

ارزیابی اثر نانوذرات اکسید فلزی در الکتروود پایه کربنی جهت بررسی الکتروشیمیایی الکتروود ابر خازن

حمید کاظم زاده^۱، مونا زمانی پدram^۲، محمدرضا امیدخواه نسرین^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استادیار سیستم های انرژی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استاد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

Evaluation of the effect of metal oxide nanoparticles in carbon-based electrodes for electrochemical investigation of supercapacitor electrodes

Hamid Kazemzadeh¹, Mona Zamani Pedram², Mohammadreza Omidkhah Nasrin^{3*}

1. PhD Student of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University

2. Assistant Professor of Energy Systems, K. N. Toosi University of Technology

3. Professor of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University

Abstract

Recent progress in supercapacitors—recognized as advanced and high-potential energy storage devices—has drawn considerable interest from both scientific and industrial sectors. In this study, a simple, rapid, and highly effective synthesis method is introduced, offering strong potential for scaling up to industrial production. The research focuses on synthesizing an electrode containing CuCrO₂ nanocomposite using different proportions of CuCrO₂, carbon black (CB), and activated carbon (AC). The resulting nanoparticles and electrodes were analyzed through structural and performance-based assessments. FESEM imaging revealed that the electrode materials were evenly distributed across the nickel foam substrate. Among all the synthesized composites, the one combining CuCrO₂ (0.6 %wt) with a carbon-based material (0.4 %wt) delivered the best electrochemical performance, achieving a specific capacitance of 700 F.g⁻¹ and stability of 91% after 5000 charge-discharge cycles at a current density of 1 A.g⁻¹.

Keywords: Supercapacitor, CuCrO₂, Carbon Black, Activated Carbon, Nanoparticle, Charge Storage, Energy Storage, Pseudo-capacitor, Hybrid Energy Storage

* تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی (omidkhah@modares.ac.ir)

چکیده

پیشرفت در ابرخازن‌ها به عنوان یک وسیله ذخیره‌سازی انرژی برجسته و پیشگام، توجه مجامع علمی و صنعتی را به خود جلب کرده است. در این زمینه، این مقاله تحقیقاتی از یک تکنیک سنتز آسان، سریع و بسیار کارآمد استفاده می‌کند که پتانسیل قابل توجهی برای مقیاس‌پذیری صنعتی دارد. این مطالعه بر سنتز یک الکتروود حاوی نانو کامپوزیت CuCrO_2 با نسبت‌های مختلف CuCrO_2 و کربن سیاه (CB) و کربن فعال (AC) تمرکز دارد. ویژگی‌های نانوذرات و الکتروودهای سنتز شده با استفاده از تجزیه و تحلیل ساختاری و عملکردی ارزیابی شده است. تجزیه و تحلیل FESEM الکتروودهای آماده شده، توزیع تقریباً یکنواختی از مواد را روی فوم نیکل به عنوان بستر الکتروود نشان داد. در میان نمونه‌های کامپوزیت سنتز شده، بهترین عملکرد الکتروشیمیایی نشان داده شده مربوط به کامپوزیت حاوی ۶۰ درصد وزنی CuCrO_2 و ۴۰ درصد وزنی مواد پایه کربنی است (ظرفیت ویژه 700 F.g^{-1} و پایداری چرخه ۹۱٪ پس از ۵۰۰۰ چرخه شارژ-دشارژ در 1 A.g^{-1}).

