فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۱، بهار ۱۳۹۸

ساخت نانوکامپوزیت چهارچوب آلی- فلزی بر پایه Cu/ گرافن و بررسی رفتار ابرخازنی آن

مرضیه آزادفلاح[۱]، آرمان صدقی[۱*]، هادی حسینی[۲]

[۱] گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

[۲] گروه شیمی دانشگاه صنعتی شریف

* sedghi@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۰ آذر ۱۳۹۷

پذیرش: ۳۰ تیر ۱۳۹۸

کلید واژه:

ابرخازن، نانوکامپوزیت، چهارچوب‌های آلی- فلزی، گرافن

چکیده:

هدایت بالا و سطح بالای قابل دسترسی به الکترولیت از پیش‌نیازهای اصلی مواد فعال مورد استفاده در ابرخازن‌ها برای دستیابی به کارایی الکتروشیمیایی بالا است. در سال‌های اخیر، چهارچوب‌های آلی-فلزی به دلیل سطح ویژه بالا و مناسب بودن اندازه تخلخل به عنوان مواد الکترودی در ابرخازن‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. با این‌حال استفاده از چهارچوب‌های آلی-فلزی به‌تنهایی در ابرخازن‌ها، بدلیل هدایت الکتریکی ضعیف، پایداری ناکافی و خواص مکانیکی پایین، اثر ظرفیت بالا و کارایی مناسب را خنثی می‌کند. در مقاله حاضر به روش سنتز هیدروترمال، چهارچوب‌های آلی-فلزی بر پایه مس تهیه شد و برای ارتقای هدایت این مواد، گرافن درجین سنتز افزوده شد. جهت بررسی ساختاری نانوکامپوزیت حاصله، از آنالیزهای XRD,FTIR و FESEM استفاده شد. برای بررسی رفتار ابرخازنی، آزمون‌های الکتروشیمیایی ولتامتری چرخه‌ای و امپدانس الکتروشیمیایی و رفتار تکرارپذیری انجام شد. نمونه چهارچوب آلی-فلزی بر پایه مس دارای ظرفیت ویژه ۳۷۲ فاراد بر گرم بود، در حالی که کامپوزیت آن با گرافن دارای ظرفیت ۵۷۰ فاراد بر گرم بود. در این کامپوزیت‌ها، گرافن افزایش هدایت الکترودها، در دسترس‌پذیری بیشتر تخلخل‌ها و ذخیره بار را از طریق مکانیزم غیر فارادایی فراهم می‌آورد و چهارچوب‌های آلی-فلزی نیز با میزان تخلخل بالا، قابلیت تنظیم تخلخل و افزایش ظرفیت کل ذخیره بار را از طریق مکانیزم فارادایی فراهم می‌کند.

۱- مقدمه

با گرم شدن زمین و محدودیت در منابع سوخت‌های فسیلی، جهان مستمراً به سمت استفاده از انرژی‌های جایگزین و پاک سوق داده شده است. با رشد سریع بازار در زمینه‌ی دستگاه‌های الکترونیکی قابل‌حمل و خودروهای الکتریکی هیبریدی، نیاز روزافزون و ضروری به منابع انرژیِ زیست سازگار با توان بالا به‌خوبی احساس می‌شود. در این راستا، ابرخازن‌ها به دلیل خصوصیاتی همچون تأمین پالسی توان، طول عمر چرخه‌ای بلند (بیشتر از ۱۰۰۰۰۰ چرخه)، اصول ساده و دینامیک سریع پخش بار الکتریکی، مورد توجه بسیاری واقع شده‌اند [۳-۱].

