

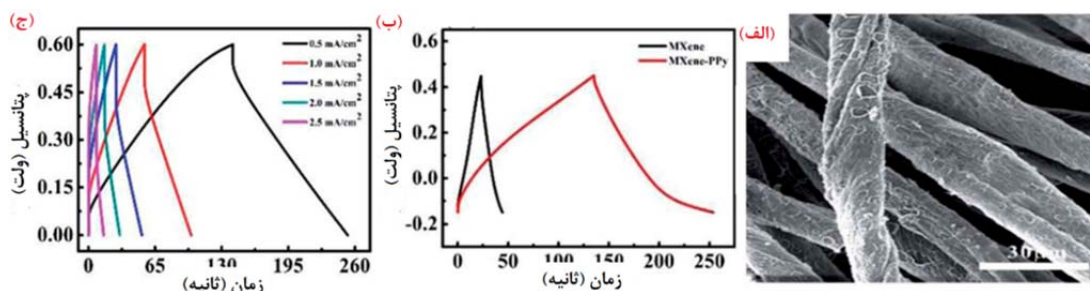
ابرخازن‌های نامتقارن

لیانگ^۴ و همکارانش [۴۶] ابرخازن‌های نامتقارن را با پوشش‌دهی مواد مکسن روی CNTها به‌عنوان الکتروود منفی و پلی‌برن روی CNT به‌عنوان الکتروود مثبت، مونتاژ و در نتیجه دستگاه‌هایی با ولتاژ تا $1/6$ ولت تولید کردند. کارایی خوب مواد در جرم‌های فعال بالا با کاربرد چند منظوره مرتبط بود. اصلاح سطح مکسن نیز توسط ما^۵ و همکارانش [۴۷] در پاسخ به مشکل انباشتگی صفحه‌ها انجام شد. ساختار P-P لیگنوسولفونات یک فعالیت شیمیایی قوی و پتانسیل مثبت موضعی را به گروه‌های کربونیل α و β می‌دهد که می‌تواند سطح مکسن را اصلاح و از مشکل انباشتگی مکسن جلوگیری کند. براین‌پایه، مکسن اصلاح‌شده با لیگنوسولفونات، ساختار آروژل‌های متخلخل گرافن اکسید سه بعدی را احیا کرد، که ویژگی الکتروشیمیایی عالی و سبک وزن را نشان دادند. چگالی

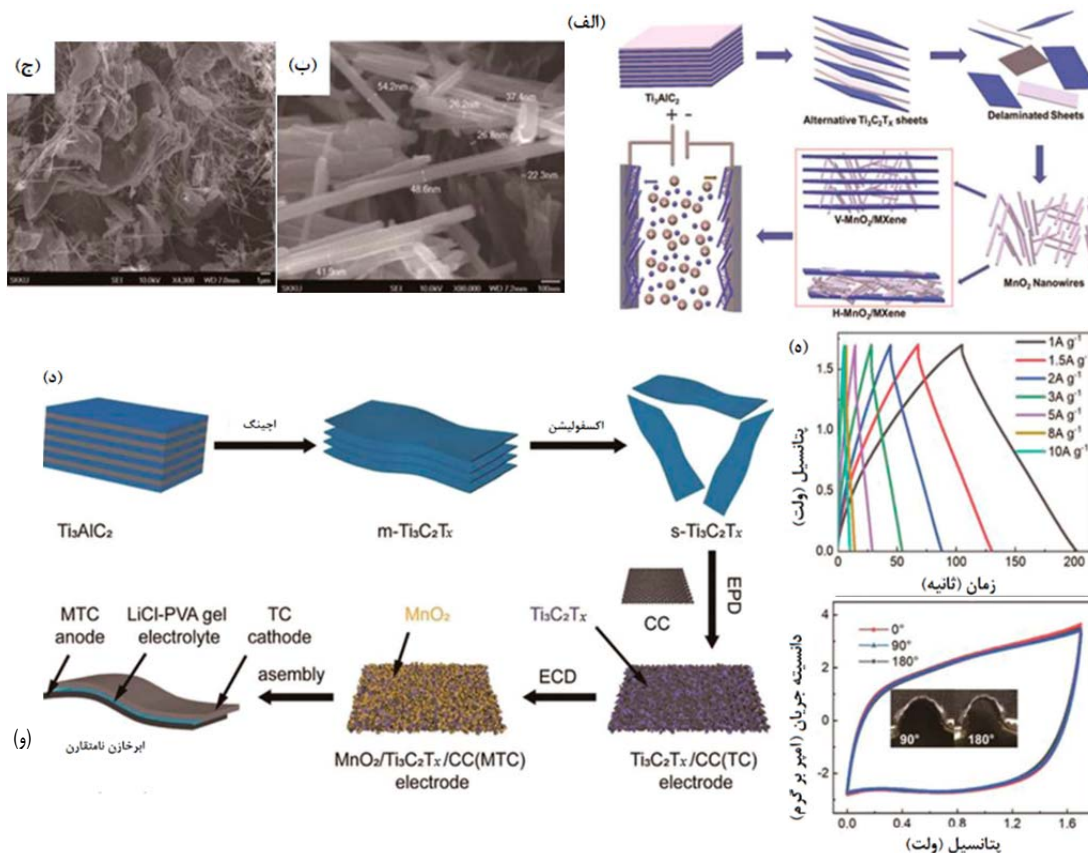
بهبود بخشد که می‌تواند استحکام مکانیکی را بدون کاهش رسانندگی بهینه کند. لیو^۱ و همکارانش [۴۳] با بارگذاری تعداد زیادی ذره‌های PEDOT در مقیاس نانو بر سطح $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ از راه اکسایش شیمیایی، چندسازه‌های $\text{PEDOT-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ را با ویژگی الکتریکی بهبودیافته برای استفاده به‌عنوان مواد الکتروود ابرخازن با موفقیت آماده کردند. در مقایسه با $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ خالص، $\text{PEDOT-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ کارایی خازنی و پایداری الکتروشیمیایی را بهبود بخشید. یکی از چندسازه‌های $\text{PEDOT-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ بیشینه مقدار ظرفیت خازنی 564 F/g را در چگالی جریان 1 A/g و حفظ ظرفیت $96/5$ درصد پس از 10000 چرخه باردار/بی‌بار شدن نشان داد که این ظرفیت بهبودیافته به اثر هم‌افزایی بین PEDOT و $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ نسبت داده می‌شود. PEDOT با رسانندگی بالا می‌تواند رسانندگی بین‌لایه‌ای و انتقال بار $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ را بهبود بخشد، و به‌طور مؤثری از کاهش فاصله لایه‌های چند لایه $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ جلوگیری کند، جایی که گوگرد موجود در PEDOT می‌تواند آب دوستی و نرخ تبادل یونی چندسازه را بیشتر بهبود بخشد. یان^۲ [۴۴] فیلم مکسن $\text{PPy-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (شکل ۵-الف) را با رسوب الکتروشیمیایی PPy و مکسن $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ بر سطح پارچه تهیه و خازن‌های انعطاف‌پذیر تمام حالت جامد را مونتاژ کردند که ویژگی الکتروشیمیایی خوبی از خود نشان دادند (شکل‌های ۵-ب و ج). در سال‌های اخیر، اکسیدهای کبالت و نیکل به دلیل در دسترس بودن، هزینه کم، سمیت کم و نسبت نظری ظرفیت بالا به مواد شبه‌خازنی معمولی تبدیل شده‌اند. اکسیدهای دو فلزی نیکل کبالت به دلیل افزایش انتقال بار و واکنش‌های اکسایش و کاهش سطحی که موجب افزایش ظرفیت ویژه آن‌ها می‌شود، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. ژانگ^۳ و همکارانش [۴۵] با موفقیت اکسیدهای دو فلزی کبالت نیکل را با روش‌های رسوب لایه اتمی بر نانولایه‌های مکسن رسوب

