

## بررسی ویژگی‌های الکتروکاتالیزوری نانوکامپوزیت دی‌سلنید تنگستن/گرافن اکسید احیاشده برای واکنش کاهش اکسیژن

عادلہ جعفری<sup>۱</sup>، علی بهاری<sup>۱</sup>، هاجر رجایی لیتکوهی<sup>۲</sup>

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، مازندران، بابلسر، ایران

۲- گروه نانوزیست فناوری، دانشکده زیست فناوری، دانشگاه فناوری های نوین آمل، آمل، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۶/۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۷/۲۶)

**چکیده:** در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های دی‌سلنید تنگستن/گرافن اکسید احیاشده به دلیل ویژگی‌های ساختاری بی‌مانند، عملکرد کاتالیزوری برجسته و پایداری شیمیایی بالا به عنوان یک الکتروکاتالیزور کارآمد برای واکنش کاهش اکسیژن (WSe<sub>2</sub>/RGO) به روش گرمایی با موفقیت سنتز شدند. مشخصه‌یابی‌های انجام شده با پراش سنج پرتوی ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتوی X (EDX) تشکیل موفقیت آمیز نانوکامپوزیت WSe<sub>2</sub>/RGO را تأیید نمودند. نتایج آزمایش‌های الکتروشیمیایی نشان‌دهنده عملکرد الکتروکاتالیزوری ممتاز این نانوساختار، شامل چگالی جریان بالا و مقاومت انتقال بار قابل مقایسه با کاتالیزورهای بر پایه پلاتین بود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت WSe<sub>2</sub>/RGO می‌تواند به عنوان یک الکتروکاتالیزور اقتصادی و کارآمد برای واکنش کاهش اکسیژن در کاربردهای متنوع چون پیل‌های سوختی، باتری‌های یون لیتیوم، ابرخازن‌ها و سایر فناوری‌های در ارتباط با ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی استفاده شود. این ویژگی‌ها، همراه با مقیاس‌پذیری روش گرمایی، نانوکامپوزیت WSe<sub>2</sub>/RGO را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای جایگزینی کاتالیزورهای گران قیمت در کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** اکسید گرافن کاهش یافته؛ دی سلنید تنگستن؛ الکتروکاتالیزور؛ پیل سوختی.

### مقدمه

مستقیم از واکنش‌های شیمیایی تولید کنند. در این میان، واکنش کاهش اکسیژن (ORR) که در کاتد پیل‌های سوختی رخ می‌دهد، به عنوان یکی از فرآیندهای کلیدی در تعیین کارایی و عملکرد کلی این سامانه‌ها شناخته می‌شود [۱-۳]. با این حال، به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی در سینتیک و ترمودینامیک این واکنش، سرعت و کارایی آن محدود است و نیاز به گسترش الکتروکاتالیزورهای مؤثر دارد تا بتوان عملکرد پیل‌های سوختی را بهینه کرد [۳-۶].

با افزایش روزافزون تقاضا برای منابع سوخت‌های فسیلی و مشکل‌های زیست محیطی جدی که استفاده گسترده از این منابع به همراه دارد، توجه جامعه جهانی به فناوری‌های نوین تولید انرژی پاک معطوف شده است. این فناوری‌ها باید دارای بازده بالا و آلودگی بسیار ناچیز باشند تا بتوانند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به شمار روند. یکی از فناوری‌های مطرح و امیدوارکننده در این زمینه، پیل‌های سوختی هستند که می‌توانند انرژی الکتریکی را به طور

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۱۱۳۵۳۰۲۴۹۵، پست الکترونیکی: [a.bahari@umz.ac.ir](mailto:a.bahari@umz.ac.ir)

Copyright © 2025 The author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0

International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited



بسیار بالا و سطح ویژه زیاد است، می‌تواند مزیت‌های هر دو ماده را کنار هم قرار دهد. این ترکیب باعث بهبود پراکندگی نانورقه‌های  $WSe_2$ ، افزایش تعداد جایگاه‌های فعال و تسریع انتقال الکترون در واکنش‌های الکتروشیمیایی شده که سرانجام به افزایش بازده پیل‌های سوختی و کاهش هزینه‌های تولید کمک می‌کند.