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

در سال‌های اخیر، ساختار خازن‌ها توسعه یافته و ظرفیت خازنی آن‌ها به صدها یا هزاران فاراد رسیده است. این نسل از خازن‌ها به‌طورمعمول به‌عنوان ابرخازن‌ها شناخته شده و برای اولین بار با استفاده از مواد کربنی با سطح ویژه‌ی بالا ساخته شدند. ظرفیت خازنی در این سیستم‌ها به‌منظور توازن بار در ماده‌ی کربنی با مکانیزم ذخیره بار در لایه دوگانه‌ی الکتریکی (در سطح مشترک محلول الکترولیت و کربن) حاصل می‌شود [۴و۱]. ظرفیت خازنی نوع دیگری از ابرخازن‌ها (که از آن‌ها با عنوان شبه خازن‌ها یاد می‌شود) از طریق ذخیره‌ی بار توسط واکنش‌های سطحی اکسایش- کاهش حاصل می‌شود. [۱]

مواد الکترودی یکی از فاکتورهای کلیدی تعیین کارایی الکتروشیمیایی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است و انتخاب مواد الکترودی نقش مهمی را در تشخیص رفتار الکتریکی ابرخازن‌های الکتروشیمیایی بازی می‌کند. هدایت بالا و سطح بالای قابل دسترسی به الکترولیت از پیش‌نیازهای اصلی مواد فعال مورد استفاده در ابرخازن‌ها برای دستیابی به کارایی الکتروشیمیایی بالا می‌باشند؛ بنابراین یک نیاز قوی برای توسعه آسان و مقرون‌به‌صرفه برای سنتز مواد پیشرفته کاربردی دارای خصوصیاتی چون ثبات بالا، هدایت الکتریکی بالا، تخلخل دائمی با اندازه تخلخل قابل تنظیم و حجم تخلخل بالا وجود دارد. مواد الکترودی مختلف با ساختارهای معروف توسعه یافتند که شامل مواد کربنی، اکسیدهای فلزی، پلیمرهای هادی و کامپوزیت‌های بر پایه گرافن هست [۷-۵].

در سال‌های اخیر، چهارچوب‌های آلی-فلزی (MOFs)[1] [۸] به دلیل سطح ویژه بالا و مناسب بودن اندازه تخلخل و ساختار قابل کنترل برای ابرخازن‌ها مورد استفاده قرار گرفته و به‌طور وسیعی ویژگی‌های ساختاری و سنتز آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. چهارچوب‌های آلی-فلزی موادی متشکل از دو بخش اصلی گره و اتصال‌دهنده می‌باشند. گره‌ها عموماً خوشه‌هایی از فلزات بوده و اتصال‌دهنده‌ها هم معمولاً لیگاندهای آلی را شامل می‌شوند. ساختار این مواد می‌تواند به‌صورت یک، دو و یا سه‌بعدی باشد [۹و۱۰].

در تحقیقات گذشته از چهارچوب‌های آلی- فلزی Co8-MOF-5 ($Zn_{3.68}Co_{0.32}O(BDC)_3(DEF)_{0.75}$) به‌عنوان الکترود برای ابرخازن‌های لایه دوگانه الکتریکی استفاده شد [۱۱و۱۲]. پس‌ازآن چهارچوب‌آلی-فلزی دیگری بر پایه کبالت با رفتار شبه‌خازنی با ظرفیت ویژه‌ی ۲۰۶ فاراد بر گرم به دست آمد. توسط گروه مشابهی پژوهش‌های بیشتری در این زمینه انجام شد [۱۱و۱۳] و سه لیگاند آلی با طول‌های مولکولی متفاوت برای تنظیم اندازه حفرات چهارچوب آلی- فلزی بر پایه کبالت استفاده شدند. در پژوهش دیگری، گروه وی[2] درنهایت از یک ساختار لایه‌لایه چهارچوب‌آلی-فلزی بر پایه‌ی نیکل به‌عنوان الکترود ابرخازن با ظرفیت ویژه‌ی بالای ۱۱۲۷ و ۶۶۸ فاراد بر گرم در نرخ‌های ۰/۵ و ۱۰ آمپر بر گرم و پایداری چرخه‌ای استفاده کردند. اخیراً چهارچوب‌های آلی-فلزی دیگری (Uio-66) بر پایه Zr بیشترین ظرفیت ویژه (۱۱۴۴ فاراد بر گرم) را از خود نشان دادند [۱۳].