است. ظرفیت ویژه محاسبه شده چندسازه $\text{MnO}_2/\text{MXene}$ حدود $489/5 \text{ C/g}$ در 1 F/g بود. ماده الکتروکود سنتز شده از چندسازه (شکل ۶-د)، حفظ ظرفیت خازنی بسیار خوبی را در حدود ۹۶ درصد در ۱۰۰۰ چرخه نشان داد. ظرفیت ویژه چند سازه $\text{MnO}_2/\text{MXene}$ حدود $489/5 \text{ C/g}$ در 1 A/g بود (شکل ۶-ه). چن و همکارانش [۴۹] از رسوب الکتروشیمیایی MnO_2 و مکسن روی CC فعال شده برای سنتز الکترودهای چندسازه $\text{MnO}_2/\text{MXene}/\text{CC}$ استفاده کردند (شکل ۶-و). با بهره‌گیری از رسانندگی الکتریکی عالی مکسن و ویژگی شبه‌خازنی عالی MnO_2 ، الکتروکود چندسازه آماده شده می‌تواند ظرفیت ویژه بالایی ($411/5 \text{ F/g}$) در چگالی جریان 1 A/g به‌دست آورد. چندسازه $\text{MnO}_2/\text{MXene}/\text{CC}$ به عنوان الکتروکود مثبت و چندسازه MXene/CC به‌عنوان الکتروکود منفی برای مونتاژ موفقیت‌آمیز یک ابرخازن نامتقارن انعطاف‌پذیر حالت جامد استفاده شد (شکل ۶-و). ابرخازن مونتاژ شده می‌تواند به ولتاژ $1/7$ ولت، چگالی توان 850 W/kg و چگالی انرژی 1 Wh/kg $24/3$ برسد که سهم زیادی در تهیه الکترودهای چندسازه‌ای دارد.

انرژی این ابرخازن نامتقارن 142 Wh/m^2 در چگالی توان $10000 \mu\text{W/cm}^2$ و حفظ ظرفیت ۹۶/۳ درصد پس از ۱۰۰۰۰ چرخه باردار/بی‌بار شدن بود. ویژگی شبه‌خازن لیگنوسولفونات‌ها بر الکترودهای مثبت و منفی ابرخازن نامتقارن اکسیدهای فلزهای واسطه به دلیل ویژگی شبه خازنی عالی می‌تواند در الکترودهای ابرخازن استفاده شوند، ولی رسانندگی الکتریکی ضعیف آن‌ها مانع از مطالعه خازن ویژه بالا شده است. در سال ۲۰۲۱، محمود و همکارانش [۴۸] یک چندسازه جدید (مکسن MnO_2) برای چیرگی بر مشکل انباشته‌شدن مکسن و رسانندگی ضعیف اکسید فلز با معرفی نانوسیم‌های MnO_2 با ضخامت کمتر از ۵۰ نانومتر (NWR) در داخل مکسن گزارش کردند (شکل‌های ۶-الف تا ج). در این حالت مساحت سطح خازن‌ها نیز افزایش یافت و مقایسه نمودارهای الکتروشیمیایی (F/g) MnO_2 (۵۲۷/۸) مکسن، MnO_2 ($337/5 \text{ F/g}$) و MnO_2 (NWR)/MXene نشان می‌دهد که چندسازه MnO_2 (NWR)/MXene (شکل ۶-ب) بهترین انتخاب برای الکترودهای ابرخازن است که ظرفیت چندسازه $\text{MnO}_2/\text{MXene}$ (شکل ۶-ج) حدود $611/5 \text{ F/g}$ مشاهده شده