در این پژوهش، نانوکامپوزیت  $WSe_2/RGO$  با بهره‌گیری از روش گرمایی سنتز شده است. برای بهبود پراکندگی نانورقه‌های  $WSe_2$  و جلوگیری از انباشت لایه‌های دوبعدی که ممکن است کارایی کاتالیزور را کاهش دهد، از حلال ۱-متیل-۲-پیرولیدون به عنوان عامل مؤثر استفاده شده است. سپس، بررسی‌های مختلفی شامل مشخصه‌یابی ساختاری و ارزیابی عملکرد الکتروشیمیایی انجام شد تا ویژگی‌های نانوکامپوزیت سنتز شده در واکنش کاهش اکسیژن به دقت بررسی شود. افزون بر این، فرآیند سنتز و تشکیل ساختار ستونی شکل کاتالیزور که شامل نانورقه‌های نازک و لایه‌ای است، به طور مفصل شرح داده می‌شود تا درک کاملی از چگونگی تشکیل و عملکرد این ماده به دست آید [۱۱].

#### روش بررسی

نانوکامپوزیت نانورقه‌های اکسید گرافن احیاشده/دی‌سلنید تنگستن ( $WSe_2/RGO$ ) به روش گرمایی که در ادامه توضیح داده می‌شود، سنتز شد. سپس، ویژگی‌های ساختاری و ریختاری نانوکامپوزیت با طیف‌سنج پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. برای بررسی عملکرد الکتروشیمیایی، جوهر کاتالیزوری تهیه شده از نانوکامپوزیت بر روی الکتروکربن شیشه‌ای (GCE) بارگذاری شد و پس از خشک شدن، آزمایش‌های الکتروشیمیایی انجام گردید.

برای تهیه نانوکامپوزیت مورد بررسی به ۵۰ میلی لیتر ۱-متیل-۲-پیرولیدون (NMP)، ۱۸۵ میلی گرم پودر هیدروکسید سدیم و ۵۰ میلی گرم گرافن اکسید اضافه شد. سپس، ۳۳۰ میلی گرم تنگستات سدیم دی‌هیدرات ( $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ ) و ۳۴۶ میلی گرم سلنیت سدیم ( $Na_2SeO_3$ ) به محلول افزوده شد. پس از هم‌زدن محلول به مدت ۳۰ دقیقه، مخلوط به اتوکلاو منتقل و در دمای ۲۲۰

طی چند دهه اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای برای بهبود اجزای مختلف پیل‌های سوختی از جمله بهینه‌سازی غشاها، الکترودها و به ویژه الکتروکاتالیزورها که نقش مهمی در تسهیل واکنش‌های الکتروشیمیایی دارند انجام شده است. با وجود پیشرفت‌های انجام شده، هنوز چالش‌های مهمی از جمله هزینه بالای مواد کاتالیزوری، محدودیت‌های فناوری موجود و پایداری پایین برخی مواد، مانع از ورود گسترده پیل‌های سوختی به بازارهای بزرگ و رقابتی شده‌اند. از این رو، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها بر گسترش مواد جدید با پایداری گرمایی بالا، کارایی بهبود یافته و هزینه کمتر است که بتوانند عملکرد سامانه‌های پیل سوختی را در شرایط عملیاتی واقعی بهینه کنند [۷].

از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه، جایگزینی کاتالیزورهای بر پایه پلاتین است که هرچند بازدهی بالایی دارند و به طور گسترده در پیل‌های سوختی استفاده می‌شوند، اما به دلیل هزینه بسیار بالا، منابع محدود و پایداری شیمیایی ناکافی، محدودیت‌هایی برای کاربردهای گسترده آن‌ها وجود دارد. از این رو، گسترش الکتروکاتالیزورهای غیرپلاتینی که افزون بر هزینه کمتر، دوام و کارایی قابل رقابت با پلاتین داشته باشند، به یکی از اولویت‌های اصلی پژوهش‌های علمی و صنعتی تبدیل شده است.

در این میان، دی سلنید تنگستن ( $WSe_2$ )، که یکی از ترکیب‌های دی کالکوئیدهای فلزهای واسط با ساختار لایه‌ای دوبعدی است، به دلیل ویژگی‌های بی‌مانند رسانایی الکتریکی مناسب، پایداری شیمیایی بالا، نسبت سطح به حجم بزرگ و روش‌های سنتز اقتصادی، به عنوان یک کاتالیزور جایگزین بسیار امیدوارکننده مطرح شده است. این ماده کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف از جمله حسگرهای زیستی و گازی، تجهیزات اپتوالکترونیکی، ترانزیستورهای نانومقیاس، ابرخازن‌ها و به ویژه پیل‌های سوختی پیدا کرده است. با این وجود، محدودیت‌هایی چون تعداد کم جایگاه‌های فعال کاتالیزوری و رسانایی الکتریکی به نسبت پایین  $WSe_2$  باعث کاهش عملکرد آن در واکنش ORR می‌شود [۸-۱۰].