با این‌حال استفاده از چهارچوب‌های آلی-فلزی به‌عنوان مواد الکترودی به‌تنهایی در ابرخازن‌ها، هدایت الکتریکی ضعیف،

[1] Metal organic framework

[2] Wei

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

پایداری ناکافی و خواص مکانیکی نامرغوب را در پی داشته و اثرات ظرفیت بالا و کارایی مناسب را خنثی می‌کند [۱۴]. به همین جهت برای رفع مشکلات چهارچوب‌های آلی–فلزی و رفع مشکلات مربوط به الکترودهای مورد استفاده در ابرخازن‌های لایه دوگانه الکتریکی و شبه خازن‌ها، مواد الکترودی به‌صورت کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ که برای ارتقا هدایت چهارچوب‌های آلی–فلزی، آن‌ها با مواد رسانا همانند کربن سیاه، گرافن و پلی آنیلین ترکیب می‌شوند که ترکیب آن‌ها با زنجیره‌های پلیمری مقاومت الکتریکی چهارچوب‌های آلی–فلزی را کاهش می‌دهد؛ ولی سطح ویژه چهارچوب‌های آلی–فلزی را نیز کاهش می‌دهد. برای بهبود نرخ انتقال الکترون بیشتر و استفاده از سطح ویژه چهارچوب‌های آلی–فلزی، ترکیب گرافن با چهارچوب‌های آلی–فلزی یک مسیر مؤثر است که از معایب این روش نیز آگلومره شدن ورقه‌های گرافن است. لذا در پژوهش حاضر برای ارتقای هدایت این مواد و جلوگیری از آگلومره شدن ورقه های گرافن، چهارچوب‌های آلی–فلزی به روش سنتز همزمان با گرافن ترکیب شده و رفتار الکتروشیمیایی کامپوزیت چهارچوب‌های آلی–فلزی/گرافن در مقایسه با چهارچوب آلی–فلزی مورد بررسی قرار گرفت که با بهره مندی از خواص هم‌افزایی کامپوزیت و افزایش هدایت الکتریکی چهارچوب‌های آلی–فلزی با گرافن و پلی پایرول، بهره‌مندی از ویژگی‌های مثبت هر یک از آن‌ها، به عملکرد و کارایی بهتر دست‌یافت.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد مصرفی

در این کار از مواد مصرفی با خلوص بالا استفاده شد و همه محلول‌ها با استفاده از آب مقطر تهیه شد. برای ساخت نانوکامپوزیت از کربوکسیلیک اسید سه تایی، نیترات مس سه آبه، گرافن و اتانول استفاده شد و برای ساخت الکترود جهت انجام تست‌های الکتروشیمیایی از فوم نیکل (ضخامت ۱/۵ میلی متر و تخلخل ۹۵~ ۹۸٪)، پلی وینیلیدن فلورید (PVDF)، ان متیل ۲- پیرونیدول (NMP)، پتاسیم هیدروکسید استفاده شد.

۲-۲- سنتز نانو کامپوزیت چهارچوب آلی- فلزی مس/ گرافن

ابتدا ۲/۲۵ میلی مول نیترات مس در ۷/۵ میلی لیتر آب مقطر و ۱/۲۵ میلی مول کربوکسیلیک اسید سه تایی در ۷/۵ میلی لیتر اتانول حل شد، در ادامه هر دو محلول تهیه شده با یکدیگر ترکیب شده و به مدت ۱۵ دقیقه تحت امواج التراسونیک قرار گرفتند. سپس مقدار ۳ میلی گرم گرافن را به ترکیب قبلی اضافه کرده و به مدت سی دقیقه توسط همزن مغناطیسی همزده شد. ترکیب تهیه شده در تفلون اتوکلاو ریخته (اتوکلاو از جنس استیل ضدزنگ) و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده تا رسوب حاصل شود. سپس رسوب حاصله سانتریفیوژ شد و چند بار با آب دیونیزه و اتانول شستشو داده شد. و در نهایت جهت خشک شدن در آون در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت و نانوکامپوزیت چهارچوب آلی–فلزی بر پایه مس/گرافن (CUMG) تهیه شد. فلوچارت این مرحله در شکل ۱ مشاهده می‌شود. جهت مقایسه، چهارچوب آلی–فلزی بر پایه مس (CUM) همانند مراحل بالا بدون افزودن گرافن تهیه شد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

