

تهیه و تشخیص ساختار گرافن اکسید عامل دار شده با ۶-آمینو-۲،۲'-بی پیریدین و کاربرد آن برای تعیین مقدار سریع و حساس سرب در آب

مریم عباسی اشلقی^۱، بهروز اکبری آدرگانی^{۲*}، علی احسانی^۳، الهه کوثری^{۴*} و ملک حکمتی^۵

۱. دانشجوی دکتری گروه شیمی آلی، دانشکده شیمی دارویی، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران، ایران.
۲. استاد مرکز تحقیقات آزمایشگاهی غذا و دارو، سازمان غذا و دارو، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تهران، ایران.
۳. استاد گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه قم، قم، ایران.
۴. استاد دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۵. دانشیار گروه شیمی آلی، دانشکده شیمی دارویی، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران، ایران.

دریافت: آذر ۱۴۰۰ بازنگری: اردیبهشت ۱۴۰۱ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۱

doi 10.30495/JACR.2022.1945657.1990

20.1001.1.17359937.1401.16.2.2.6

چکیده

اصلاح سطح گرافن اکسید با ایجاد یک پیوند کووالانسی می‌تواند ویژگی‌های این ماده را بهبود ببخشد. در پژوهش حاضر، سطح گرافن اکسید تهیه شده با مولکول ۶-آمینو-۲،۲'-بی پیریدین و تشکیل یک پیوند کووالانسی بین گروه‌های آمینی لیگاند و گروه‌های کربوکسیلیک اسید سطح گرافن اکسید، اصلاح و به صورت ABP-GO نام‌گذاری شد. با روش‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی فتوالکترون پرتو ایکس (XPS)، طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) و میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) ساختار و ریخت ترکیب اصلاح شده با لیگاندهای پیریدینی، تأیید شدند. ویژگی‌های الکتروشیمیایی الکتروکاتود اصلاح شده با روش‌های طیف‌سنجی رهنبدی الکتروشیمیایی (EIS)، ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (CV) و ولت‌آمپرسنجی عاری سازی آندی تپی تفاضلی (DPASV) بررسی شد. مساحت سطح زیاد و توانایی جذب سرب با رسانایی مناسب الکتروکاتود اصلاح شده حاکی از عملکرد مناسب حسگر Pb(II)، با حد تشخیص ۳ نانومولار بود. این الکتروکاتود به آسانی پیوند بین گروه NH_2 - و سرب (II) را مهیا می‌سازد و قابلیت به کارگیری دوباره و تکرار پذیری خوب (۵ بار و در حدود ۹۰ درصد) را به ترتیب فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: گرافن، ولت‌آمپرسنجی، حسگر، پیریدین

مقدمه

واکنش گرافن (و مشتق‌های آن) با مولکول‌های آلی و معدنی، اصلاح شیمیایی سطح ویژه بزرگ گرافن و همچنین، ارایه و بررسی برهم‌کنش‌های کووالانسی و غیرکووالانسی با گرافن، گزارش شده است [۹ تا ۱۱]. عامل‌دار کردن ورقه‌های گرافن با گروه‌های عاملی آلی برای چندین هدف توسعه یافته است. هدف اصلی، پراکندگی گرافن در حلال‌های آلی رایج است که به‌طور معمول پس از پیوند گروه‌های آلی ویژه به‌دست می‌آید. در بیشتر موارد، زمانی که مولکول‌های آلی به صورت کووالانسی با سطح گرافن پیوند برقرار می‌کنند، ویژگی‌های آروماتیک گسترده آن مختل می‌شود و امکان واپایش و ویژگی الکترونیکی آن را فراهم می‌کند. ایجاد شکاف نواری از راه دوپینگ شیمیایی یک روش قدرتمند برای به‌کارگیری گرافن در دستگاه‌های نانوالکترونیکی است [۱۴ تا ۱۶].

واکنش‌های عامل‌سازی کووالانسی آلی گرافن شامل دو مسیر کلی است: (الف) تشکیل پیوندهای کووالانسی بین رادیکال‌های آزاد یا دی‌انوفیل‌ها و پیوندهای $C=C$ از گرافن و (ب) تشکیل پیوندهای کووالانسی بین گروه‌های عاملی آلی و گروه‌های اکسیژن از GO. برپایه تجربه‌های عملی و نظری قبلی با فولرن و نانولوله‌های کربنی، جذاب‌ترین گونه‌های آلی برای واکنش با کربن‌های sp^2 گرافن، رادیکال‌های آزاد آلی و دی‌انوفیل‌ها هستند. به‌طور معمول هر دو اجزای واکنشی میانی هستند که تحت شرایط ویژه‌ای در حضور گرافن تولید می‌شوند.

در پژوهش حاضر، بر تهیه و فراوری مشتق جدیدی از گرافن اکسید تمرکز شده است. برپایه نتیجه‌های گزارش شده در مورد استفاده از گرافن اکسید عامل‌دار شده و کاربردهای آن، بر تهیه یک گرافن اکسید عامل‌دار شده حاوی نیتروژن با ایجاد پیوندهای کووالانسی آمیدی و اصلاح سطح، کار شد. در اینجا، گرافن اکسید از پیش آماده شده در حضور برمید ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیم (مایع یونی)، با ۶-آمینو-۲،۲'-بی‌پیریدین با پیوند کووالانسی عامل‌دار شد (ABP-GO). نمونه‌ها با روش‌های XPS, XRD, FTIR, XPS, XRD, FTIR.

گرافن، کربن دو بعدی هیبرید شده با هیبریداسیون sp^2 ، در حال حاضر، بدون هیچ شکلی، گسترده‌ترین ماده مورد مطالعه است. این ماده با ساختار ورقه‌ای از اتم‌های کربن با ضخامت تک اتم که به شکل لانه زنبوری چیده شده است، نازک‌ترین، قوی‌ترین و محکم‌ترین ماده جهان است و همچنین، دارای رسانایی بالا گرما و الکتریسیته است. جای تعجب نیست که این ماده دو بعدی، از نظر کاربردی، حتی امیدوارتر از سایر آلوتروپ‌های کربن نانوساختار، یعنی نانولوله‌های یک بعدی و فولرن‌های صفر بعدی، در نظر گرفته شود [۱ تا ۳]. از زمان دستیابی نخستین شواهد تجربی مربوط به ویژگی الکترونیکی گرافن در سال ۲۰۰۴، تمرکز عمده پژوهش‌های تجربی بر توسعه مسیرهای مصنوعی جدید متمرکز شده است که امکان تولید موثر ورقه‌های به‌طور کامل مشخص را فراهم می‌کند. روش‌های متداول به‌کارگرفته‌شده شامل لایه‌برداری میکرومکانیکی یا شیمیایی گرافیت، رشد نهشت بخار شیمیایی (CVD)، کاهش شیمیایی، الکتروشیمیایی، گرمایی یا فوتوکاتالیستی گرافن اکسید است [۳ تا ۵].