برای رفع این مشکل‌ها، ترکیب  $WSe_2$  با مواد کربنی چون اکسید گرافن احیاشده (RGO)، که دارای رسانایی الکتریکی

فراهم کردن بستر مناسبی برای واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌گردد.

تصاویر میکروسکوپی نانوکامپوزیت دی سلنید تنگستن/اکسید گرافن احیاشده ( $WSe_2/RGO$ )، نمایانگر ترکیب پیچیده‌تری هستند (شکل ۱ ب) که در آن افزون بر ورقه‌های  $RGO$ ، نانورقه‌های  $WSe_2$  به صورت ذره‌های لایه‌ای و نازک بر سطح و میان لایه‌های گرافن توزیع شده‌اند. این نانورقه‌ها با پراکندگی یکنواخت و فشرده روی  $RGO$  قرار گرفته‌اند که موجب ناهمواری‌های سطحی قابل توجه و ساختاری سه بعدی می‌شود. چنین ساختاری موجب افزایش چشمگیر سطح فعال نانوکامپوزیت می‌شود و بهبود چشمگیری در انتقال الکترون و رسانایی الکتریکی به همراه دارد. این ویژگی‌ها نقش کلیدی در بهینه سازی عملکرد کاتالیزوری به ویژه در واکنش کاهش اکسیژن (ORR) دارند.

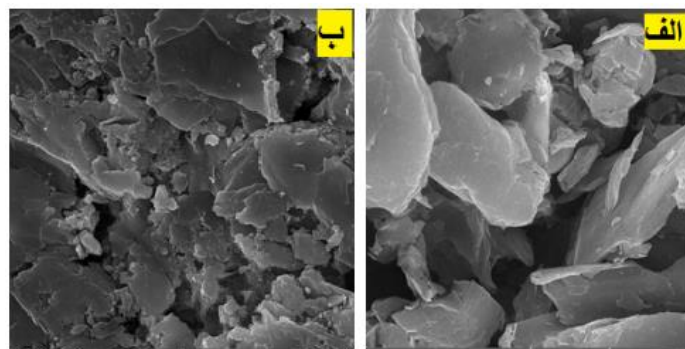
بررسی ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت  $WSe_2/RGO$  با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان‌دهنده شکل‌گیری ساختار ستونی شکل است که در آن، نانورقه‌های دی سلنید تنگستن به صورت لایه لایه و منظم بر روی هم انباشته شده‌اند. این ساختار ستونی شکل با لبه‌های گسترده و فواصل بین لایه‌های بهینه، امکان دسترسی آسان به جایگاه‌های فعال کاتالیزوری را فراهم می‌کند و موجب بهبود انتقال جرم در واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود. به ویژه، این نانوساختار سبب افزایش آهنگ واکنش ORR شده و پایداری طولانی مدت کاتالیزور را تضمین می‌نماید. وجود چنین ساختار پیچیده و منسجم که ترکیبی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی  $WSe_2$  و  $RGO$  است، منجر به تقویت سرعت واکنش و بهبود کارایی کلی نانوکامپوزیت در کاربردهای پیل سوختی می‌گردد.

درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. پس از خنک شدن طبیعی در دمای محیط، فراورده سه بار با آب یونزدایی شده و اتانول شست و شو و سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۸ ساعت در کوره خشک شد.

برای اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی، سامانه سه الکترودی شامل الکترود صفحه چرخان (RDE) به عنوان الکترود کاری، الکترود پلاتین به عنوان الکترود مقابل، و الکترود نقره/کلرید نقره ( $Ag/AgCl$ ) به عنوان الکترود مرجع استفاده شد. محلول ۰/۱ مولار هیدروکسید پتاسیم (KOH) به عنوان الکترولیت انتخاب گردید. برای تهیه جوهر کاتالیزوری، ۴ میلی‌گرم نانوکامپوزیت دی سلنید تنگستن ( $WSe_2$ ) و ۲۵ میکرولیتر نفیون (Nafion) به ۲ میلی‌لیتر اتانول افزوده شد و مخلوط به مدت ۱ ساعت زیر امواج فراصوت همگن گردید. سپس، ۵ میکرولیتر از جوهر کاتالیزوری روی سطح الکترود صفحه چرخان بارگذاری و در دمای محیط خشک شد. پیش از انجام آزمایش‌های الکتروشیمیایی، الکترولیت به مدت ۳۰ دقیقه در جریان گاز اکسیژن اشباع شد تا شرایط بهینه برای واکنش کاهش اکسیژن (ORR) فراهم گردد.