شکل ۵ تصویر SEM پارچه با پوشش PPy-MXene (الف) مقایسه منحنی‌های GCD بین الکترودهای با پوشش MXene و PPy-MXene تحت چگالی جریان 2 mA/cm^2 (ب) و منحنی‌های GCD الکترودهای با پوشش PPy-MXene در چگالی‌های جریان متفاوت (ج) [۴۶] (دارای مجوز از ناشر مربوط)



شکل ۶ طرحواره سنتز مواد و کاربرد آن‌ها در SCها (الف)، نانوسیم‌های زیر ۵۰ نانومتری MnO_2 (ب)، تکه‌های MXene که با نانوسیم‌های MnO_2 ترکیب شده‌اند [۴۸] (ج)، طرحواره فرایند آماده‌سازی ابرخازن نامتقارن (د)، منحنی‌های GCD دستگاه در چگالی جریان‌های متفاوت (ه)، طرحواره و منحنی‌های CV دستگاه انعطاف‌پذیر در زوایای خمش صفر، ۹۰ و ۱۸۰ درجه با سرعت رویش ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه [۴۹] (و) (دارای مجوز از ناشران مربوط)

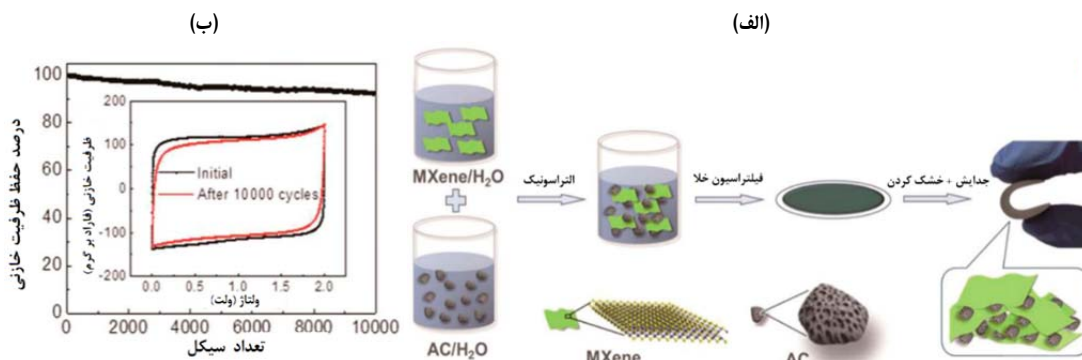
لحاظ الکتروشیمیایی فعال در یک فرایند یک مرحله‌ای گزارش کرد (شکل ۷-الف). در این الکتروُد، ذره‌های کربن فعال بین لایه‌های مکسن بدون نیاز به پیونده بسیار عایق محصور می‌شوند. مکسن نقش چندمنظوره را در الکتروُد ایفا می‌کند که برای مثال، می‌توان به‌عنوان یک اتصال‌دهنده، زیرلایه انعطاف‌پذیر، افزودنی رسانا و مواد فعال اضافی، اشاره کرد. اثر هم‌افزایی مکسن و کربن فعال یک شبکه رسانای سه بعدی را تشکیل می‌دهد که فاصله لایه مکسن را افزایش می‌دهد و ظرفیت خازنی الکتروُد و ظرفیت چندگانه را تا حد زیادی بهبود

ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر

تهیه مواد الکتروُد فعال برای SCهای منعطف با به‌کارگیری مواد مکسن به‌عنوان زیرلایه به یک موضوع پژوهشی داغ در سال‌های اخیر تبدیل شده است. یو^۱ و همکارانش [۵۰] برای تهیه کربن فعال متصل به مکسن به‌عنوان یک الکتروُد انعطاف‌پذیر برای ابرخازن‌ها در الکترولیت‌های آلی، راه‌بردی برای استفاده از مکسن $Ti_3C_2T_x$ دو بعدی به‌عنوان یک اتصال‌دهنده انعطاف‌پذیر، رسانا و به

دسترسی یونی را فراهم می‌کند و انتقال سریع یون را تسهیل می‌کند. فیلم MXene-rGO-20 با ۲۰ درصد rGO دارای ظرفیت 329.9 F/g در 5 mV/s در الکترولیت H_2SO_4 (۳ مول در لیتر) و 260.1 F/g در 1000 mV/s است و انعطاف‌پذیری خوبی دارد. افزون‌براین، ظرفیت اولیه پس از ۴۰۰۰۰ چرخه در 100 A/g در بالای ۹۰ درصد باقی ماند که پایداری چرخه‌ای خوبی را نشان می‌دهد. این مطالعه نه تنها الکترودهای انعطاف‌پذیر با کارایی بالا را برای SCها فراهم می‌کند، بلکه یک روش کاهش خودانتشار به‌عنوان یک راهبرد کارآمد با صرفه‌جویی در زمان برای ساخت سازه‌های سه بعدی با استفاده از مواد دو بعدی ارائه می‌دهد.