۲-۳- تهیه الکترود کار

برای تهیه الکترود کار، ابتدا فوم نیکل با سطح مقطع ۱ سانتی متر مربع برش داده شد. ماده فعال الکترودی، کربن سیاه و PVDF با نسبت (۸۵:۱۰:۵) ترکیب شده و توسط حلال NMP به صورت یک جوهر درآمده و سپس جوهر تهیه شده به روشش پاشش روی فوم نیکل ریخته شد و در آون به مدت ۲۰ ساعت تحت دمای ۷۰ درجه سانتیگراد خشک شد. در ادامه فوم نیکل پرس شد و جهت انجام تست سه الکترودی استفاده شد. وزن ماده فعال الکترودهای تهیه شده ۳ میلی گرم بود.



شکل ۱- فلوچارت تهیه نانوکامپوزیت چهارچوب آلی فلزی بر پایه مس/ گرافن.

در این کارآنالیز پراش اشعه ایکس برای شناخت فازها توسط دستگاه PHILIPS مدل PW1730 با لامپ Cu-Kα در بازه زاویه ۵ تا ۷۰ درجه انجام شد. آزمون FTIR با دستگاه اسپکتروفتومتر Thermo و در محدوده عدد موج ۴۰۰ تا $۴۰۰۰cm^{-1}$ انجام شد. برای مشاهده مورفولوژی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی ساخت شرکت TESCAN مدل MIRA3 استفاده شد. آنالیزهای الکتروشیمیایی برای بررسی کارایی الکترودهای ساخته شده و عملکرد آن‌ها در یک سامانه سه الکترودی با دستگاه پتانسیواستات Biologic مدل VSP-300 انجام شد. در انجام همه تست‌های الکتروشیمیایی، از محلول پتاسیم هیدروکسید (KOH) ۶M به عنوان الکترولیت، الکترود مرجع Ag/AgCl(KCl(s)) با محلول KCl اشباع و الکترود کمکی از جنس ورقه پلاتینی و الکترود تهیه شده به‌عنوان الکترود کار استفاده شد [۱۴].

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

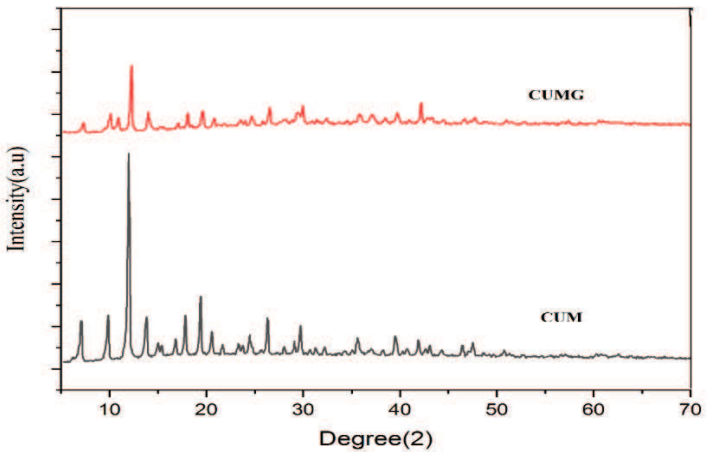
۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز XRD