#### یافته‌ها

تصاویر میکروسکوپی اکسید گرافن احیاشده ( $RGO$ ) اغلب نمایانگر ورقه‌های نازک و گسترده‌ای با ساختار لایه‌ای و سطحی به نسبت یکنواخت و همگن هستند (شکل ۱ الف). در این تصاویر، ورقه‌های  $RGO$  اغلب به صورت چین خورده و موج‌دار دیده می‌شوند که این ویژگی‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری و ساختار لایه‌ای آن‌هاست. سطح این ورقه‌ها بدون ذره‌های اضافی بوده و چین خوردگی‌ها و لبه‌های موج‌دار از ویژگی‌های شاخص آن‌هاست. این ساختار منجر به افزایش سطح ویژه و



شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف)  $RGO$ ، (ب)  $WSe_2/RGO$ .

شدت به نسبت کمتر از قله اصلی، تأییدکننده وجود بلورهای  $WSe_2$  با ساختار چندجهتی هستند. شدت بالای قله (۰۰۲) نسبت به سایر قله‌ها نشان می‌دهد که بلورهای  $WSe_2$  تمایل دارند به صورت صفحه‌ای و لایه به لایه روی سطح زمینه به احتمال بسیار  $rGO$  رشد کنند، که با ساختار ذاتی لایه‌ای این ماده نیز همخوانی دارد.

در بخش میانی الگو، قله‌ی پهن حدود ۲۴ درجه اغلب به گرافن احیاشده ( $rGO$ ) نسبت داده می‌شود و بیانگر وجود ساختاری با نظم پایین‌تر یا دامنه بلوری کوچک‌تر در مقایسه با گرافیت خالص است. چنان که انتظار می‌رود، در نمونه  $rGO$  قله تیز مربوط به اکسید گرافن ( $GO$ ) در زاویه حدود ۱۰-۱۱ درجه از بین رفته یا کاملاً تضعیف شده است، که این امر در نمودار حاضر نیز دیده می‌شود. نبود قله در آن ناحیه نشان می‌دهد که  $GO$  طی فرایند احیا به  $rGO$  تبدیل شده و فاصله بین لایه‌های کاهش یافته یا نظم لایه‌ای از بین رفته است. پهن بودن قله  $rGO$  نیز نشان دهنده ماهیت بی شکل (آمورف) و گسترش تصادفی صفحه‌های گرافن در ترکیب پایانی است.

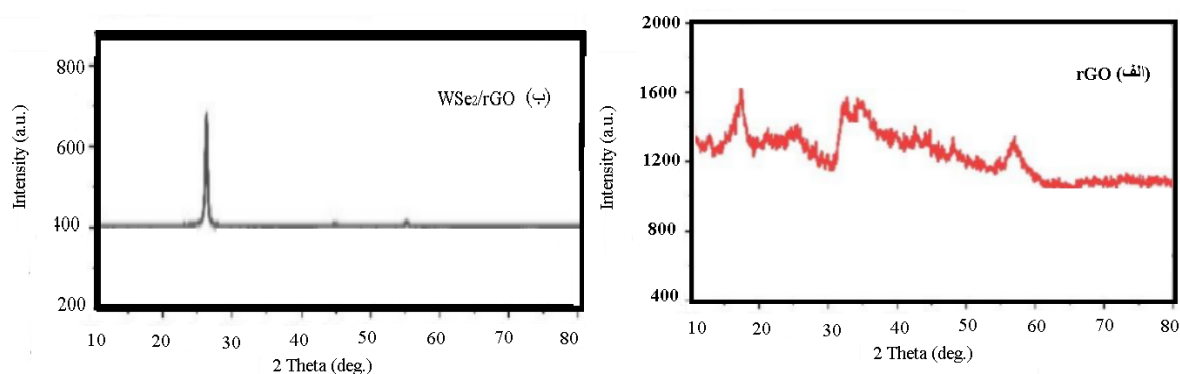
در مجموع، این الگوی XRD به خوبی بیانگر سنتز موفق نانوکامپوزیت  $WSe_2/rGO$  است. حضور قله‌های مشخص فاز بلوری  $WSe_2$  در کنار قله پهن  $rGO$ ، همراه با حذف کامل قله‌های  $GO$ ، نشان می‌دهد که ترکیب پایانی شامل نانوصفحه‌های  $WSe_2$  با بلورینگی قابل توجه است که به صورت به نسبت یکنواخت روی بستر گرافنی احیاشده پخش شده‌اند. این نوع ساختار برای کاربرد در پیل‌های سوختی بسیار مناسب است، زیرا ترکیب ویژگی‌های نیم‌رسانایی  $WSe_2$  با رسانایی الکتریکی بالای  $rGO$  به افزایش فعالیت الکتروکاتالیزوری، بهبود انتقال الکترون و پایداری در محیط‌های الکتروشیمیایی منجر می‌شود. این ویژگی‌ها نانوکامپوزیت  $WSe_2/rGO$  را به گزینه‌ای کارآمد برای استفاده به عنوان کاتالیزور ارزان قیمت و مؤثر در واکنش-های الکتروکاتالیزوری چون واکنش تکامل هیدروژن ( $HER$ ) در پیل‌های سوختی تبدیل می‌کند.