می‌بخشد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت ویژه الکتروود کربن فعال انعطاف‌پذیر متصل به مکسن تا 126 F/g در الکترولیت‌های آلی 0.1 و 100 A/g ، با نرخ ماندگاری 57.9 درصد در 100 A/g در الکترولیت آلی است (شکل ۷-ب) که برای توسعه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر با کارایی بالا ضروری است. میائو و همکارانش [۵۱] با وارد کردن GO به فیلم مکسن و سپس کاهش خودانتشار، یک فیلم متخلخل سه بعدی مکسن منعطف تهیه کردند. فرایند خودانتشار ساده و موثر است و تنها $1/25$ ثانیه طول می‌کشد تا یک اسکلت متخلخل سه بعدی را از راه آزاد شدن آنی گازهای ثانویه تشکیل دهد. فیلم‌های MXene-rGO ویژگی خازنی عالی را نشان می‌دهند زیرا ساختار متخلخل سه بعدی تعداد زیادی از مراکز فعال قابل



شکل ۷ طرحواره ساخت فیلم‌های MXene اتصال یافته به AC (مخلوط کردن تکه‌های MXene و ذره‌های AC در آب، صافش با کمک خلاء، لایه برداری و خشک کردن) (الف) و کارایی چرخه‌ای در 100 A/g [۵۱] (ب) (دارای مجوز از ناشران مربوط)

طراحی، مقرون به صرفه و در مقیاس بزرگ مکسن برای افزایش عملکرد دستگاه پدیدار شده است. در حال حاضر، مکسن به‌طور گسترده در کاتالیست‌ها، الک یونی، تبدیل نور گرمایی، ترانزیستورهای اثر میدانی، عایق‌های توپولوژیکی و واکنش‌های تکامل هیدروژن استفاده شده‌اند. با وجود دستاوردهای چشمگیر مکسن‌ها در کاربردهای ابرخازن تا به امروز، هنوز تعدادی چالش و فرصت برای توسعه بیشتر

چشم‌اندازهای آینده

گرافن و مشتقات آن به‌طور گسترده‌ای در فیلم‌های مبتنی بر گرافن برای ذخیره انرژی پیش از مکسن‌های دو بعدی مونتاژ شده‌اند که راه را برای اکتشاف مکسن‌ها هموار کردند [۵۲]. در چند سال گذشته، پیشرفت‌های زیادی در سنتز اصلاح شده و پردازش محلول مکسن‌ها صورت گرفته است و نظریه‌هایی در مورد چگونگی بهبود پایداری و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها نیز شکل گرفته است. روش‌های متفاوتی برای ساخت قابل

پیشرفت‌ها و طرح‌های مکسن و دستگاه‌های مربوط به آن‌ها وجود دارد که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۱. مواد و تهیه فیلم: اگرچه تا به امروز نزدیک به ۳۰ گونه مکسن به‌طور تجربی سنتز و حدود ۱۰۰ ترکیب مکسن استوکیومتری به‌طور کامل بررسی شده‌اند، تنها تعداد محدودی مکسن به عنوان بلوک‌های سازنده بررسی شده است. تا به امروز، بیش از ۷۰ درصد از آن‌ها در نخستین کشف $Ti_3C_2T_x$ متمرکز شده‌اند. تلاش‌های بیشتری باید با گونه‌ها و ترکیب‌های ساختار فیزیکی یا شیمیایی جدید انجام شود. افزون‌براین، بیشتر مسیرهای سنتز مکسن به‌کارگرفته‌شده شامل ترکیب‌های فلوتوئردار در محیط‌های آبی است و دستیابی به مکسن با پایانه‌های سطحی کنترل‌شده و یکنواخت می‌تواند یک کار چالش‌برانگیز باشد. با این حال، این پایانه‌ها برای بهینه‌سازی فرایند حل، هیبرید شدن و پایداری نانوصفحه‌های مکسن و همچنین کارایی مکسن به‌دست‌آمده حیاتی هستند. افزون‌براین، تخریب/اکسایش مکسن در شرایط مرطوب در طول فرایند محلول یک محدودیت برای کاربردهای عملی باقی می‌ماند. کنترل و اصلاح سطح مکسن تحت شرایط ملایم در طول سنتز مکسن و تهیه فیلم ممکن است برای به‌دست‌آوردن مکسن‌های تک‌لایه یا چندلایه با ویژگی‌های مطلوب مفید باشد. مطالعات بیشتری برای کنترل اندازه، تعداد لایه‌ها و نقص‌های اتمی مکسن‌ها برای تنظیم دقیق ریزساختار و ویژگی‌های شیمیایی فیلم‌ها مورد نیاز است. از سوی دیگر، بیشتر روش‌های تهیه لایه نازک به اندازه کافی خوب نیستند تا اندازه منافذ یا فاصله بین لایه‌ها را در مکسن واپایش کنند، به‌ویژه زمانی که به آماده‌سازی در مقیاس بزرگ نیاز است. بنابراین، بین واپایش خوب و ساخت در مقیاس بزرگ باید به‌خوبی مدیریت شود. فرایندهای بهبودیافته یا روش‌های جدید با عامل‌های قابل واپایش ممکن است به دستیابی به این نکته کمک کند. برای مثال، روش‌های چاپ هوشمند و دیجیتال که به‌عنوان یک روش الگوبرداری همه‌کاره، قابل تکرار، مقیاس‌پذیر

و ارزان در حال ظهور هستند، نوید زیادی برای آماده‌سازی مکسن برای دستگاه‌های کاربردی نشان می‌دهند.