روش‌های توسعه‌یافته برای آماده‌سازی گرافن امکان مشاهده ویژگی‌های بی‌همتا از جمله اثر هال کوانتومی نیم صحیح^۱ را برای الکترون‌ها و حفره‌ها حتی در دمای اتاق، تحرک بسیار بالا و تشخیص تک‌مولکولی^۲ فراهم می‌کند. گرافن همچنین، ویژگی‌های برتر دیگری را از نظر ماهیت الکترونیکی، مکانیکی، نوری و حمل و نقل نشان می‌دهد. با این ویژگی‌های بی‌همتا و برتر، گرافن قابلیت کاربردهای زیادی را در صفحه‌های لمسی، خازن‌ها، سلول‌های سوختی، باتری‌ها، حسگرها، حذف مواد سمی و دستگاه‌های الکترونیکی انعطاف پذیر، نشان داده است [۶ تا ۸]. پژوهش‌های زیادی در باره عامل‌دار کردن گرافن شامل

1. Half-integer quantum Hall effect

2. Single-molecule detection

تهیه گرافن اکسید با ۶-آمینو-۲،۲-بی پیریدین^۱ در مرحله بعد، پودر GO تهیه شده (۲ گرم) به مایع یونی برمید ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیم (BMI-Br⁺) و تری فنیل فسفیت (TPP⁺) افزوده شد و در دمای ۸۰ C° هم زده شد. TPP به عنوان یک عامل متراکم عمل می کند و مایع یونی BMI-Br هم به عنوان کاتالیست و هم به عنوان حلال برای پلی تراکم مستقیم به سمت فعال کردن سطح گرافن اکسید عمل می کند. سپس، آمینو-۲،۲-بی پیریدین به محلول به دست آمده افزوده و ۲ ساعت هم زده شد تا گرافن اکسید عامل دار شده با ۶-آمینو-۲،۲-بی پیریدین (ABP-GO) تولید شود.

مواد و دستگاهها

همه مواد اولیه با درصد خلوص بالا، از شرکت سیگما-آلدیچ خریداری شدند. گرافن اکسید تهیه شده و گرافن اکسید عامل دار شده (۶-آمینو-۲،۲-بی پیریدین (ABP-GO)) برای تایید ساختار متخلخل مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این کار روش های طیفسنجی فتوالکترونی پرتو ایکس (XPS) با دستگاه Thermo Scientific Multilab 2000 ساخت امریکا با به کارگیری Al K α X-ray (1486.6 eV) (و در شرایط 15kV، 25 W و 10⁻⁹ Pa)، طیفسنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) با سامانه JACSO-FTIR-410 ساخت آلمان، تجزیه وزنسنجی گرمایی (TGA) با سامانه TG 209F3 NETZSCH ساخت آلمان و پراش پرتو ایکس (XRD) با به کارگیری دستگاه X'Pert-MPD ساخت هلند، میکروسکوپ الکترونی روبشی (S4160 Hitachi) ساخت ژاپن، میکروسکوپ الکترونی عبوری (Zeiss Leo 912 AB(120KV) ساخت آلمان به کار گرفته شدند. درصد اتمها در گرافن اکسید و ABP با نقشه برداری

EDS، FESEM و TEM شناسایی شدند. ماده تهیه شده در این کار، به دلیل حضور گروه های عاملی جدید، توانایی کاربرد در سامانه های متفاوت، مانند فرایندهای الکتروشیمیایی، جذبها، حسگرها و غیره را دارد.

بخش تجربی

آماده سازی گرافن اکسید

گرافن اکسید شامل ورقه های گرافن است که دارای گروه های هیدروکسیل و اپوکسید است. آماده سازی پودر گرافن اکسید بر پایه روش هامر همان طور که در مقاله های منتشر شده پیشین توضیح داده شده است، انجام شد [۱۷ تا ۲۰]. به طور مرتب، پودرهای NaNO₃ (۲ گرم) و گرافیت (۲ گرم) به تدریج در محلول H₂SO₄ (۵۰ میلی لیتر، ۹۸٪) در یک فلاسک حجمی (۱ لیتر) با هم زدن مداوم در حمام یخ (۵۰ C°) برای ۲ ساعت مخلوط شدند. سپس، KMnO₄ (۶ میلی گرم) به عنوان یک عامل اکسیدکننده قوی، به آرامی به تعلیق افزوده و دما در حدود ۱۵ C° متعادل شد. پس از آن، حمام یخ برداشته شد و تعلیق به طور متوسط در دمای ۳۰ C° هم زده شد تا به لجن خمیری قهوه ای تبدیل شود. هم زدن ۴۸ ساعت ادامه داشت. سپس، مخلوط با ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر رقیق شد (به آهستگی افزوده شد) و تعلیق قهوه ای رنگ همراه با جوشش و افزایش دما تا ۹۸ C° تولید شد. این مخلوط به طور پیوسته هم زده و با افزودن آب اضافی (۲۰۰ میلی لیتر) رقیق شد. واکنش با افزودن آرام ۲۰ میلی لیتر H₂O₂ (۳۰ درصد) پایان یافت. پس از آن، مخلوط به مدت ۲ ساعت دیگر هم زده شد. برای به دست آوردن یک مخلوط خالص، لجن به دست آمده با HCl (۱۰ درصد) و آب یون زدوده (DI) پانزده بار شسته شد و سپس با گریزانه جداسازی انجام شد. در نهایت، پودر قهوه ای گرافن اکسید پس از صاف و خشک شدن در خلأ در دمای اتاق به دست آمد.

1. 6-amino-2,2'-bipyridine

2. 1-butyl-3-methyl-imidazolium

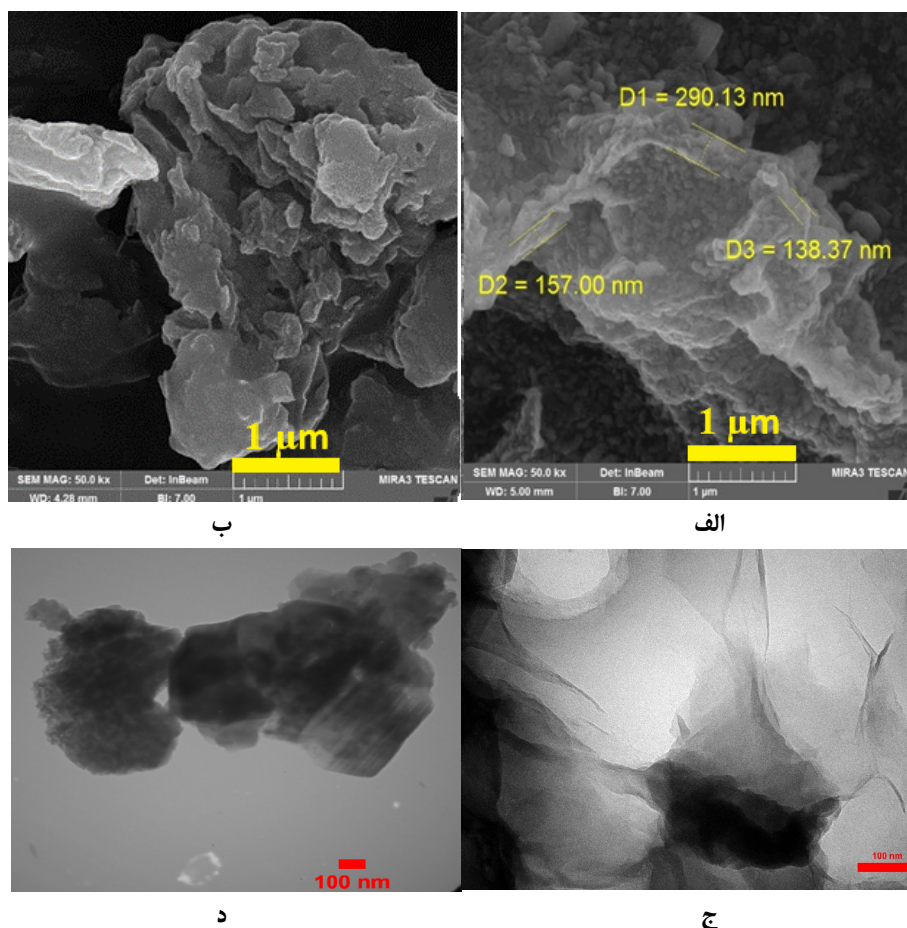
ریخت‌شناسی و تجزیه عنصری نمونه‌ها با روش‌های SEM، EDS و TEM