در شکل ۴ الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) برای دو نمونه CUM و CUMG نشان داده شده است. در نمونه CUM پیک‌های پراش در زوایای ۷/۰۸، ۹/۸ و ۱۲/۰۲ به ترتیب مربوط به صفحات پراش (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۲۱۱) بوده و به خوبی با ساختار معکبی HKUST-1 تطابق دارد [۱۵-۱۴]. پیک‌های پراش در نمونه CUMG با نمونه CUM مطابقت داشته و اثبات کننده این امر هست که CUM ساختار کریستالی خود را در کامپوزیت حفظ می‌کند و هیچ تخریبی در ساختار CUM ایجاد نمی‌شود. همچنین در نمونه CUMG یک مقداری شیفت پیک نسبت به CUM وجود دارد که نشان دهنده بلندتر بودن طول پیوندها در CUMG است.

۳-۲- آنالیز FTIR

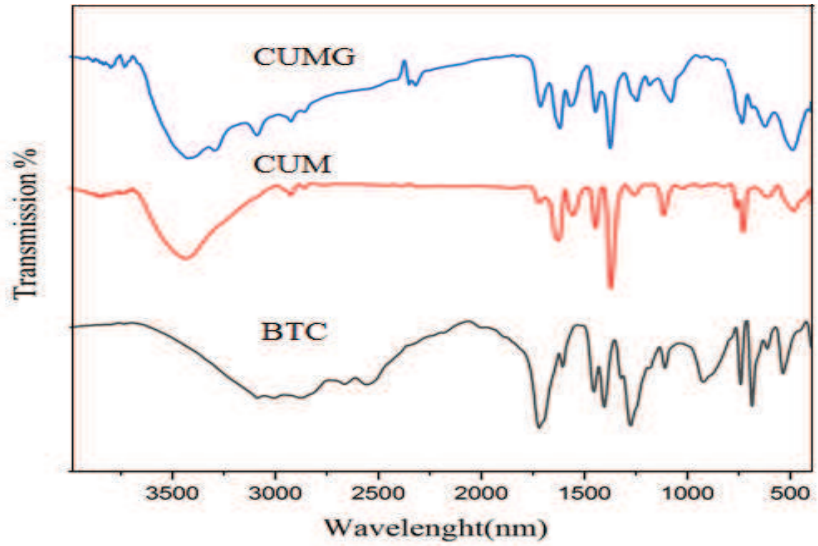
شکل ۳ آنالیز طیف سنجی مادون قرمز فوریه (FTIR) را برای نمونه‌های BTC, CUM و CUMG نشان می‌دهد. وجود پیوند جذبی در ناحیه $1700-1300\ cm^{-1}$ در نمودار به منطقه اثرانگشت BTC اختصاص داده شده است. پیوندها در $1380cm^{-1}$ به پیوند کششی متقارن گروه‌های کربوکسیلیک مرتبط بوده و پیوندهای جذبی بین $1300cm^{-1}$ و ۱۷۰۰ در نمونه CUM مربوط به پیوندهای کششی نامتقارن گروه‌های کربوکسیلیک BTC است [۱۶]. در نانوکامپوزیت CUMG، تمامی پیوندهای جذبی CUM مشاهده شد و نشان دهنده حفظ موقعیت CUM در نانوکامپوزیت است. پیک‌های مشخص در $1046cm^{-1}$ و ۱۲۹۸ به ترتیب به ارتعاشات C-H و ارتعاشات کششی C-N نسبت داده شد و در نانوکامپوزیت CUMG تمامی پیک‌ها و پیوندهای مربوط به CUM و BTC و گرافن به خوبی قابل مشاهده است [۱۴].



شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس XRD نمونه‌های CUM و CUMG.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]



شکل ۳- طیف مادون قرمز (FTIR) نمونه‌های BTC، CUM و CUMG.