۲. طراحی بهبود مواد: مشکلات جدی مانند نانوکانال‌های بین‌لایه‌ای پریپیچ و خم و ناکارآمد و کاهش سطوح فعال به دلیل خودانباشته‌شدن نانوصفحه‌های مکسن هنوز حل نشده‌اند. چندین راه حل نوظهور قابلیت زیادی برای پیروی بر این محدودیت‌ها نشان می‌دهند. برای مثال، می‌توان به کاهش اندازه ورق و ضخامت لایه، کشت ساختارهای متخلخل بر سطوح مکسن یا در لایه‌های نازک و قراردادن عامل‌های فاصله‌دهنده لایه‌ها کاربردی اشاره کرد. تا به حال، بین‌لایه‌ای‌شدن مکسن برپایه مواد گوناگونی مانند CNT، گرافن/GO، t، بسپارها و QDها انجام شده است. تنظیم اندازه ورق، مهندسی منافذ درون صفحه و معرفی شبکه‌های سه بعدی متصل به هم در فیبرهای چندمقیاسی در سازه‌های لایه‌ای به نسبت مؤثر هستند، ولی نیاز به توسعه بیشتر دارند. افزون‌براین، منافذ با طراحی ظریف با چگالی بالا و دقت بالا می‌توانند ریزمحیط‌های ساختاری و شیمیایی مطلوبی ایجاد کنند، انتقال یون را بهبود بخشند و مکان‌های فعال بیشتری را برای واکنش‌های اکسایش-کاهش سریع به ارمغان بیاورند که نیازمند بررسی بیشتر است. افزون‌براین، فیلم‌های بسیار نازک و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر یک یا چند لایه از مکسن می‌توانند برای بررسی تجربی و نظری اثر ساختار بر انتشار یون در مواد مبتنی بر مکسن استفاده شوند.

۳. بهبود کارایی و کاربردهای عملی: از نظر اجرای برنامه‌های کاربردی، چندین موضوع ویژه باید موردتوجه قرار گیرد. اول، چگونگی انتخاب مواد مهمان با کارایی بالا و کاربرد خوب روش‌های تهیه فیلم که در حال حاضر، اکثر گزینه‌های با ظرفیت بالا به‌طور تصادفی در مکسن گنجانده شده‌اند که منجر به توزیع ناهمگن و برهم‌کنش‌های ناهمگونی مبهم می‌شود. ساخت فیلم‌های نانوجندسازه با روش‌های قابل‌اعتماد و کم‌هزینه بسیار چالش‌برانگیز است و به کاوش بیشتر در رابطه و

بنیادی و پردازش فنی مرتبط با مکسن، راه را برای اکتشافات راه‌بردی‌تر باز کند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، پیشرفت‌های اخیر در مهندسی مواد مبتنی بر مکسن و مکسن اصلاح‌شده برای الکترودهای ابرخازن مطالعه و سه کاربرد شامل ابرخازن‌های متقارن، ابرخازن‌های نامتقارن، و ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر بررسی شد. ابتدا در باره مزایای ابرخازن‌ها نسبت به سایر باتری‌های ثانویه و چگونگی کار آن‌ها بحث شد. مکسن‌ها با بهره‌برداری از مزایایشان (برای مثال، رسانایی فلزی، آب دوستی عالی، شیمی سطح غنی و غیره) و طراحی فرایند و دپوشدن برای کارایی بهتر با افزودنی‌های رسانا، میزبان‌ها یا سایر بسترهای چندمنظوره به مواد فعال تبدیل می‌شوند. توجه پژوهشگران زمانی بیشتر شد که مکسن‌ها به صورت چندلایه یا ورقه‌ای طراحی و به‌ویژه برای ساخت مواد مبتنی بر مکسن به عنوان الکترودهای مستقل، لایه‌های اصلاح‌شده و ESD استفاده شدند. همچنین، انواع ابرخازن‌ها شامل ابرخازن‌های متقارن، نامتقارن و انعطاف‌پذیر معرفی و چالش‌های هر کدام بررسی و ویژگی ابرخازنی و انواع آزمون‌های متفاوت برای هر کدام بیان شدند.

تعاملات بین مکسن و مواد مهمان نیاز دارد. دوم، چگونگی تعادل ویژگی‌های مکانیکی و الکتروشیمیایی که بسیاری از گزارش‌های ارائه‌شده برای دستگاه‌های انعطاف‌پذیر در کاربردهای آینده دستگاه‌های الکترونیکی قابل‌حمل و پوشیدنی پیشنهاد شده‌اند. بنابراین، بهبود ویژگی‌های الکتروشیمیایی مواد با حفظ ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها مانند انعطاف‌پذیری، استحکام و چقرمگی بسیار مهم است. در پایان، مکسن با ظرفیت/خازن وزن بالا که در آزمایشگاه ساخته و آزمایش شده‌اند، به‌طور معمول دارای بار جرمی کم (mg/cm^2) و/یا چگالی ارتعاشی کم (g/cm^3) هستند که در نتیجه سطح متوسط و/یا ویژگی‌های توده‌ای دارند. هنگام هدف قرار دادن ESD مینیاتوری، مطالعه دقیق و سامانمند این جنبه بسیار مطلوب خواهد بود. با توجه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بی‌همتا و ویژگی‌های ساختاری معمولی، مکسن تعداد زیادی کاربرد جدید ممکن را ارائه می‌دهد. تا به امروز، رویکردهای متفاوتی برای چیرگی بر مشکلات فعلی خود مکسن در زمینه ذخیره انرژی گزارش شده است که فرایند طراحی بهبود لایه مکسن را پیش می‌برد و کاربردهای بالقوه بیشتری را در رابطه با تصفیه آب، محافظ الکترومغناطیسی، حسگرها و ESD پوشیدنی ممکن می‌سازد. می‌توان انتظار داشت که ادامه توسعه سریع درک