برای تعیین ساختار بلوری نمونه، پراش پرتو ایکس ( $XRD$ ) انجام شد و نتایج به دست آمده در شکل ۲ ارائه شده است. در شکل ۲ الف، قله اصلی اکسید گرافن ( $GO$ ) در زاویه  $11.7^\circ$  دیده می‌شود. این قله به صفحه بلوری (۰۰۱) مربوط بوده و نشان دهنده افزایش فاصله بین لایه‌ای در اثر ورود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (چون اپوکسید، کربوکسیل و هیدروکسیل) به ساختار گرافیت است. براساس قانون براگ و طول موج پرتوی ( $Cu\ K\alpha\ X=1.5406\ \text{\AA}$ )، فاصله بین لایه‌ای برای این قله حدود  $0.75$  تا  $0.80$  نانومتر محاسبه می‌شود. این مقدار حدود دو برابر فاصله لایه‌ای در گرافیت خالص (حدود  $0.335$  نانومتر) است که اغلب در زاویه  $26.6^\circ \approx 2\theta$  دیده می‌شود.

پهن‌تر بودن قله  $GO$  نسبت به گرافیت، نشان‌دهنده کاهش نظم بلوری و اندازه کوچک‌تر بلورک‌هاست که اغلب در اثر فرآیند اکسایش و تخریب نظم ساختاری گرافیت به وجود می‌آید. همچنین در این الگو، قله‌های ضعیف‌تری در گستره حدود ۴۳ و ۵۵ درجه دیده می‌شوند که ممکن است ناشی از باقی‌مانده‌های گرافیت یا ناخالصی‌های احتمالی باشند. در یک نمونه  $GO$  خالص و با اکسایش کامل، چنین قله‌هایی اغلب دیده نمی‌شوند.

شکل ۲ ب الگوی XRD نانوکامپوزیت  $WSe_2/rGO$  (دی‌سولفید تنگستن/ اکسید گرافن احیاشده) است. در این الگو، قله غالب و بسیار تیز در زاویه  $9.3^\circ \approx 2\theta$  دیده می‌شود که به خوبی با صفحه بلوری (۰۰۲) مربوط به فاز  $2H-WSe_2$  همخوانی دارد. حضور این قله، که اغلب شاخص ساختار لایه-ای  $WSe_2$  است، نشان‌دهنده جهت‌گیری ترجیحی صفحه‌های  $WSe_2$  در راستای محور  $c$  است. این قله اغلب بیان‌گر فاصله بین لایه‌ای گسترده‌تری در ساختار  $WSe_2$  بوده که در مواد با ماهیت دوبعدی مانند این ترکیب رایج است.

در ادامه الگو، چند قله دیگر در زوایای حدود ۱۴، ۳۳، ۳۹، ۵۸ درجه دیده می‌شوند که به ترتیب به صفحه‌های (۰۰۴)، (۱۰۰)، (۱۰۳) و (۱۱۰)  $WSe_2$  مربوط هستند. این قله‌ها با



شکل ۲ طیف‌های XRD نمونه‌های (الف) rGO (ب) WSe<sub>2</sub>/Rgo.

کاهش اکسیژن (ORR)، از آزمون ولتامتری روبش خطی (LSV) در حضور اکسیژن و با استفاده از الکتروده صفحه چرخان (RDE) استفاده شد. این آزمون در سرعت‌های دورانی مختلف بین ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه انجام شد تا اثر آهنگ نفوذ اکسیژن به سطح الکتروده بررسی گردد. با افزایش سرعت دورانی، چگالی جریان کاتدی (مقدار جریان منفی) نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳ الف). این افزایش ناشی از بهبود نفوذپذیری اکسیژن از محلول به سطح فعال الکتروده است که در سرعت‌های بالاتر به دلیل کاهش ضخامت لایه مرزی تسهیل می‌گردد. در سرعت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، نانوساختار WSe<sub>2</sub>/rGO بیشینه چگالی جریان پخشی خود را نشان می‌دهد که با مقدار جریان تولیدی توسط کاتالیزور پلاتینی (Pt/C) قابل مقایسه است. قله جریان کاتدی شدید در سرعت‌های بالا نشان دهنده-ی فعالیت الکتروکاتالیزوری مناسب این نانوساختار برای فرآیند ORR است.