کلمات کلیدی

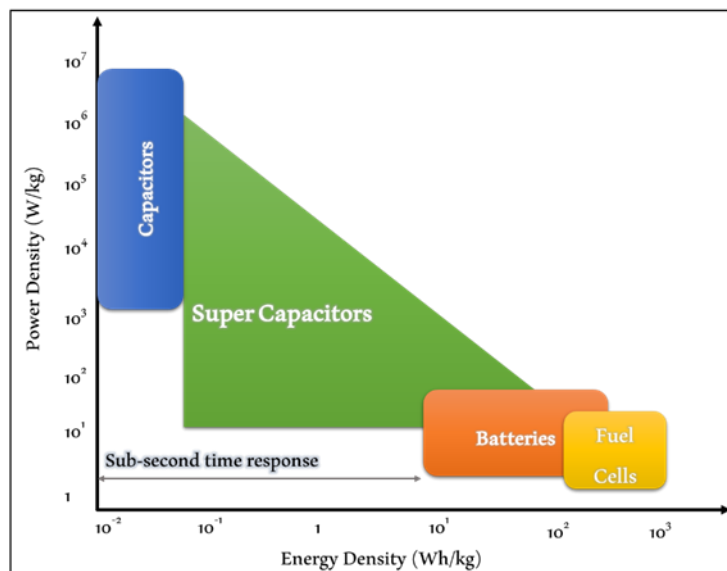
ابرخازن، CuCrO_2 ، کربن سیاه، کربن فعال، نانوذره، ذخیره بار، ذخیره انرژی، مکانیسم هیبرید

۱- مقدمه

مصرف انرژی و سوخت‌های فسیلی تأثیر مخربی بر محیط زیست دارد. با توجه به اثرات مخرب این منابع انرژی، استفاده از روش‌های سازگار با محیط زیست برای تولید و ذخیره انرژی شده اجتناب‌ناپذیر است [۱، ۲]. چگالی توان و چگالی انرژی بالا در کنار پایداری و دوام از جنبه‌های یک دستگاه ذخیره انرژی است که باید در نظر گرفته شود. دستگاه‌های ذخیره انرژی الکتروشیمیایی^۱ (EESD) را می‌توان به عنوان یکی از دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی با در نظر گرفتن جنبه اقتصادی و سازگار با محیط زیست طبقه‌بندی کرد [۳].

سلول‌های سوختی، ابرخازن‌ها، دستگاه‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی ابررسانا و باتری‌های لیتیوم-یون نسل دوم برخی از دستگاه‌های ذخیره انرژی الکتروشیمیایی پایدار هستند. در این بین، ابرخازن‌ها و باتری‌های دستگاه‌هایی هستند که نقش عمده‌ای در ذخیره‌سازی انرژی ایفا می‌کنند [۴].

ابرخازن‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و قابل توجه خود، به عنوان نقطه کانونی توجه و توسعه در زمینه ذخیره‌سازی انرژی ظهور کرده‌اند. ابرخازن‌ها دارای چندین ویژگی متمایز هستند که آنها را از سایر دستگاه‌های ذخیره انرژی متمایز می‌کند. به طور قابل توجهی، آنها نرخ شارژ و دشارژ سریع، پایداری چرخه‌ای استثنایی و چگالی توان ایده‌آل را نشان می‌دهند. نمودار راگون^۲ (شکل ۱) دستگاه‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی را برای مقایسه بهتر نشان می‌دهد [۵].



شکل ۱. نمودار راگون مربوط به سیستم‌های مختلف ذخیره انرژی

Figure ۱. Ragone plot of different energy storage systems

اجزای ساختاری ابرخازن‌ها شامل الکتروود، الکترولیت، جداکننده و جمع‌کننده جریان است. الکتروودها با ذخیره انرژی الکتریکی و تسهیل انتقال آن به جمع‌کننده جریان، نقش مهمی در ذخیره‌سازی انرژی ایفا می‌کنند.