با قراردادان ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین به‌عنوان یک پیش‌برنده^۲ عامل‌دار، ریخت تک لایه به طور نسبی متمایز شد، که به روشنی از پیکربندی اولیه، قابل تشخیص است. تصاویر SEM (شکل ۱-الف و ب) و TEM (شکل ۱-ج و د) یک ساختار چند لایه از گرافن اکسید و ABP-GO را با لبه‌های تیز کمی چروک نشان می‌دهد. ساختار کم اصلاح‌شده، ولی لایه‌لایه بیشتر با سطح ناهموار ناشی از پیوند ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین، تجمع کمتری را نشان می‌دهد. این عامل‌دارشدن، روش اصلاح را در جلوگیری از جمع‌شدن دوباره لایه‌های گرافن اکسید نشان می‌دهد. افزون‌براین، تصاویر TEM هم برای گرافن اکسید و هم برای ABP-GO، جهت‌گیری لایه‌ای کم‌رنگ از مولکول‌های مهمان ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین را در ریخت ورقه‌مانند ABP-GO نشان می‌دهند.

نتیجه‌های نقشه‌برداری EDS گرافن اکسید خالص در برابر گرافن اکسید ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین (ABP-GO) نشان داد که نسبت اتم‌های ارایه‌شده در ABP-GO با قرارگرفتن گروه‌های عاملی حاوی نیتروژن در ساختار GO تغییر کرد. نقشه‌برداری EDS همچنین، حضور اتم‌های N، C و O توزیع شده را نشان داد. مقادیر آن‌ها در ABP-GO نسبت به گرافن اکسید متفاوت بود. ریخت‌شناسی ABP-GO برپایه تصویرهای SEM و TEM و توزیع اتم‌های ارایه‌شده در نقشه‌برداری EDS، پیوند موفقیت‌آمیز ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین در سطح GO را تایید کردند [۲۷ تا ۲۹].

EDS بررسی شد. برای انجام آزمایش‌های ولت‌آمپرسنجی دستگاه ایویوم (IviumSoft) به‌کارگرفته شد. الکتروکربن، میله گرافیت و الکتروکد Ag/AgCl، به ترتیب به عنوان الکترودهای کار، مقابل و مرجع مورد استفاده قرار گرفتند. ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (CV^۱) و طیف‌سنجی رهنیدی الکتروشیمیایی (EIS^۲) با استفاده از پتانسیواستات /گالوانوستات (Vertex Ivium V21508) انجام شد. طیف‌های FTIR

با طیف‌های FTIR پیوندهای هر دو نمونه گرافن اکسید و ABP-GO شناسایی شدند. برای نمونه گرافن اکسید، پیک ناحیه^۱ ۳۴۰۹ cm^{-۱} مربوط به ارتعاش کششی پیوند O-H (-COOH) است. همچنین، پیک‌های ناحیه‌های ۱۰۷۲ cm^{-۱}، ۱۶۲۹ cm^{-۱} و ۱۷۲۹ cm^{-۱} به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های پیوندهای C-O، C=C و C=O هستند. برای نمونه ABP-GO پیک‌های ناحیه‌های ۱۱۱۴ cm^{-۱} و ۱۲۸۵ cm^{-۱} به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی C-O و (حلقه پیریدین) C-H هستند. همچنین، پیک ناحیه^۱ ۱۳۸۵ cm^{-۱} مربوط به پیوند C=C و پیک ناحیه^۱ ۱۶۲۹ cm^{-۱} مربوط به ارتعاش کششی پیوند C=N در حلقه پیریدین است. وجود پیک‌هایی در ناحیه‌های ۱۷۱۷ cm^{-۱}، ۲۹۲۸ cm^{-۱} و ۳۴۲۲ cm^{-۱} به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های پیوندهای C=O گروه کربنیل، C-H و OH- هستند. حضور پیوندهای متفاوت و به‌ویژه مشاهده پیک مربوط به گروه کربنیل در ساختار، نشانگر موفقیت‌آمیز بودن تشکیل پیوند کوالانسی با ایجاد یک گروه آمیدی است.



شکل ۱ تصاویر SEM برای نمونه گرافن اکسید خالص (الف) و ABP-GO (ب) و تصاویر TEM برای نمونه گرافن اکسید خالص (ج) و ABP-GO (د)

منجر به افزایش آب‌دوستی گرافن اکسید شده است. در نمودار گرمایی گرافن اکسید خالص، دومین کاهش وزن بین ۱۷۵ تا ۲۵۰ °C (حدود ۱۳ درصد کاهش وزن) ناشی از تجزیه گرمایی گروه‌های عاملی اکسیژن بر نانوذره‌های گرافن اکسید است [۲۹]. پس از عامل‌دارشدن سطح نانوصفحه‌های گرافن اکسید با مولکول‌های ۶-آمینو-۲،۲-بی‌پیریدین، بیشینه نقطه پیک گرمایی به دام‌های پایین‌تر منتقل شد که نشان‌دهنده پایداری گرمایی کمتر نانوصفحه‌ها پس از فرایند عامل‌دارشدن است.

تجزیه وزن‌سنجی گرمایی (TGA)

نمودارهای TGA و DTG از گرافن اکسید خالص و عامل‌دار، کاهش جرم را در دو منطقه دمایی متفاوت در شکل ۲ نشان می‌دهد. در نمودار DTG گرافن خالص، نخستین پیک گرمایی بین ۲۵ تا ۱۲۰ °C به حذف مولکول‌های آب جذب‌شده نسبت داده می‌شود [۲۸]. در این منطقه، پیک گرمایی تیزتر در نمودار DTG مربوط به گرافن اکسید عامل‌دار شده نشان داد که وجود مولکول‌های ۶-آمینو-۲،۲-بی‌پیریدین روی نانوصفحه‌ها

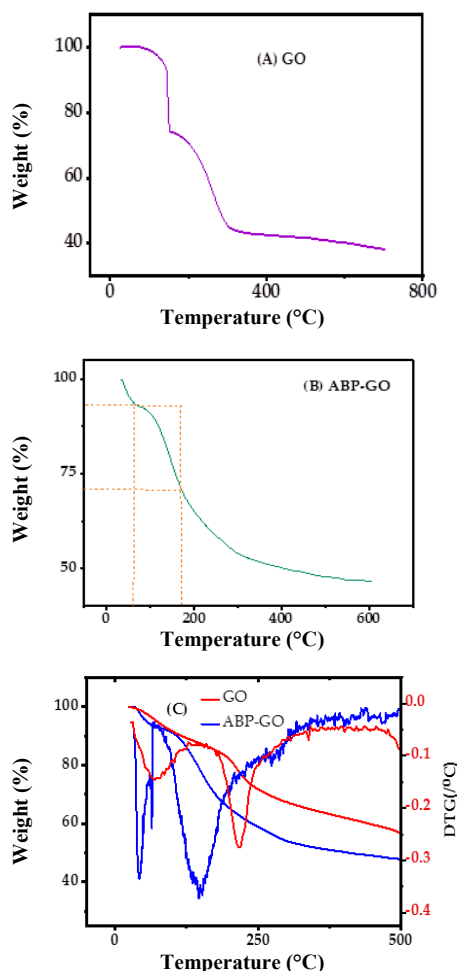
پراش پرتو ایکس (XRD)

لایه‌های خالص گرافن اکسید یک پیک واضح را در 2θ برابر با 11.6° درجه به عنوان معیار ساختار نشان می‌دهد. در مقایسه با ساختار گرافن اکسید، ABP-GO یک پیک جابه‌جا شده را در 2θ برابر با 24.6° درجه نشان می‌دهد. پیک جابه‌جاشده نشانه آن است که ABP-GO با ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین به عنوان یک مولکول کاربردی اصلاح شده است [۳۰ تا ۳۴].