افزایش جریان پخشی در سرعت‌های بالاتر، براساس مدل کلاسیکوتکی-لیویچ، می‌تواند برای تعیین تعداد الکترون‌های درگیر در واکنش نیز استفاده شود. عملکرد قابل رقابت با Pt/C در ۱۶۰۰ دور بر دقیقه نویدبخش استفاده از WSe<sub>2</sub>/rGO به عنوان جایگزین اقتصادی‌تر برای کاتالیزورهای پلاتینی در سلول‌های سوختی است (شکل ۳ الف).

به منظور شناسایی عناصر تشکیل دهنده نانوساختار سنتز شده و تعیین درصد وزنی و اتمی هر عنصر، طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس، عناصر اصلی در ساختار نانوکامپوزیت از نظر وزنی، تنگستن (W) و سلنیوم (Se) هستند. این نتایج تشکیل موفقیت آمیز نانورقه‌های دی‌سلنید تنگستن (WSe<sub>2</sub>) را تأیید می‌کند. حضور WSe<sub>2</sub> نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های الکتروکاتالیزوری، به‌ویژه در کاربردهای کاهش اکسیژن (ORR) دارد.

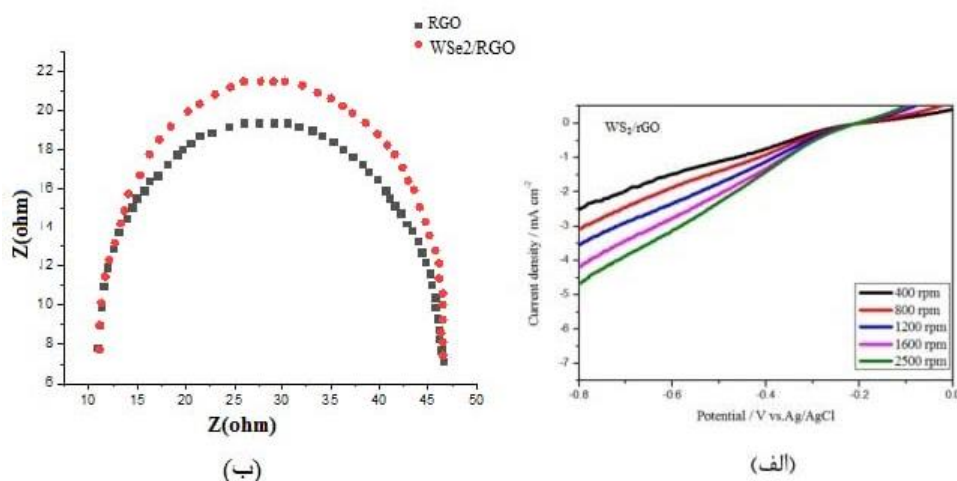
همچنین، درصد وزنی اکسیژن به دست آمده از EDX نشان می‌دهد که طی فرآیند گرمایی، مقدار گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار موجود بر سطح اکسید گرافن، که اغلب در گستره ۵۰ تا ۷۰ درصد است، به حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه نشان دهنده تبدیل موفقیت آمیز اکسید گرافن به اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) است [۱۲-۱۴].

افزون بر این، کمتر بودن درصد وزنی کربن در مقایسه با اکسیژن در نمونه پایانی نشان می‌دهد که نانورقه‌های WSe<sub>2</sub> به صورت یکنواخت و کامل سطح اکسید گرافن کاهش یافته را پوشش داده‌اند. این توزیع یکنواخت اثر قابل توجهی بر عملکرد پایانی نانوکامپوزیت دارد.

برای بررسی عملکرد نانوساختار WSe<sub>2</sub>/rGO در واکنش

جدول ۱ عناصر تشکیل دهنده نانوساختار و درصد اتمی و وزنی آن‌ها.