¹ Electrochemical Energy Storage Devices

² Ragon Plot

الکترولیت‌ها و جمع‌کننده‌های جریان به ترتیب مسئول انتقال بار الکتریکی بین الکترودها و برداشت و جمع‌آوری بار الکتریکی ذخیره شده از الکترودها هستند. جداکننده‌ها که بین الکترودها قرار گرفته‌اند، به عنوان جداکننده‌های جریان، عملکرد حیاتی دارند و دارای ویژگی‌های خاصی برای انجام مؤثر نقش خود هستند، از جمله جلوگیری از جریان الکترون برای جلوگیری از اتصال کوتاه و در عین حال اجازه عبور یون‌ها برای حفظ رسانایی. سهم ترکیبی این عناصر به طور قابل توجهی بر عملکرد و کارایی کلی دستگاه ابرخازن تأثیر می‌گذارد [۶]. با این حال، شایان ذکر است که الکترودها به دلیل نقش‌های محوری و اهمیتشان در سیستم، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. در واقع، ذخیره‌سازی انرژی از طریق کاربرد الکترودها و مکانیسم‌های خاصی که انرژی توسط آنها ذخیره می‌شود، حاصل می‌شود. مکانیسم ذخیره‌سازی انرژی بسته به مواد مورد استفاده در فرآیند ساخت الکترودها از طریق سه مکانیسم اساسی متفاوت است: مکانیسم دولایه الکتروشیمیایی^۱ (EDLC)، مکانیسم‌های شبه‌خازنی^۲ با استفاده از مواد پایه فلزی و مکانیسم ترکیبی^۳. مکانیسم دولایه الکتروشیمیایی در درجه اول از مواد پایه کربنی برای تسهیل ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌کند. از سوی دیگر، مکانیسم‌های شبه‌خازنی برای ذخیره‌سازی انرژی به مواد پایه فلزی متکی هستند. نکته قابل توجه این است که مکانیسم هیبریدی که از اهمیت بالایی برخوردار است، شامل استفاده از کامپوزیت‌های چندجزئی متشکل از مواد پایه فلزی و پایه کربنی است. این کامپوزیت‌ها قابلیت‌های ذخیره‌سازی انرژی قابل توجهی را نشان داده‌اند و از اثرات هم‌افزایی حاصل از مکانیسم هیبریدی بهره‌مند شده‌اند [۷].

ظرفیت ویژه^۴ و چگالی انرژی^۵ به عنوان نقاط عطف حیاتی در پارامترهای الکتروشیمیایی ابرخازن‌ها در نظر گرفته می‌شوند و نیازمند پیشرفت و توسعه بیشتر هستند. افزایش ظرفیت ویژه، که نشان دهنده مقدار باری است که می‌تواند در واحد جرم یا حجم ذخیره شود، برای دستیابی به قابلیت‌های ذخیره‌سازی انرژی بالاتر بسیار مهم است. به طور مشابه، افزایش چگالی انرژی، که نشان دهنده مقدار انرژی ذخیره شده در واحد جرم یا حجم است، برای به حداکثر رساندن ظرفیت کلی ذخیره‌سازی انرژی و عملکرد ابرخازن‌ها ضروری است. پیشرفت و توسعه مداوم در این پارامترها در پیشرفت حوزه فناوری ابرخازن اهمیت دارد [۸].