طیف‌های XPS

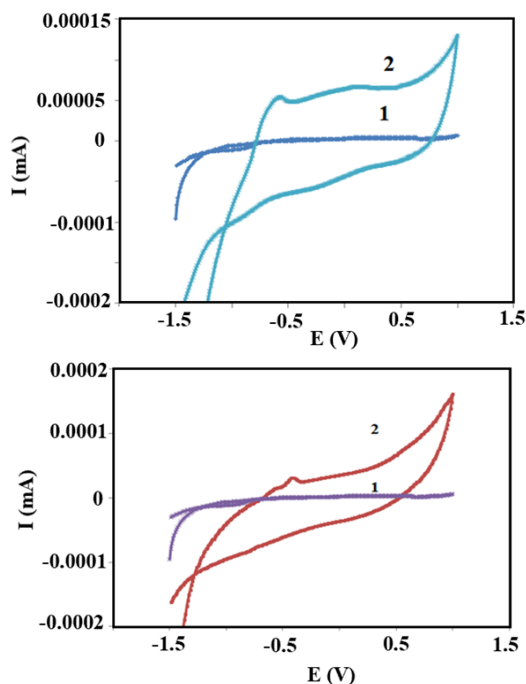
طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS)، گسترده‌ترین روش برای زمینه‌های پژوهشی متفاوت است که در آن امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق در مورد ساختار پیوند، شیمی سطح، و ترکیب سطوح وجود دارد [۳۵ تا ۳۹]. با توجه به عملکرد سطح گرافن اکسید، انتظار می‌رود که چند پیک در داده‌های XPS پدیدار شود که نشانه‌ای از پیوندها یا مواد جدید است. تجزیه و تحلیل طیف XPS در شکل ۳ نشان داده شده است. برپایه داده‌ها و واهم‌آمیخت^۱ طیف‌های XPS گرافن اکسید و ABP-GO، پیک‌های (C=O (287.6 eV)، C-C/C=C (284.7 eV)، O=C-O (288.4 eV)، C-O-C و C-OH (286.1 eV)، برای گرافن اکسید مشخص شد. برای ABP-GO (286.8 eV) تهیه شده، پیک‌های (C=N (283.6, 38.6%)، (284.36, 36.7%)، (285.36, 16.1%)، C-N، N-C=O (286.42, 6.1%) و (287.57, 25%) C=O پدیدار شدند. پیک‌های پدیدار شده جدید، نشانه عامل‌دار کردن موفق گرافن اکسید برای تهیه نمونه ABP-GO است [۴۰ تا ۴۲].

کاهش وزن بیشتر در ناحیه دوم نمودار گرمایی گرافن اکسید عامل‌دار (حدود ۲۸ درصد) در مقایسه با گرافن اکسید خالص، به تجزیه گرمایی مولکول‌های جذب‌شده بر سطح نانوصفحه‌های گرافن اکسید مربوط می‌شود. این نتیجه‌ها بیانگر عامل‌دار کردن موفق نانوصفحه‌های گرافن اکسید با مولکول‌های ۶-آمینو-۲،۳-بی‌پیریدین است.



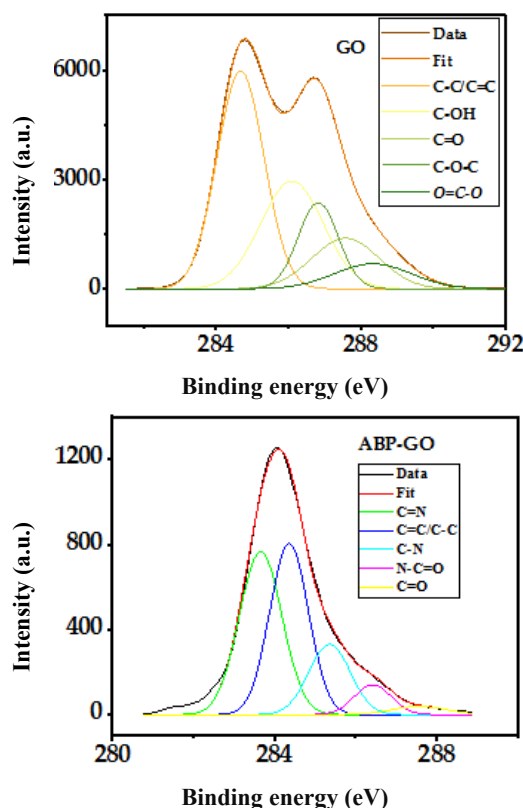
شکل ۲ وزن‌سنجی گرمایی (TGA) برای گرافن اکسید (A) و نمونه ABP-GO (B) و نمودار DTG برای هر دو نمونه در بازه دمایی صفر تا 500°C (C)

عملکرد خازنی الکترودهای CPE را بهبود بخشیده‌اند. یکی از مهم‌ترین عامل‌های الکتروود بررسی سنتیک انتقال بار در سرعت روبش متفاوت است. منحنی‌های CV از الکترودهای اصلاح شده عملکرد خازنی ایده‌آل را در سرعت روبش بالا نشان داد و شکل مستطیلی آن حفظ شد. با سرعت روبش، مقدار انحراف از مستطیل، به روشنی مشخص شد که می‌توان به مقاومت الکتروود الکتروولت نسبت داد.



شکل ۴ نمودارهای ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای به‌دست‌آمده برای GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CPE و ABP-GO-CPE در مقایسه با CPE در سرعت روبش ۱۰۰ میلی‌ولت بر ثانیه در محلول بافر

اندازه‌گیری ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (CV) برای در نظر گرفتن رفتار الکتروشیمیایی الکتروود اصلاح‌شده در محیط [5 mM] Fe³⁺/Fe²⁺ در الکتروولت حامل KCl ۰/۱ مولار انجام شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک جفت پیک اکسایش-کاهش برای CPE پدیدار شده است. با اصلاح



شکل ۳ طیف‌های XPS و واهم‌آمیخت آن‌ها برای گرافین اکسید خالص و نمونه ABP-GO

بررسی الکتروشیمیایی

نمودار ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (CV) در یک الکتروولت حامل برای دو الکتروود GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CPE و ABP-GO-CPE در مقایسه با CPE^۱ در شکل ۴ نشان داده شده است. هیچ پیک اکسایش-کاهش در طی چرخه‌ها در گستره پتانسیل اعمال‌شده، ثبت نشده است (۱/۵ تا -۱/۵ ولت). نمودار CV الکتروود اولیه و اصلاح‌شده با شکل‌های دگرگون‌شده، نشان‌دهنده توانایی اصلاح سطح خمیر کربن است. افزون‌براین، الکترودهای اصلاح‌شده عملکرد خازنی ایده‌آل را نشان می‌دهند. به بیان دیگر، GO-imi-(CH₂)₂NH₂ و ABP-GO-CPE