عناصر	درصد وزنی (%)	درصد اتمی (%)
کربن	۹٫۱۲	۲۵٫۸۷
اکسیژن	۱۰٫۲۸	۲۲٫۹۴
سلنیوم	۲۸٫۴۵	۳۴٫۶۲
تنگستن	۵۲٫۱۵	۱۶٫۵۷



شکل ۳ الف: نمودار چگالی جریان نانوساختار در دوران‌های مختلف و (ب) طیف امپدانس نمونه مورد بررسی.

نتایج به دست آمده از آزمون‌های LSV و EIS به طور هماهنگ نشان می‌دهند که نانوساختار  $WSe_2/rGO$  عملکرد بسیار مطلوبی به عنوان کاتالیزور در واکنش کاهش اکسیژن دارد. ویژگی‌های بارز آن عبارتند از (۱) چگالی جریان بالا در آزمایش‌های ولتامتری، به ویژه در سرعت دوران بالا، (۲) رسانایی الکتریکی مناسب که با مقدار  $R_s$  پایین تأیید می‌شود و (۳) مقاومت انتقال بار پایین و نزدیک به  $Pt/C$  که نشان دهنده تسهیل در انتقال الکترون به مولکول‌های اکسیژن است [۱۶].

نانوساختار  $WSe_2/rGO$  با توجه به رفتار الکتروشیمیایی خود، می‌تواند به عنوان یک جایگزین کم هزینه، پایدار و موثر برای الکترودهای پلاتینی در سامانه‌های انرژی نو مانند سلول-های سوختی و باتری‌های فلز-هوا استفاده شود.

#### برداشت

نانوکامپوزیت دی‌سلنید تنگستن - اکسید گرافن کاهش یافته ( $WSe_2/rGO$ )، شامل نانورقه‌هایی با نقایص متعدد، به روش گرمایی سنتز شد. این نقایص جایگاه‌های فعال فراوانی را برای جذب و تجزیه اکسیژن فراهم کرده و در نتیجه، این ساختار عملکرد کاتالیزوری مطلوبی را برای واکنش کاهش اکسیژن (ORR) نشان می‌دهد.

آزمون طیف‌سنجی مقاومت ظاهری (امپدانس) الکتروشیمیایی (EIS) برای بررسی مقاومت‌های الکتریکی و انتقال بار در سطح الکترودهای  $WSe_2/rGO$  و  $rGO$  انجام شد. طیف‌ها به صورت نمودار ارائه شده‌اند، که در آن محور افقی مربوط به مؤلفه حقیقی مقاومت ( $Z'$ ) و محور عمودی مربوط به مؤلفه موهومی مقاومت ظاهری ( $Z''$ ) است (شکل ۳ ب). هر دو ماده نیم دایره‌ای در ناحیه بسامد بالا نشان می‌دهند که به مقاومت انتقال بار ( $R_{ct}$ ) مربوط است. ناحیه تقاطع اولیه با محور  $X$  نشان دهنده مقاومت سری ( $R_s$ ) بوده که شامل مقاومت الکترولیت، مقاومت تماس بین کاتالیزور و الکتروده و رسانایی داخلی کاتالیزور است. مقادیر  $R_s$  بسیار نزدیک برای  $Pt/C$  و  $WSe_2/rGO$  نشان‌دهنده رسانایی الکتریکی مطلوب نانوساختار  $WSe_2/rGO$  است. این امر اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا رسانایی پایین می‌تواند مانع انتقال الکترون طی واکنش شود. مقدار  $R_{ct}$  برای  $WSe_2/rGO$  تنها کمی بالاتر از  $Pt/C$  است، که نشان‌دهنده انتقال بار مناسب و فعالیت کاتالیزوری خوب این نانوساختار در واکنش ORR است [۱۵]. نیم‌دایره-های کوچک‌تر در نمودار به معنی مقاومت انتقال بار پایین‌تر و در نتیجه فعالیت کاتالیزوری بالاتر هستند، که برای  $WSe_2/rGO$  به خوبی دیده می‌شود.

*oxidation of methanol, 2-propanol, and glycerol alcohols for fuel cells*”, Mol. Catal. 536 (2023)112874-85.

[6] Zhao J., Hu T., Wang J., Wang Y., Zhang J., Lv B., Zhang W., Jia J., “Strain effect induced Pd nanoparticles decorated Pd<sup>2+</sup>-doped Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanosheets for efficient electrocatalytic ethanol oxidation and oxygen reduction reactions”, Mol. Catal., 556 (2024)113902-912.

[7] Shi H., Liao F., Zhu W., Shao C., Shao M., “Effective PtAu nanowire network catalysts with ultralow Pt content for formic acid oxidation and methanol oxidation”, Int. J. Hydrogen Energy, 45 (2020)16071–16079.