۳-۳- آنالیز FESEM

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نمونه‌های CUM (الف-ب) و CUMG (ج-د) در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است چهارچوب‌های آلی- فلزی با هندسه هشت ضلعی منتظم و لبه‌های مشخص و تیز سنتز شده است. و زمانی که گرافن به ساختار افزوده شده، ذرات هشت ضلعی به ساختار لایه لایه ای و گل مانند تغییر شکل داده‌اند. این نتایج نشان دهنده تاثیر گرافن بر ساختار CUM و ایجاد تغییر مورفولوژیک و رسیدن به سطح ویژه موثرتر شده است. همچنین جالب است که گرافن به صورت قطعات کوچکی تبدیل شده است تا در شکل گیری CUM شرکت کند و سپس در طول فرایند واکنش هیدروترمال به فرم کاهنده تبدیل شده که به طور قابل توجهی سطح ویژه، هدایت الکتریکی و فعالیت اکسید-احیا مواد را افزایش می دهد [۱۴و۱۶].

۳-۴- آنالیزهای الکتروشیمیایی

۳-۴-۱- آنالیز CV

ولتامتری چرخه‌ای برای بررسی برگشت پذیری الکتروشیمیایی و محاسبه ظرفیت ویژه ابرخازن ها بکاربرده شد. با استفاده از منحنی ولتامتری چرخه‌ای (جریان در برابر ولتاژ) می‌توان ظرفیت ابرخازن تهیه شده را محاسبه نمود، که این عمل با محاسبه سطح نمودار و تقسیم بر میزان ولتاژ و نرخ اسکن محاسبه شد (رابطه ۱) [۱۵].

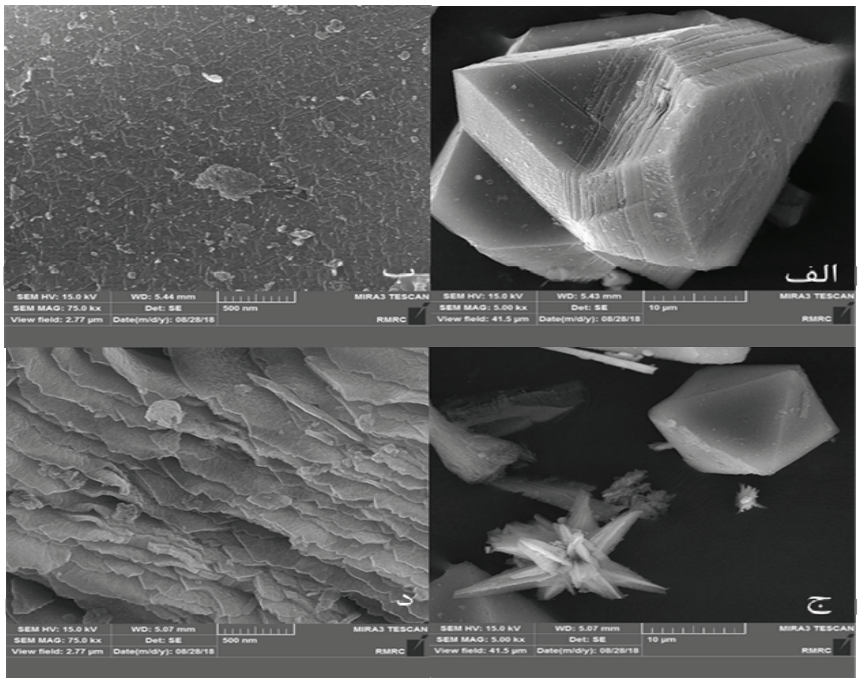
$$C = \int \frac{IdV}{s\Delta V} \qquad (۱$$

ولتامتری چرخه‌ای الکترودهای CUM و CUMG در شکل۵-الف آورده شده‌است. گستره پتانسیل ۰/۱- تا ۰/۶ ولت و سرعت روبش ۲۰ میلی ولت بر ثانیه انتخاب شد. شکل‌های هیسترزیس گونه (پیک‌های آندی وکاتدی) این ولتاموگرام‌ها بیانگر رفتار شبه خازنی و هیبریدی الکترودهای تهیه شده است. ظرفیت ویژه نمونه CUM در نرخ روبش ۲۰ میلی ولت بر ثانیه ۳۷۲ فاراد بر گرم بود، در حالی که