مراجع

- [1] Mirzaee M, Dehghanian C. Synthesis of flower-like NiCo_2O_4 via chronopotentiometric technique and its application as electrode materials for high-performance supercapacitors. *Materials Today Energy*. 2018;10:68-80. doi: [org/10.1016/j.mtener.2018.08.011](https://doi.org/10.1016/j.mtener.2018.08.011)
- [2] Mirzaee M, Dehghanian C. Pulsed electrodeposition of reduced graphene oxide on Ni-NiO foam electrode for high-performance supercapacitor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(27):12233-50. doi: [org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.173](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.173)
- [3] Mirzaee M, Dehghanian C, Sabet Bokati K. ERGO grown on Ni-Cu foam frameworks by constant potential method as high performance electrodes for supercapacitors. *Applied Surface Science*. 2018;436:1050-60. doi: [org/10.1016/j.apsusc.2017.12.145](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.145)
- [4] Mirzaee M, Dehghanian C, Sabet Bokati K. One-step electrodeposition of reduced graphene oxide on three-dimensional porous nano nickel-copper foam electrode and its use in supercapacitor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2018;813:152-62. doi: [org/10.1016/j.jelechem.2018.02.032](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.032)

- [5] Mirzaee M, Dehghanian C. Synthesis of Nickel-Nickel oxide foam by electrochemical method and its application in supercapacitor. *Advanced Processes in Materials Engineering*. 2019;13(2):17-25. **doi: 20.1001.1.24233226.1398.13.2.2.0**
- [6] Mirzaee M, Dehghanian C. Deposition of spinel cobalt nickel on nickel foam by a constant current electrochemical method and its supercapacitor application. *Journal of New Materials*. 2019;10(35):39-48. **doi: 20.1001.1.22285946.1398.9.35.4.6**
- [7] Gogotsi Y. What Nano Can Do for Energy Storage. *ACS Nano*. 2014;8(6):5369-71. **doi: org/10.1021/nn503164x**
- [8] Su Z, Yang C, Xie B, Lin Z, Zhang Z, Liu J, et al. Scalable fabrication of MnO₂ nanostructure deposited on free-standing Ni nanocone arrays for ultrathin, flexible, high-performance micro-supercapacitor. *Energy & Environmental Science*. 2014;7(8):2652-9. **doi: org/10.1039/C4EE01195C**
- [9] Er D, Li J, Naguib M, Gogotsi Y, Shenoy VB. Ti₃C₂ MXene as a High Capacity Electrode Material for Metal (Li, Na, K, Ca) Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014;6(14):11173-9. **doi: org/10.1021/am501144q**
- [10] Cai D, Huang H, Wang D, Liu B, Wang L, Liu Y, et al. High-Performance Supercapacitor Electrode Based on the Unique ZnO@Co₃O₄ Core/Shell Heterostructures on Nickel Foam. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014;6(18):15905-12. **doi: org/10.1021/am5035494**
- [11] Si C, Jin K-H, Zhou J, Sun Z, Liu F. Large-Gap Quantum Spin Hall State in MXenes: d-Band Topological Order in a Triangular Lattice. *Nano Letters*. 2016;16(10):6584-91. **doi: org/10.1021/acs.nanolett.6b03118**
- [12] Mirzaee M, Dehghanian C. Flower-like mesoporous nano NiCo₂O₄ -decorated ERGO/Ni-NiO foam as electrode materials for supercapacitor. *Materials Research Bulletin*. 2019;109:10-20. **doi: org/10.1016/j.materresbull.2018.09.020**
- [13] Mirzaee M, Dehghanian C. Nanostructured Ni-Cu foam electrodeposited on a copper substrate applied as supercapacitor electrode. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2018;24(4):325-36. **doi: 10.12776/ams.v24i4.1138**
- [14] Mirzaee M, Dehghanian C. Preparation of dendritic nanoporous Ni-NiO foam by electrochemical dealloying for use in high-performance supercapacitors. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2018;22:3639-45. **doi: org/10.1007/s10008-018-4065-1**
- [15] Mirzaee M, Dehghanian C. Synthesis of nanoporous copper foam-applied current collector electrode for supercapacitor. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 2019;16:283-92. **doi: org/10.1007/s13738-018-1505-x**
- [16] Shao Y, El-Kady MF, Sun J, Li Y, Zhang Q, Zhu M, et al. Design and mechanisms of asymmetric supercapacitors. *Chemical Reviews*. 2018;118(18):9233-80. **doi: org/10.1021/acs.chemrev.8b00252**
- [17] Zhou Ruihua Charge storage by electrochemical reaction of water bilayers absorbed on MoS₂ monolayers. *Scientific reports*. 2019; 9(1): 3980. **doi: org/10.1038/s41598-019-40672-w**
- [18] Mirzaee M, Dehghanian C, Sarbishei S. Facile synthesis of nano dendrite-structured Ni-NiO foam/ERGO by constant current method for supercapacitor applications. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2018;48:923-35. **doi: org/10.1007/s10800-018-1229-8**
- [19] Mirzaee M, Dehghanian C. Comparison between constant current electrochemical and pulse current approach in reduction of graphene oxide on nickel-nickel oxide foam. *Advanced Materials and New Coatings*. 2019;7(28):2002-8. **doi: /AMNC.2019.7.28.4**
- [20] Borenstein A, Hanna O, Attias R, Luski S, Brousse T, Aurbach D. Carbon-based