[8] Huang H., Chen Y., Chen Z., Chen J., Hu Y., Zhu J.J., “Electrochemical sensor based on Ce-MOF/carbon nanotube composite for the simultaneous discrimination of hydroquinone and catechol”, J. Hazard Mater., 416 (2021)125895-905.

[9] Larsen R., Ha S., Zakzeski J., Masel R.I., “Unusually active palladium-based catalysts for the electrooxidation of formic acid”, J. Power Sources, 157 (2006)78–84.

[10] Wang S., Xue Y., Yu Z., Huang F., Jin Y., “Layered 2D MOF nanosheets grown on CNTs substrates for efficient nitrite sensing”, Mater. Today Chem., 30 (2023)101490-97.

[11] Wang J., Li H., Sun Y., “Tungsten disulfide nanosheets as efficient electrocatalysts for the oxygen reduction reaction” ACS Appl. Mater. Interf., 7(5) (2015) 2504–2510.

[12] Sofian M., Nasim F., Ali H., Nadeem M.A., “Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promoted Pd/rGO electrocatalyst for formic acid oxidation”, Int. J. Hydrogen Energy, 48 (2023)16370–16380.

[13] Qu K., Zhao Y., Xia S., et al. “Graphene oxide-wrapped WS<sub>2</sub> as a bifunctional electrocatalyst for oxygen evolution and reduction.” J. Mater. Chem. A, 5 (2017). 11233–11240.

[14] Ramachandran R., Xuan W., Zhao C., Leng X., Sun D., Luo D., Wang F., “Enhanced electrochemical properties of cerium metal-

این نانوساختار در سرعت چرخش ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، چگالی جریان پخشی بالایی از خود نشان می‌دهد که با کاتالیزورهای پلاتینی تجاری قابل مقایسه است. نانورقه‌های بسیار نازک WSe<sub>2</sub> و برهم‌کنش اتم‌های تنگستن با گرافن، رسانایی الکتریکی نانوساختار را بهبود می‌بخشد. این ویژگی آهنگ انتقال الکترون را افزایش داده و مقاومت انتقال بار را کاهش می‌دهد. در نتیجه، این پژوهش یک کاتالیزور کاتدی مقرون به صرفه، پایدار و کارآمد را به عنوان جایگزینی برای پلاتین تجاری معرفی می‌کند که می‌تواند در تجاری سازی پیل های سوختی کاربرد داشته باشد.

#### قدردانی

از دانشگاه مازندران جهت فراهم آوردن آزمایش‌ها در آز نانو الکترونیک دانشکده علوم پایه تشکر می‌کنیم.

#### مراجع

[1] Singh S. K., Takeyasu K., Nakamura J., “Active Sites and Mechanism of Oxygen Reduction Reaction Electrocatalysis on Nitrogen-Doped Carbon Materials”, Adv. Mater. 31 (2019) 1804297-1804307.

[2] Wang M., Wang C., Zhu L., Rong F., He L., Lou Y., Zhang Z., “Bimetallic NiCo metal-organic frameworks for efficient non-Pt methanol electrocatalytic oxidation”, Appl. Catal. A Gen., 619 (2021)118159-68.

[3] Jin J., Hu S., Zhang X., Sun S., “Effect of MoO<sub>3</sub> on Pd nanoparticles for efficient formic acid electrooxidation”, Int. J. Hydrogen Energy, 48 (2023)15483–91.

[4] Solymani Moghaddam M., Bahari A., Rajaei Litkahi H., “Using the synergistic effects of MoS<sub>2</sub>/rGO and bimetallic hybrids as a high-performance nanoelectrocatalyst for oxygen reduction reaction”, Int. J. Hydrogen Energy, 48 (2023) 33139–54.

[5] Karimi F., Akin M., Bayat R., Bekmezci M., Darabi R., Aghapour E., Sen F., “Application of quasi-hexagonal Pt@PdS<sub>2</sub>-MWCNT catalyst with high electrochemical performance for electro-

*evolution reactions.*"Electrochimica Acta, 128 (2014) 218–225.

[16] Li X., Wang H., Robinson J., *et al.*, "*MoS<sub>2</sub> nanoparticles grown on graphene: an advanced catalyst for the hydrogen evolution reaction.*"J. American Chem. Soc., 133(2011) 7296–7299.

*organic framework based composite electrodes for high-performance supercapacitor application*". RSC Adv. 28 (2018) 3462–3469.

[15] Avasarala A., Moore B., Haldolaarachchige N., *et al.*, "*Graphene-based bifunctional electrocatalyst for oxygen reduction and oxygen*