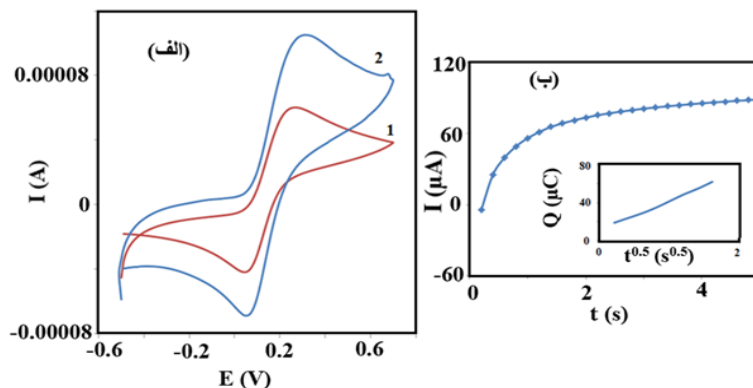
1. Carbon paste electrode (CPE)

تهیه و تشخیص ساختار گرافن اکسید عامل دار شده با ۶-آمینو ...

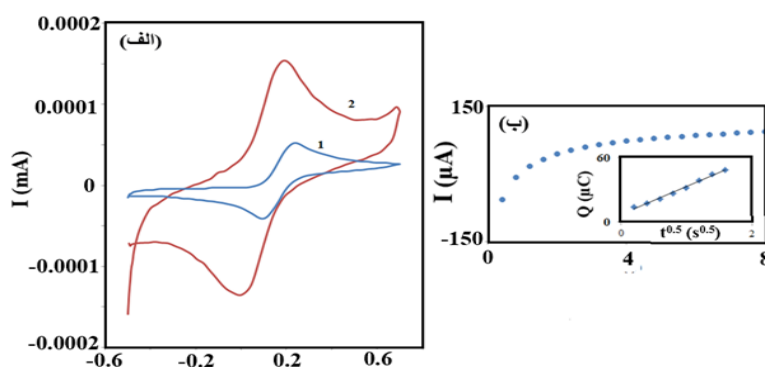
$$Q(t) = \frac{2nFACD^{0.5}t^{0.5}}{\pi^{0.5}} + Q_{dl} + Q_{ads} \quad (1)$$

همان طور که در داخل شکل ۵-ب نشان داده شده است، شیب به دست آمده از نمودار $Q-t^{1/2}$ برای CPE (1) و GO-imi- $(CH_2)_2NH_2$ (2) به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۳۴ به دست آمد. این شیب برای ABP-GO-CPE و CPE به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۱۲ است (شکل ۶). در مقایسه با الکترواد CPE، الکترواد GO-imi- $(CH_2)_2NH_2$ /CPE و نیز ABP-GO-CPE سطح موثر بیشتری را به دلیل داشتن مکان فعال الکتروشیمیایی نشان می دهند.

الکترواد با گرافن عامل دار شده، هر دو جریان پیک کاتدی و آندی به علت رسانایی الکتریکی بسیار GO-imi- $(CH_2)_2NH_2$ و ۶-آمینو-۲،۳-پی پیریدین افزایش یافته اند. این نشان می دهد که ترکیبی از GO-imi- $(CH_2)_2NH_2$ با تسهیل انتقال الکترون، فعالیت زوج اکسایش-کاهش را در سطح الکترواد تقویت می کند. از فن کرومیکولومتری مبتنی بر Fe^{+3}/Fe^{+2} استفاده شد تا سطح الکتروشیمیایی فعال (A) با توجه به معادله آنسون به دست آید. بار لایه دو گانه الکتریکی و بار فارادیک به ترتیب Q_{ads} و Q_{dl} نشان داده شده اند و عامل های n ، c ، D و F به ترتیب، به تعداد الکترون رد و بدل شده، غلظت گونه، ضریب انتشار $K_3[Fe(CN)_6]$ در $(7.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1})$ $[0.1 \text{ M}]$ KCl و ثابت فارادی $(96485 \text{ C mol}^{-1})$ نسبت داده می شوند.



شکل ۵ نمودارهای ولت آمپرسنجی چرخه ای CPE (1) و GO-imi- $(CH_2)_2-NH_2$ (2) (الف) و نمودار $I-t$ نمونه اصلاح شده GO-imi- $(CH_2)_2-NH_2$ -CPE (ب) در $[K_3[Fe(CN)_6] 0.1005 \text{ مولار}]$ نمودار داخل شکل ب: نمودار $Q-t^{0.5}(s^{0.5})$ نمونه GO-imi $(CH_2)_2-NH_2$ -CPE در $[K_3[Fe(CN)_3] 0.1005 \text{ مولار}]$



شکل ۶ نمودارهای ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (1) CPE و (2) ABP-GO-CPE (الف) و نمودار I-t نمونه ABP-GO-CPE اصلاح‌شده در $0.105 \text{ M K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ مولار (ب) (نمودار داخل: نمودار $Q-t^{0.5} (\text{s}^{0.5})$ در $0.105 \text{ M K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ مولار)

انتقال الکترون برای ABP- و GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CP و GO-CP به ۲۳۶/۲۱ و ۲۵۸/۴۹ به دست آمد. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد فیلم ABP- و GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CPE یک بستر مناسب برای انتقال الکترون بین الکترولیت و الکتروده فراهم می‌کند.

در حضور بافر اسات (pH برابر با ۵/۰)، عملکرد الکتروشیمیایی ۰/۰۱ مولار و ۲۰۰ نانومولار سرب (II) در CPE، GO-imi-(CH₂)₂NH₂/CPE و ABP-GO-CPE با روش‌های CV و ولت‌آمپرسنجی عاری‌سازی آندی تپی تفاضلی (DPASV^۳) بررسی شد. در نمودار CV (برای ۰/۰۱ مولار) و DPASV (برای ۲۰۰ نانومولار پس از فرایند رسوب)، پیک نواری به صورت جزئی برای CPE خالص پدیدار شد، در حالی که جریان پیک بالاتر برای GO-CPE و imi (CH₂)₂NH₂ ABP-GO-CPE مشاهده شد. نشانک‌های تقویت‌شده از GO-imi-(CH₂)₂NH₂/CPE و ABP-GO-CPE نه تنها انتقال الکترونی آسان با رسانایی بسیار از مولکول‌های GO-imi-(CH₂)₂NH₂ را تایید

سینتیک الکتروده و مقاومت الکترونی چندسازه GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CPE و ABP-GO-CPE با روش طیف‌سنجی رهنبدی الکتروشیمیایی (EIS^۱) بررسی شد. برپایه نمودارهای نایکویست الکترودها در $0.105 \text{ M K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ مولار که قطر نیم دایره نشان‌دهنده مقاومت در برابر انتقال بار (R_{ct}) است، با قراردادن GO-imi-(CH₂)₂NH₂ بر ABP-GO-CPE، این قطر به‌طور آشکار کوچک‌تر شد که به معنی کاهش مقاومت انتقال بار است. برپایه اندازه‌گیری EIS، ثابت سرعت انتقال الکترون (k_{ct}) پیش‌بینی شده برای GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CPE با معادله ۲ به دست می‌آید. در معادله ذکر شده "CPE" و " R_{ct} " به ترتیب عنصر فاز ثابت^۲ و مقاومت انتقال بار را توصیف می‌کنند.