- composite materials for supercapacitor electrodes: A review. *Journal of Materials Chemistry A*. 2017;5(25):12653-72. doi: [org/10.1039/CTA00863E](https://doi.org/10.1039/CTA00863E)
- [21] Nataf K, Bradley TH. An economic comparison of battery energy storage to conventional energy efficiency technologies in Colorado manufacturing facilities. *Applied Energy*. 2016;164:133-9. doi: [org/10.1016/j.apenergy.2015.11.102](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.102)
- [22] Wang F, Wu X, Yuan X, Liu Z, Zhang Y, Fu L, et al. Latest advances in supercapacitors: from new electrode materials to novel device designs. *Chemical Society Reviews*. 2017;46(22):6816-54. doi: [org/10.1039/C7CS00205](https://doi.org/10.1039/C7CS00205)
- [23] Divya K, Østergaard J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric power systems research*. 2009;79(4):511-20. doi: [org/10.1016/j.epsr.2008.09.017](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017)
- [24] Zhou J, Zhang S, Zhou Y-N, Tang W, Yang J, Peng C, et al. Biomass-derived carbon materials for high-performance supercapacitors: Current status and perspective. *Electrochemical Energy Reviews*. 2021;4:219-48. doi: [org/10.1007/s41918-020-00090-3](https://doi.org/10.1007/s41918-020-00090-3)
- [25] Wang G, Zhang L, Zhang J. A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*. 2012;41(2):797-828. doi: [org/10.1039/C1CS15060J](https://doi.org/10.1039/C1CS15060J)
- [26] Shan H, Qin J, Ding Y, Sari HMK, Song X, Liu W, et al. Controllable heterojunctions with a semicoherent phase boundary boosting the potassium storage of CoSe₂/FeSe₂. *Advanced Materials*. 2021;33(37):2102471. doi: [org/10.1002/adma.202102471](https://doi.org/10.1002/adma.202102471)
- [27] Zhou Z, Seif A, Pourhashem S, Silvestrelli PL, Ambrosetti A, Mirzaee M, et al. Experimental and theoretical studies toward superior anti-corrosive nanocomposite coatings of aminosilane wrapped layer-by-layer graphene oxide@MXene/waterborne epoxy. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(45):51275-90. doi: [org/10.1021/acscami.2c14145](https://doi.org/10.1021/acscami.2c14145)
- [28] Shi H, Zhang P, Liu Z, Park S, Lohe MR, Wu Y, et al. Ambient-stable two-dimensional titanium carbide (MXene) enabled by iodine etching. *Angewandte Chemie International Edition*. 2021;60(16):8689-93. doi: [org/10.1002/anie.202015627](https://doi.org/10.1002/anie.202015627)
- [29] Liu A, Liang X, Ren X, Guan W, Ma T. Recent progress in MXene-based materials for metal-sulfur and metal-air batteries: Potential high-performance electrodes. *Electrochemical Energy Reviews*. 2022:1-33. doi: [org/10.1007/s41918-021-00110-w](https://doi.org/10.1007/s41918-021-00110-w)
- [30] Gao Q, Sun W, Ilani-Kashkouli P, Tselev A, Kent PR, Kabengi N, et al. Tracking ion intercalation into layered Ti₃C₂ MXene films across length scales. *Energy & Environmental Science*. 2020;13(8):2549-58. doi: [org/10.1039/D0EE01580F](https://doi.org/10.1039/D0EE01580F)
- [31] Zhu Y, Rajoua K, Le Vot S, Fontaine O, Simon P, Favier F. Modifications of MXene layers for supercapacitors. *Nano Energy*. 2020;73:104734. doi: [org/10.1016/j.nanoen.2020.104734](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104734)
- [32] Tang J, Mathis T, Zhong X, Xiao X, Wang H, Anayee M, et al. Optimizing ion pathway in titanium carbide MXene for practical high-rate supercapacitor. *Advanced Energy Materials*. 2021;11(4):2003025. doi: [org/10.1002/aenm.202003025](https://doi.org/10.1002/aenm.202003025)
- [33] Zhang Z, Yao Z, Zhang X, Jiang Z. 2D Carbide MXene under postetch low-temperature annealing for high-performance supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*. 2020;359:136960. doi: [org/10.1016/j.electacta.2020.136960](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136960)
- [34] Cai C, Zhou W, Fu Y. Bioinspired MXene nacre with mechanical robustness for highly flexible all-solid-state photothermo-supercapacitor. *Chemical Engineering Journal*.