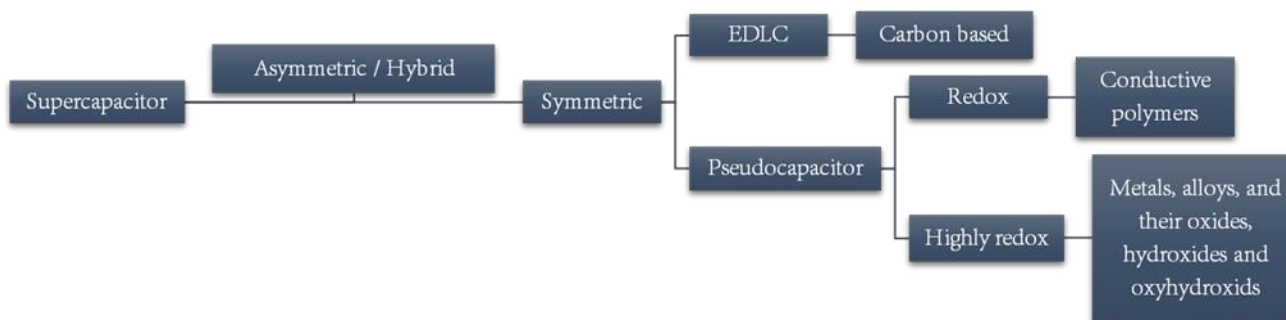
¹ Electrical double-layer mechanism

² Pseudo-capacitor

³ Hybrid

⁴ Specific capacity

⁵ Energy density



شکل ۲. انواع ابرخازن باتوجه مواد تشکیل دهنده الکتروود

Figure ۲ Types of supercapacitors regarding the material of the electrode

مواد فلزی و کامپوزیت‌های هیبریدی به دلیل خواص ذاتی خود، مانند رسانایی بالا، سرعت انتقال بار سریع و پایداری ساختاری عالی، توجه محققان را به خود جلب کرده‌اند. این ویژگی‌ها تأثیر عمیقی بر بهبود چگالی انرژی و ظرفیت ویژه در زمینه ابرخازن‌ها داشته‌اند. MoO_2 به عنوان یک اکسید فلز واسطه بر اساس خواص نظری آن مورد بررسی قرار گرفته است. در یک تحقیق کامپوزیتی از MoO_2 و ماده کربنی با مورفولوژی خاص بررسی شد. نتایج نشان داد که مواد مبتنی بر کربن با ویژگی‌های خاص خود می‌توانند رسانایی الکترونیکی MoO_2 را بهبود بخشند [۹]. در تحقیقی مشابه یک نانوکامپوزیت حاوی کبالت در کنار یک شبکه کربن متخلخل ($\text{N-CN/C}_3\text{O}_4$) از نظر خواص الکتروشیمیایی ارزیابی شد. با توجه به روش سنتز مورد استفاده که از نظر انرژی و هزینه مقرون به صرفه بود، نتایج الکتروشیمیایی (۹۸٪/۶) پایداری پس از ۵۰۰۰ سیکل شارژ و تخلیه) قابل توجه بود [۱۰].

CuCrO_2 خواص قابل توجهی دارد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای ساخت الکتروود ابرخازن تبدیل می‌کند. ویژگی استثنایی آن رسانایی بالای آن است که آن را به یک ویژگی قابل توجه برای عملکرد کارآمد الکتروود تبدیل می‌کند. مطالعات زیادی در مورد این ماده وجود ندارد. ان-هی لی^۱ و همکارانش مطالعه‌ای در مورد سنتز نانوذرات CuCrO_2 و ارزیابی عملکرد الکتروشیمیایی آن به عنوان یک الکتروود انجام دادند [۱۱]. ماده کامپوزیت حاصل، ظرفیت خازنی ویژه 464 F.g^{-1} را هنگام آزمایش با سرعت روبش 0.1 V.S^{-1} نشان داد. علاوه بر این، نتایج تست چرخه شارژ و تخلیه گالوانواستاتیک^۲ (GCD) پس از ۵۰۰۰ سیکل ۸۸٪ پایداری چرخه‌ای را نشان داد. آزمایش چرخه ولتامتری^۳ (CV) از CuCrO_2 منجر به پیک‌های اکسایش/کاهش شد که شواهدی برای مکانیسم ذخیره‌سازی شبه خازنی الکتروودهای CuCrO_2 هستند. علاوه بر این، شکل مستطیلی مکانیسم دو لایه در نمودار CV به شکل نیمه مستطیلی تغییر یافته است. وجود این پیک‌ها، رفتار شبه‌خازنی را که مربوط به پیک‌های آندی و کاتدی از واکنش اکسایش-کاهش است، استنباط می‌کند. واکنش اکسایش-کاهش نانوذرات CuCrO_2 در فرآیند الکتروشیمیایی از طریق معادله (۱) انجام خواهد شد.



¹ Eun-Hee Lee

² Galvanostatic Charge-Discharge

³ Cyclic voltammetry

در تحقیق دیگری، ساکتیناتان^۱ و همکارانش کامپوزیت نانوفیبر کربن^۲/دی‌اکسید کروم مس (CNF/CuCrO₂) را سنتز کردند. کامپوزیت تهیه‌شده، ظرفیت خازنی ویژه ۱۵۹ F.g⁻¹ را در چگالی جریان^۳ ۵ A.g⁻¹ نشان داد [۱۲]. اثربخشی الکتروود تهیه‌شده تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله احتمال استفاده از روش‌های سنتز نامناسب قرار خواهد گرفت که ممکن است منجر به عدم استفاده کامل از پتانسیل هر جزء در کامپوزیت شود. بهینه‌سازی رویکرد سنتز برای بهره‌برداری کامل از خواص مطلوب و به حداکثر رساندن ظرفیت ویژه کامپوزیت CuCrO₂ بسیار مهم است. با پرداختن به این چالش‌ها، محققان می‌توانند عملکرد و پتانسیل این کامپوزیت‌ها را برای کاربردهای ابرخازن افزایش دهند. به طور خلاصه، برخی از تحقیقات اخیر در این زمینه در جدول ۱ ذکر شده است. نتایج حاصل از پروژه هاش اخیر شامل دانسیته انرژی^۴ (E_d)، دانسیته توان^۵ (P_d)، ظرفیت ویژه^۶ (C_s) و پایداری چرخه ای^۷ در جدول ۱ قابل مشاهده و بررسی است.