$$k_{ct} = 1/2(R_{ct})(CPE) \quad (۲)$$

با نرم‌افزار Z-View مقدار CPE و R_{ct} برای GO-imi-(CH₂)₂NH₂-CP به ترتیب برابر با $۲/۱۶ \mu\text{Fs}^{-1}$ و ۹۸۰Ω و برای ABP-GO-CPE برابر با $۲/۸۵ \mu\text{Fs}^{-1}$ و ۸۲۰Ω محاسبه شد. بنابراین، برپایه معادله ۲، مقدار ثابت

1. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

2. Constant phase element

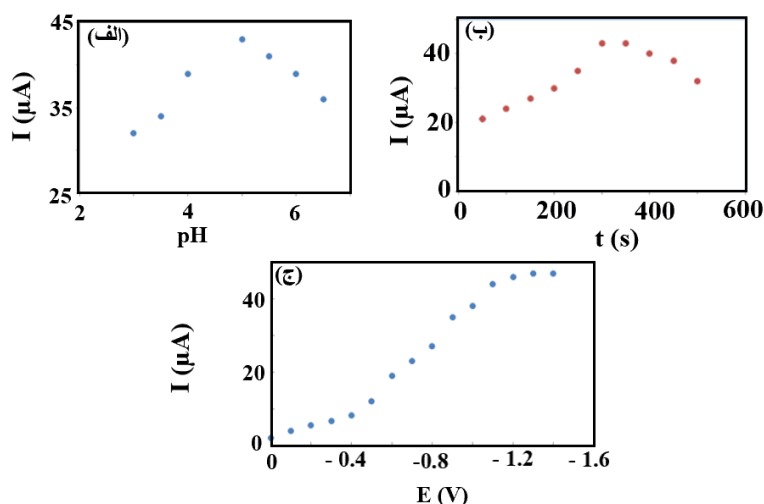
3. Differential pulse anodic stripping voltammetry (DPASV)

می کنند، بلکه گروه های -NH_2 در $\text{GO-imi-(CH}_2\text{)}_2\text{NH}_2$ و نیز مولکول های ۶-آمینو-۲،۲'-بی پیریدین در ABP-GO-CPE به سادگی می تواند با سرب (II) پیوند تشکیل دهد و منجر به افزایش تجمع سرب در سطح الکتروود در طی فرایند رسوب شود.

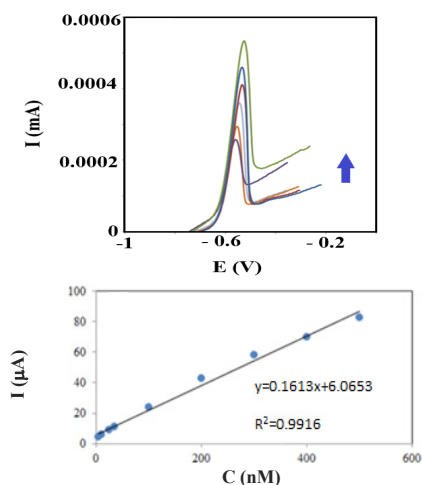
برپایه نمودار ولت آمپرسنجی چرخه ای یون های سرب در محلول بافر استات، جریان پیک اکسایش در سطح الکتروود اصلاح شده $\text{GO-imi-(CH}_2\text{)}_2\text{NH}_2 / \text{CPE}$ بیشتر بود که نشان می دهد الکتروود سطح فعال بیشتری برای واکنش سرب دارد. برای بررسی رفتار الکتروشیمی غلظت های پایین سرب، روش DPASV به کار برده شد.

برای تعیین سرب (II) به کمک حسگر الکتروشیمیایی در محلول $300/0$ نانومولار ابتدا با اعمال پتانسیل $1/1 \text{ V}$ یون های سرب در سطح الکتروود رسوب داده شد (300 ثانیه) و سپس با روش پالس ولت آمپرسنجی، اکسایش آن ها بررسی شد. همان طور که در شکل ۷-الف مشاهده می شود، با افزایش تدریجی pH محلول، جریان افزایش می یابد تا زمانی که بیشترین جریان در pH برابر با $5/0$ مشاهده می شود. فرض بر این است که در شرایط اسیدی و بازی مزاحمت یون های H^+ می تواند جریان گونه مورد نظر را کاهش دهد [۲۰، ۷۱ و ۷۳].

در حالی که گاهی جریان پیک ممکن است از تشکیل مشتق های Pb(OH)_x به وجود آید. برپایه مشاهده های آزمایشی، pH برابر با ۵ بهینه شده برای آزمون های الکتروشیمیایی با پتانسیل $1/1$ - ولت مورد استفاده قرار داده شد. با پتانسیل $1/1$ - ولت، روش رسوب گذاری در بازه زمانی ۵۰ تا ۵۰۰ ثانیه در بافر استات (pH برابر با ۵) انجام شد. همان طور که در شکل ۷-ب مشاهده می شود، از آغاز فرایند جریان پیک پیش از رسیدن به 100 ثانیه به آرامی بالا می رود و سپس به سرعت افزایش می یابد تا به بالاترین نقطه در 300 ثانیه برسد. افزون بر این، به دلیل اهمیت زیاد پتانسیل ترسیب مناسب برای اندازه گیری ها، جریان پیک در پتانسیل های ترسیب متفاوت در شکل ۷-ج در زمان ایده آل (300 ثانیه) و پتانسیل ($1/6$ - تا 0) ولت ثبت شد. برپایه نمودار I-V نشان داده شده در شکل ۷-ج جریان در گستره ($1/6$ - تا 0) ولت روند صعودی را طی می کند و به سرعت افزایش می یابد تا پتانسیل به اندازه $1/1$ - ولت برسد. اگرچه با افزایش پتانسیل جریان پیک در پتانسیل $1/3$ - ولت مشاهده می شود به منظور محدود کردن تولید H_2 و همچنین، محدود کردن رسوب گذاری یون های فلزی پتانسیل $1/1$ - ولت بهتر خواهد بود و به عنوان پتانسیل کارآمدتر تعیین می شود.



شکل ۷ تاثیر pH زمان ترسیب (الف)، پتانسیل ترسیب (ب) و پاسخ DPASV ماده $\text{-NH}_2/\text{CPE GO-imi-(CH}_2)_2$ در بافر استات (pH = ۵) حاوی Pb^{2+} ۳۰۰ نانومولار (ج)



شکل ۸ پاسخ DPASV ماده $\text{GO-imi-(CH}_2)_2\text{-NH}_2/\text{CPE}$ با غلظت‌های متفاوت از Pb(II) در بافر استات (pH = ۵) (الف) و نمودار واسنجی خطی مربوط به جریان‌های پیک برای سرب (II) (ب)

روش DPASV ارتباط جریان پیک و غلظت سرب (II) برای نمونه $\text{GO-imi-(CH}_2)_2\text{-NH}_2$ بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۸-الف نشان داده شده است پیک‌های به‌طور کامل مشخص Pb^{2+} در پتانسیل -0.58V پدیدار می‌شوند. افزون‌براین، در غلظت‌های متفاوت از Pb^{2+} (۵ تا 300 نانومولار) یک رابطه خطی بین غلظت با جریان پیک وجود دارد. در مورد تشخیص Pb^{2+} ، با نسبت نشانک به نوفه (S/N) برابر با ۳، مقدار LOD برابر با 0.3 میلی‌مولار تخمین زده می‌شود و نمودار واسنجی مربوط، به‌صورت خط مستقیم با ضریب تعیین 0.9916 به‌دست آمد (شکل ۸-ب). با توجه به نتیجه‌های به‌دست‌آمده، حد تشخیص در حسگر ذکر شده با مواد سنجش‌شده پیشین گزارش شده، قابل مقایسه است.