- 2021;418:129275. doi: [org/10.1016/j.cej.2021.129275](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129275)
- [35] Lukatskaya MR, Mashtalir O, Ren CE, Dall'Agnesse Y, Rozier P, Taberna PL, et al. Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide. *Science*. 2013;341(6153):1502-5. doi: [org/10.1016/j.cej.2021.129275](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129275)
- [36] Hu M, Li Z, Hu T, Zhu S, Zhang C, Wang X. High-capacitance mechanism for $Ti_3C_2T_x$ MXene by in situ electrochemical Raman spectroscopy investigation. *ACS Nano*. 2016;10(12):11344-50. doi: [org/10.1021/acsnano.6b06597](https://doi.org/10.1021/acsnano.6b06597)
- [37] Dall'Agnesse Y, Lukatskaya MR, Cook KM, Taberna P-L, Gogotsi Y, Simon P. High capacitance of surface-modified 2D titanium carbide in acidic electrolyte. *Electrochemistry Communications*. 2014;48:118-22. doi: [org/10.1016/j.elecom.2014.09.002](https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.09.002)
- [38] Li J, Yuan X, Lin C, Yang Y, Xu L, Du X, et al. Achieving High Pseudocapacitance of 2D Titanium Carbide (MXene) by Cation Intercalation and Surface Modification. *Advanced Energy Materials*. 2017;7(15):1602725. doi: [org/10.1002/aenm.201602725](https://doi.org/10.1002/aenm.201602725)
- [39] Yang Q, Xu Z, Fang B, Huang T, Cai S, Chen H, et al. MXene/graphene hybrid fibers for high performance flexible supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*. 2017;5(42):22113-9. doi: [org/10.1039/C7TA07999K](https://doi.org/10.1039/C7TA07999K)
- [40] Wang Y, Dou H, Wang J, Ding B, Xu Y, Chang Z, et al. Three-dimensional porous MXene/layered double hydroxide composite for high performance supercapacitors. *Journal of Power Sources*. 2016;327:221-8. doi: [org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.062](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.062)
- [41] Wen Y, Rufford TE, Chen X, Li N, Lyu M, Dai L, et al. Nitrogen-doped Ti_3C_2Tx MXene electrodes for high-performance supercapacitors. *Nano Energy*. 2017;38:368-76. doi: [org/10.1016/j.nanoen.2017.06.009](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.06.009)
- [42] Sun L, Fu Q, Pan C. Hierarchical porous "skin/skeleton"-like MXene/biomass derived carbon fibers heterostructure for self-supporting, flexible all solid-state supercapacitors. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;410:124565. doi: [org/10.1016/j.jhazmat.2020.124565](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124565)
- [43] Liu Z, Wang L, Xu Y, Guo J, Zhang S, Lu Y. A $Ti_3C_2Tx@PEDOT$ composite for electrode materials of supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021;881:114958. doi: [org/10.1016/j.jelechem.2020.114958](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114958)
- [44] Yan J, Ma Y, Zhang C, Li X, Liu W, Yao X, et al. Polypyrrole-MXene coated textile-based flexible energy storage device. *RSC Advances*. 2018;8(69):39742-8. doi: [10.1039/C8RA08403C](https://doi.org/10.1039/C8RA08403C)
- [45] Zhang X, Shao B, Guo A, Gao Z, Qin Y, Zhang C, et al. Improved electrochemical performance of $CoO_x-NiO/Ti_3C_2T_x$ MXene nanocomposites by atomic layer deposition towards high capacitance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;862:158546. doi: [org/10.1016/j.jallcom.2020.158546](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158546)
- [46] Liang W, Zhitomirsky I. MXene-carbon nanotube composite electrodes for high active mass asymmetric supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021;9(16):10335-44. doi: [org/10.1039/D0TA12485K](https://doi.org/10.1039/D0TA12485K)
- [47] Ma L, Zhao T, Xu F, You T, Zhang X. A dual utilization strategy of liginosulfonate for MXene asymmetric supercapacitor with high area energy density. *Chemical Engineering Journal*. 2021;405:126694. doi: [org/10.1016/j.cej.2020.126694](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126694)
- [48] Mahmood M, Rasheed A, Ayman I, Rasheed T, Munir S, Ajmal S, et al. Synthesis of ultrathin MnO_2 nanowire-intercalated 2D-MXenes for high-performance hybrid supercapacitors. *Energy & Fuels*. 2021;35(4):3469-78. doi: [org/10.1021/acs.energyfuels.0c03939](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03939)

- [49] Chen X, Liu Y, Zhou Q, Su F. Facile synthesis of $\text{MnO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CC}$ as positive electrode of all-solid-state flexible asymmetric supercapacitor. *ChemistrySelect*. 2020;5(46):14768-75. doi: [org/10.1002/slct.202004181](https://doi.org/10.1002/slct.202004181)
- [50] Yu L, Hu L, Anasori B, Liu Y-T, Zhu Q, Zhang P, et al. MXene-bonded activated carbon as a flexible electrode for high-performance supercapacitors. *ACS Energy Letters*. 2018;3(7):1597-603 doi: [org/10.1021/acsnenergylett.8b00718](https://doi.org/10.1021/acsnenergylett.8b00718)
- [51] Miao J, Zhu Q, Li K, Zhang P, Zhao Q, Xu B. Self-propagating fabrication of 3D porous MXene-rGO film electrode for high-performance supercapacitors. *Journal of Energy Chemistry*. 2021;52:243-50. doi: [org/10.1016/j.jechem.2020.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.04.015)
- [52] Mirzaee M, Dehghanian C. Effect of different types of electrochemical methods on the super capacitor properties of thin graphene oxide reduced by electrochemical method. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2020;9(2):35-42. doi: [org/10.30501/jamt.2020.185410.1031](https://doi.org/10.30501/jamt.2020.185410.1031)

MXene-based supercapacitors and its future prospects

T. Mohebbi¹, M. Mirzaee^{2,*}, M. Hamdani^{3,*}

1. Ph.D Student of Chemistry Department, Kashan university, Kashan, Iran.

2. Assistant Prof. of Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

3. Associate Prof. of Chemistry Department, Kashan University, Kashan, Iran.

Abstract: MXenes have a series of amazing properties due to their unique structure and tunable chemical functional groups. The application of MXenes in electrochemical energy storage, especially showing high potential in supercapacitor applications, has attracted special attention. Compared to other materials, MXenes have high mechanical flexibility, high energy density, and good electrochemical performance, so they are especially suitable as electrode materials for supercapacitors. However, similar to other 2D materials, due to strong van der Waals forces, MXene layers inevitably undergo stacking, leading to a severe loss of electrochemically active sites. If the layers of MXenes can be suppressed effectively, their electrochemical performance will be enhanced. Structural optimization of MXenes and composite doping of MXenes with other materials are two strategies with significant effects. This review summarizes recent advances in MXene synthesis, fundamental properties, and composite materials with a focus on the latest electrochemical performance of MXene-based electrodes/devices and presents new challenges and opportunities that MXene faces in energy storage.

Keywords: Composite, MXene, Supercapacitor