جدول 1. خلاصه تحقیقات اخیر در زمینه ساخت الکتروود ابر خازن

Table 1. A brief comparison of related research in the field of electrode of supercapacitor

Composite	C _s (F.g ⁻¹)	E _d (Wh.kg ⁻¹)	P _d (kW.kg ⁻¹)	Retention (cycles)	Electrolyte	Ref.
rGO/MnO ₂ /CuO	658 at 1 A.g ⁻¹	118.61	1.5	83.74% (5000)	KOH	[13]
Cu-MOF/rGO	366.6 at 1 A.g ⁻¹	14.66	-	89% (20000)	KOH	[14]
Cu ₆₄ Ni ₃₆	610 at 1 A.g ⁻¹	-	-	70% (5000)	KOH	[15]
Cu-MnO ₂	837 at 1 A.g ⁻¹	-	-	87.2% (2000)	-	[16]
PANI-CQD-Cu	1070 at 1 A.g ⁻¹	2310 μWh.cm ⁻²	0.978 mW.cm ⁻²	92% (3000)	H ₂ SO ₄	[17]
CuCo _{0.5} Ti _{0.5} O ₂	283 at 0.5 A.g ⁻¹	31.93	0.225	86% (2000)	-	[18]
CuO/Cu ₂ O/Cu	878 at 1.67 A.g ⁻¹	42	0.44	100% (8000)	KOH	[19]
Cu _{0.5} Cr _{0.5} -MOF-D	535 at 0.7 A.g ⁻¹	36.7	2.6	90.3% (5000)	-	[20]
CuMn ₂ O ₄ -rGO	342 at 1 A.g ⁻¹	121	1.68	75.5% (10000)	-	[21]
rGO/carbon black	79 at 1 A.g ⁻¹	-	-	-	PVA/H ₂ SO ₄	[22]

¹ Saktinathan

² Carbon nano-fiber

³ Current Density

⁴ Energy density

⁵ Power density

⁶ Specific capacity

⁷ Cyclic stability

Ultra-thin MnO ₂ / Zn ₂ SnO ₄ nanowire-carbon microfibers	621.6 at 2 mV.s ⁻¹	1	1	98.8% (1000)	1	[23]
Cu ₂ O	210.9 at 0.5 A.g ⁻¹	1	1	94.5% (5000)	KOH	[24]
ZnCo ₂ O ₄ @MnO ₂ // Fe ₂ O ₃	161 at 2.5 mA.g ⁻¹	37.8	0.648	91% (5000)	KOH	[25]
Cu ₂ O//AC	53 at 0.5 A.g ⁻¹	20.04	7.1	93.3% (5000)	1	[24]

استفاده از نانوذرات با خواص خاص و در نظر گرفتن یک روش سنتز مناسب، عوامل اصلی مؤثر در دستیابی به نتایج الکتروشیمیایی بهینه در مطالعه حاضر هستند. این روش به طور مؤثر از پتانسیل کامل اجزای کامپوزیت بهره می‌برد و منجر به بهبود رسانایی، سطح ویژه و سرعت انتقال بار می‌شود. محققان با بهینه‌سازی دقیق رویکرد سنتز، خواص مفید مواد کامپوزیت را به حداکثر رساندند که منجر به افزایش رسانایی برای انتقال بار کارآمد، افزایش سطح ویژه برای بهبود برهمکنش‌های الکتروود-الکتروولیت و تسریع سرعت انتقال بار برای ذخیره و آزادسازی سریع انرژی شد. در این راستا، این تحقیق با هدف بررسی و ارزیابی خواص الکتروشیمیایی هر کامپوزیت انجام شد. انگیزه اصلی برای استفاده از CuCrO₂ با کربن فعال^۱ (AC) و کربن سیاه^۲ (CB)، خواص سودمندی است که از دیدگاه نظری از خود نشان می‌دهند. CuCrO₂ رسانایی بالا و سطح ویژه قابل توجهی را ارائه می‌دهند که امکان انتقال بار بهبود یافته و استفاده کارآمد از ماده الکتروود را فراهم می‌کند. علاوه بر این، ترکیب کربن فعال و کربن سیاه به پایداری چرخه عالی کمک می‌کند و دوام و قابلیت اطمینان طولانی مدت را در طول چرخه‌های شارژ و دشارژ ابرخازن‌ها تضمین می‌کند. علاوه بر این، استفاده از نانوذرات مذکور به عنوان اجزای الکترودهای سنتز شده، یک مکانیسم ذخیره‌سازی انرژی هیبریدی را به عنوان مکانیسم غالب ذخیره‌سازی انرژی نشان داد.