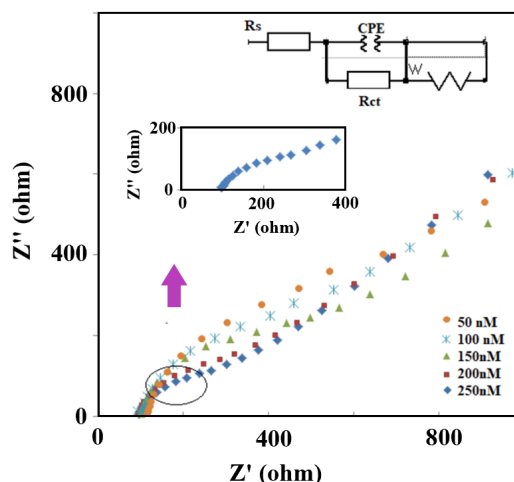
شکل ۹ نمودارهای نایکویست الکترو- $(CH_2)_2$ -GO-imi- NH_2/CPE را که در پتانسیل پیک ثبت شده است به عنوان دی-سی-افست^۱ مربوط به چندین غلظت از Pb^{2+} نشان داده شده است. مدار معادل متناسب با نمودار نایکویست در حضور $Pb(II)$ در شکل ۹ ارایه شده است. در مدار معادل، خازن (C) برای دستیابی به یک رهنبدی شبیه سازی شده معقول، لازم است که با یک عنصر فاز ثابت (CPE) جایگزین شود. در مدار معادل الکتریکی، مقاومت انتقال بار (R_{ct})، عنصر فاز ثابت (CPE_{dl}) و مقاومت محلول (R_s) برای در نظر گرفتن عامل های مرتبط ارایه شده است. افزون بر این، فرایند انتشار توسط واربراک به عنوان عنصر الکتریکی توصیف شده است. برپایه شکل ۹ افزایش غلظت Pb^{+2} قطر نیم دایره را کاهش می دهد.

جدول ۱ نتیجه های تعیین سرب (II) در نمونه های گیاهی برای ۳ اندازه گیری متوالی

نمونه	Pb(II) افزوده شده (نانومولار)	Pb(II) یافت شده (نانومولار)	درصد بازیابی
۱	۱۰۰	۱۰۲	۱۰۲
۲	۱۵۰	۱۴۷	۹۸
۳	۲۰۰	۱۹۱	۹۵

نتیجه گیری

در این کار با توجه به ویژگی های بی همتای گرافن اکسید، سعی در تهیه و معرفی عاملی برای اصلاح سطح گرافن اکسید بود. در این کار، سطح گرافن اکسید با مولکول های ۶-آمینو-۲،۲-بی پیریدین به صورت کوالانسی عامل دار شد. مقایسه تغییر درصد اتمها در ABP-GO نسبت به گرافن اکسید خالص، تصاویر SEM و TEM تغییر شکل ساختار و ریخت را در اثر حضور مولکول های جدید



شکل ۹ نمودار نایکویست $GO-imi-(CH_2)_2-NH_2/CPE$ با غلظت های متفاوت از $Pb(II)$ در بافر استات (pH = ۵)

برپایه آزمون تداخل سنجی، غلظت ۴۰ برابر یون های فلزی به بافر استات با غلظت ۳۰۰ نانومولار از Pb^{2+} برای ارزیابی توانایی ضد تداخل $GO-imi-(CH_2)_2-NH_2/CPE$ وارد شد. نتیجه ها نشان می دهد ارایه تغییرات خطی حدود

پیوند بین گروه NH_2^- و سرب (II) را مهیا ساخت و با قابلیت استفاده دوباره و تکرارپذیری خوب (۵ بار و در حدود ۹۰ درصد) را به ترتیب فراهم کرد. الکترودهای اصلاح شده پس از هر مرتبه اندازه‌گیری به انجام مراحل پاک‌سازی الکتروود مانند پوشش‌های پتانسیلی و یا استفاده از محلول‌های ویژه و به‌طور کلی انجام مراحل وقت‌گیر نیاز ندارد و همین موضوع موجب می‌شود که زمان یک آزمون تا حد زیادی کاهش یابد. این الکتروود نیازی به آماده‌سازی اولیه ندارد و هر بار پس از تهیه می‌تواند به‌طور آنی استفاده شود. از ویژگی‌های این الکتروود می‌توان به سادگی فرایند تهیه آن، هزینه پایین ساخت، سطح قابل تجدید، پایداری زیاد و سمیت کم مواد مورد نیاز در ساخت اشاره کرد. این روش، مسیر خوبی را برای توسعه گرافن‌های عامل‌دار شده در بسیاری از کاربردها هموار خواهد کرد.

نشان دادند. تهیه این ماده جدید به دلیل حضور ناجوراتم‌ها و ساختار اصلاح شده، به احتمال زیاد عملکرد خوبی در فرایندهای الکتروشیمیایی و جذب و نیز به‌کارگیری در کاتالیست‌ها، و حسگرها خواهد داشت. الکتروود خمیر کربن اصلاح شده با دو ترکیب ABP-GO و GO-imi- برای اندازه‌گیری سرب به‌کار گرفته شد. بررسی الکتروشیمیایی الکتروود اصلاح شده با روش‌های طیف‌سنجی رهنبدی الکتروشیمیایی (EIS)، ولت‌آمپرسنجی چرخه‌ای (CV) و ولت‌آمپرسنجی عاری سازی آندی پالس تفاضلی (DPASV) انجام شد.

مساحت سطحی زیاد و توانایی جذب سرب با رسانایی مناسب الکتروود اصلاح شده حاکی از عملکرد مناسب حسگر pb(II) با حد تشخیص ۳ نانومولار بود. این الکتروود به‌آسانی

مراجع

- Georgakilas, V.; Otyepka, M.; Bourlinos, A.B.; Chandra, V.; Kim, N.; Kemp, K.C.; Hobza, P.; Zboril, R.; Kim, K.S.; Chem. Rev. 112, 6156–6214, 2012.
- Ahirrao, D.J.; Mohanapriya, K.; Jha, N.; Mater. Res. Bull. 108, 73–82, 2018.
- Chen, D.; Feng, H.; Li, J.; Chem. Rev. 112, 6027–6053, 2012.
- Yu, W.; Sisi, L.; Haiyan, Y.; Jie, L.; RSC Adv. 2020, 10, 15328–15345, 2007.
- Yu, W.; Sisi, L.; Haiyan, Y.; Jie, L.; RSC Adv. 10, 15328–15345, 2020.
- Rabchinskii, M.K.; Ryzhkov, S.A.; Kirilenko, D.A.; Ulin, N.V.; Baidakova, M. V; Shnitov, V. V; Pavlov, S.I.; Chumakov, R.G.; Stolyarova, D.Y.; Besedina, N.A.; Sci. Rep. 10, 1–12, 2020.
- Huang, X.-M.; Liu, L.-Z.; Zhou, S.; Zhao, J.-J. P.; Front. Phys. 15, 1–70, 2020.
- Marlinda, A.R.; Yusoff, N.; Sagadevan, S.; Johan, M.R.; Int. Hydrogen Energy. 45, 11976–11994, 2020.
- Tewatia, K.; Sharma, A.; Sharma, M.; Kumar, A.; Mater. Today Proc. 44, 3933–3938, 2021.
- Radsar, T.; Khalesi, H.; Ghods, V.; Opt. Quantum Electron. 53, 1–38, 2021.
- Lingamdinne, L.P.; Lee, S.; Choi, J.-S.; Lebaka, V.R.; Durbaka, V.R.P.; Koduru, J.R.; Hazard. Mater. 402, 123882, 2021.
- Hamilton, C.E.; Lomeda, J.R.; Sun, Z.; Tour, J.M.; Barron, A.R.; Nano Lett. 9, 3460–3462, 2009.
- Bourlinos, A.B.; Georgakilas, V.; Zboril, R.; Steriotis, T.A.; Stubos, A.K.; small, 5, 1841–1845, 2009.
- Lu, B.-Y.; Zhu, G.-Y.; Yu, C.-H.; Chen, G.-Y.; Zhang, C.-L.; Zeng, X.; Chen, Q.-M.; Peng, Q.; Nano Res. 14, 185–190, 2021.
- Ghourri, Z.K.; Elsaid, K.; Badreldin, A.; Nasef, M.M.; Jusoh, N.W.C.; Abdel-Wahab, A.; Mol. Catal. 516, 111960, 2021.
- Song, H.; Wang, Z.; Yang, J.; Jia, X.; Zhang, Z.; Chem. Eng. J. 324, 51–62, 2017.
- Ajdari, F.B.; Kowsari, E.; Ehsani, A.; Schorowski, M.; Ameri, T.; Electrochim. Acta. 292, 789–804, 2018.
- Boorboor Ajdari, F.; Kowsari, E.; Ehsani, A.; Chepyga, L.; Schirowski, M.; Jäger, S.;