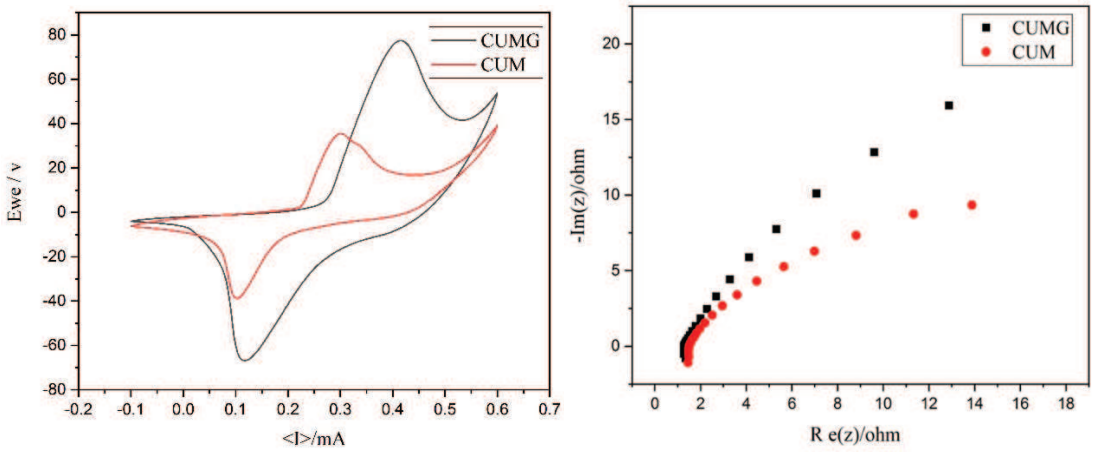
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

کامپوزیت آن با گرافن دارای ظرفیت ۵۷۰ فاراد بر گرم بـود. که نشان دهنده عملکـرد مـوثر گـرافن در افـزایش هـدایت الکتریکی و بهره‌وری از سطح ویژه مناسب چهـارچوب‌هـای آلی- فلزی است.



شکل ۴- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نمونه‌های CUM (الف-ب) و CUMG (ج-د).



شکل ۵- الف) منحنی نایکوییست الکترودهای CUM و CUMG در دامنه فرکانس mHZ ۱۰ تا kHZ ۱۰۰، ب) ولتامتری چرخه‌ای الکترودهای CUM و CUMG در سرعت‌روبش ۲۰ میلی ولت بر ثانیه.

۳-۴-۲- آنالیز EIS

طیف سنجی امپدانس یکی از مهمتـرین روش‌هـای تعیـین مقـادیر امپـدانس وسـایل ذخیـره انـرژی در فرکـانس‌هـای مختلف است. شکل ۶ منحنی نایکوییـست الکترودهـا را در

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

دامنه فرکانس ۱۰ mHZ تا ۱۰۰ kHZ در پتانسیل ۰/۵ ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/ نقره کلرید به نمایش می‌گذارد. همان طور که در شکل مشخص است کلیه منحنی‌ها از نظر ظاهری مشابه می‌باشند. نیم دایره موجود در سمت چپ و در فرکانس‌های بالا به فرایند ذخیره بار در سطح تماس الکترود /الکترولیت دلالت دارد [۱۷]. این نیم دایره با خطی با شیب ۴۵ تا ۹۰ درجه ادامه می‌یابد که هر چه قطر نیم دایره کوچک تر باشد، فرایند انتقال بار با سهولت بیشتری انجام می‌پذیرد. قطر نیم دایره برای نمونه‌ی کامپوزیتی CUMG به مراتب کمتر از نمونه‌ی CUM است. همچنین نمونه‌ی کامپوزیتی با شیب خط نزدیک تر به ۹۰ درجه عملکرد خازنی بهتری را از خود به نمایش می‌گذارد [۱۴].