- Kasian, O.; Hauke, F.; Ameri, T.; Appl. Surf. Sci. 459, 874-883, 2018.
19. Ajdari, F.B.; Kowsari, E.; Ehsani, A.; Solid State Chem. 265, 155-166, 2018.
 20. Ehsani, A.; Kowsari, E.; Ajdari, F.B.; Safari, R.; Shiri, H.M.; Colloid Interface Sci. 497, 258-265, 2017.
 21. Azarifar, D.; Khaleghi-Abbasabadi, M.; Res. Chem. Intermed. 45, 199-222, 2019.
 22. Hanoon, H.D.; Kowsari, E.; Abdouss, M.; Ghasemi, M.H.; Zandi, H.; Res. Chem. Intermed. 43, 4023-4041, 2017.
 23. Ehsani, A.; Mohammad Shiri, H.; Kowsari, E.; Safari, R.; Torabian, J.; Kazemi, S.; Colloid Interface Sci. 478, 181-187, 2016.
 24. Beydaghi, H.; Javanbakht, M.; Kowsari, E.; Polymer (Guildf) 87, 26-37, 2016.
 25. Mombeshora, E.T.; Nyamori, V.O.; Mater. Sci. Mater. Electron. 28, 18715-18734, 2017.
 26. Khaleghi Abbasabadi, M.; Khodabakhshi, S.; Esmaili Zand, H.R.; Rashidi, A.; Gholami, P.; Sherafati, Z.; Res. Chem. Intermed. 46 (10), 4447-4463, 2020.
 27. Zeng, X.; Zhang, Y.; Zhang, J.; Hu, H.; Wu, X.; Long, Z.; Hou, X.; Microchem. J. 134, 140-145, 2017.
 28. Javid Parvar, A.A.; Naderi, R.; Ramezanzadeh, B.; Corr. Sci. 165, 108379, 2020.
 29. Javidparvar, A.A.; Naderi, R.; Ramezanzadeh, B.; Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 602, 125061, 2020.
 30. Imani, R.; Emami, S.H.; Faghihi, S.; Phys. Chem. Chem. Phys., 17, 6328-6339, 2015.
 31. Boorboor Ajdari, F.; Kowsari, E.; Ehsani, A.; Colloid Interface Sci. 509, 189-194, 2018.
 32. Ehsani, A.; Kowsari, E.; Boorboor Ajdari, F.; Safari, R.; Mohammad Shiri, H.; Colloid Interface Sci. 505, 1158-1164, 2017.
 33. Beryani, A.; Moghaddam, M.R.A.; Tosco, T.; Bianco, C.; Hosseini, S.M.; Kowsari, E.; Sethi, R.; Sci. Total Environ. 698, 134224, 2020.
 34. Zhu, Q.; Bao, X.; Yu, J.; Yang, R.; Dong, L.; Org. Electron. 27, 143-150, 2015.
 35. Torrisi, L.; Silipigni, L.; Cutroneo, M.; Torrisi, A.; Vacuum 173, 109175, 2020.
 36. Azman, N.H.N.; Mamat, M.S.; Lim, H.N.; Sulaiman, Y.; Mater. Sci. Mater. Electron. 29, 6916-6923, 2018.
 37. Yan, J.; Huang, Y.; Zhou, S.; Han, X.; Liu, P.; Mater. Sci. Mater. Electron. 30, 5273-5283, 2019.
 38. Lai, X.; Guo, R.; Lan, J.; Geng, L.; Lin, S.; Jiang, S.; Zhang, Y.; Xiao, H.; Xiang, C.F.; Mater. Sci. Mater. Electron. 30, 1984-1992, 2019.
 39. Chang, Y.; Xia, S.; Han, G.; Zhou, H.; Fu, D.; Song, H.; Xiao, Y.; Zhang, Y. F.; Mater. Sci. Mater. Electron. 30, 7216-7225, 2019.
 40. Pozveh, A.A.; Kowsari, E.; Hashemi, M.M.; Mirjafari, Z.; Res. Chem. Intermed. 46, 1329-1351, 2020.
 41. Mahyari, M.; Nasrollah Gavgani, J.; Res. Chem. Intermed. 44, 3641-3657, 2018.
 42. Hanoon, H.D.; Kowsari, E.; Abdouss, M.; Zandi, H.; Ghasemi, M.H.; Res. Chem. Intermed. 43, 1751-1766, 2017.

Synthesis of graphene oxide with 6-amino-2,2'-bipyridine for designing a nanosensor to determine the heavy metal ions

M. Abassi Ashlari¹, B. Akbari Adergani^{2,*}, A. Ehsani³, E. Kowsari^{4,*}, M. Hekmati⁵

1. Ph.D student of Department of Organic Chemistry, Faculty of Medical Science, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Professor of Food and Drug Laboratory Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran.
3. Professor of Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran.
4. Professor of Faculty of Chemistry, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
5. Associate Prof. of Department of Organic Chemistry, Faculty of Medical Science, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract: Modification of the graphene oxide surface by improving a covalent bond can improve the properties of this material. In the present study, the surface of the prepared graphene oxide was functionalized with 6-amino-2,2'-bipyridine molecules to form a covalent bond between amino groups of the ligand and carboxylic acid groups on the surface. The modified material was termed ABP-GO. The new structure and morphology of the modified compound by pyridine ligands were confirmed with X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), field emission scanning electron microscopy (FESEM), Energy-dispersive spectroscopy (EDS), and transmission electron microscopy (TEM). The electrochemical properties of the modified electrode were investigated using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), cyclic voltammetry (CV), and differential pulse anodic discharge voltammetry (DPASV) methods. The large surface area and the ability to absorb lead with proper guidance of the modified electrode indicate the proper performance of the Pb (II) sensor, with a detection limit of 3 nM. This electrode quickly provides the bond between the -NH₂ group and lead (II) and provides good reusability and reproducibility 5 times and about 90%, respectively.

Keywords: Graphene, Voltammetry, Sensor, Pyridine