۴- نتیجه‌گیری

طبق نتایج در نانو کامپوزیت CUMG، افزودن گرافن منجر به افزایش هدایت الکترودها، پخش‌شدگی بیشتر چهارچوب‌های آلی-فلزی، در دسترس‌پذیری بیشتر تخلخل‌ها و افزایش ظرفیت شده است. همچنین میزان افت کارایی پس از ۱۰۰۰ سیکل برای نمونه CUM حدود ۲۰ درصد بوده و برای نمونه CUMG ۵ درصد بوده است که نشان از پایداری بسیار بهتر نمونه کامپوزیتی و تاثیر مثبت افزودن گرافن دارد.

مراجع

[1] B. E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications". New York, N.Y.: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 1999.

[2] R. Gallay, PhD Thesis, University of Mondragon, 2012.

[3] A. Burke, "Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology", Power Sources, Vol. 91, pp.37-50, 2000.

[4] B.A. Xiaofei Li, Master of Science Thesis, University of McMaster, 2012.

[5] A.D. Kumarappa, PhD Thesis, University of McMaster, 2012.

[6] G. Pandolfo and A.F. Hollenkamp, "Carbon properties and their role in supercapacitors", Power Sources, Vol. 157, pp.11-27, 2006.

[7] L. Zhang Li, PhD Thesis, National University of Singapore, 2010.

[8] L. Wang, Y. Han, X. Feng, J. Zhou, P. Qi, B. Wang, "Metal–organic frameworks for energy storage: Batteries and supercapacitors", Coordination Chemistry Reviews, Vol. 307, pp. 361-381, 2016.

[۹] مرسلی .ع، "چهارچوب‌های فلز-آلی متخلخل (معرفی و روش‌های سنتز)"، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۰.

[10] D. Li, D. Yan, X. Zhang, J. Li, T. Lu, L.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]

Pan, "Porous CuO/reduced graphene oxide composites synthesized from metal-organic frameworks as anodes for high-performance sodium-ion batteries", Colloid and Interface Science, Vol. 497, pp. 350-358, 2017.

[11] Y. Zhao, Z. Song, X. Li, Q. Sun, N. Cheng, S. Lawes, X. Sun, "Metal organic frameworks for energy storage and conversion", Energy Storage Materials, Vol. 2, pp. 35-62, 2016.

[12] R. Diaz and et.al, "Co_8-MOF-5 as electrode for supercapacitors", Materials letters, Vol. 68, pp. 126-128, 2012.

[13] D.Y. Lee, and et.al, "Supercapacitive property of metal–organic-frameworks with different pore dimensions and morphology", Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 171, pp. 53-57, 2013.

[14] K. M. Choi, H. M. Jeong, J. H. Park, Y. B. Zhang, J. K. Kang & O. M. Yaghi, "Supercapacitors of nanocrystalline metal–organic frameworks", ACS Nano, Vol. 8, pp. 7451-7457, 2014.

[15] Q. Wang, Y. Yang, F. Gao, J. Ni, Y. Zhang, Z. Lin "Graphene Oxide Directed One-Step Synthesis of Flowerlike Graphene@HKUST-1 for Enzyme-Free Detection of Hydrogen Peroxide in Biological Samples", ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 8, pp. 32477–32487, 2016.

[16] P. Wen, et al. "Design and synthesis of Ni-MOF/CNT composites and rGO/carbon nitride composites for an asymmetric supercapacitor with high energy and power density", Materials Chemistry A, Vol.3.26, pp. 13874-13883, 2015.

[17] M. Jahan, L. Zhaolin, and P. L. Kian. "A Graphene oxide and copper-centered metal organic framework composite as a tri-functional catalyst for HER, OER, and ORR", Advanced Functional Materials, Vol. 23, pp. 5363-5372, 2013.

[18] M. Y. Ghotbi, B.Feli, M. Azadfalah, & M. Javaheri, "Ultra high performance N-doped carbon catalysts for the ORR derived from the reaction between organic-nitrate anions inside a layered nanoreactor", RSC Advances, Vol. 5, pp. 92577-92584, 2015.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.1.7.8]