این مقاله خود را از سایر مطالعات مشابه از طریق جنبه‌های قابل توجه زیر متمایز می‌کند. (۱) بررسی جامعی در مورد خواص الکتروشیمیایی و مشخصه‌یابی کامپوزیت مورد استفاده با نسبت‌های مختلف نانوذرات انجام می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده پتانسیل بالایی برای الکترودهای ابرخازن دارند. (۲) استفاده از یک روش سنتز کارآمد و عملی که تولید در مقیاس صنعتی امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهد. این روش سنتز الکتروود با نسبت‌های متفاوتی از CuCrO₂ به همراه مواد مبتنی بر کربن را مورد استفاده قرار می‌دهد.

نکته مهم این است که هیچ نمونه مشابهی با نتایج قابل مقایسه در تحقیقات موجود گزارش نشده است، که این امر تازگی و تأثیر بالقوه این مطالعه را در پیشبرد توسعه و کاربرد چنین نانو موادی برجسته می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

نیتрат مس (II) تری هیدرات، نیترات کروم (III) ۹ آب، کربن فعال و متانول شرکت مرک^۳ تهیه شدند. NaOH و HCl از LabChem خریداری شدند. کربن بلک Redoxkala-SUPER P به عنوان ماده پایه کربنی در الکترودهای

¹ Activated carbon

² Carbon Black

³ Merck

سنتز شده استفاده شده است. علاوه بر این، لاستیک استایرن-بوتادین (SBR) نقش ماده نگه دارنده مواد روی فوم نیکل را ایفا می کند و آب مقطر به عنوان واسطه ای برای مخلوط کردن مواد تشکیل دهنده استفاده شد.

۲-۲- روش انجام آزمایش

سنتز CuCrO_2 با استفاده از روشی که در ادامه شرح داده می شود انجام شد. در ابتدا، یک بالن ته گرد تهیه و با $2/416$ گرم (10 میلی مول) مس (II) نیترات تری هیدرات و $2/381$ گرم (10 میلی مول) کروم (III) نیترات 9 آبه پر شد. به این بالن، 35 میلی لیتر آب مقطر اضافه شد و مخلوط حاصل در دمای اتاق هم زده شد. پس از آن، NaOH ($0/5$ مولار) با هم زدن مداوم به بالن اضافه شد. پس از 20 دقیقه، محلول به اتوکلاو منتقل و به مدت 18 ساعت در دمای 180 درجه سانتیگراد نگهداری شد. پس از عملیات هیدروترمال، رسوب تیره رنگی تشکیل شد که متعاقباً با سانتریفیوژ جداسازی شد. سپس، جامد جمع آوری شده با استفاده از HCl (1 مولار) و متانول شسته شد. روش شستشو شامل هم زدن مخلوط نانوذرات، HCl و متانول به مدت 24 ساعت بود. ذرات به مدت 24 ساعت در دمای 60 درجه سانتیگراد در آون خشک شدند تا هرگونه ناخالصی باقی مانده از بین برود. رسوب ناخالص حاصل، تحت عملیات حرارتی بیشتری در کوره قرار گرفت و به مدت 3 ساعت در معرض دمای 500 درجه سانتیگراد قرار گرفت. این عملیات حرارتی منجر به تشکیل ذرات تقریباً سیاه CuCrO_2 شد.

برای ارزیابی تأثیر اکسید فلز بر عملکرد الکتروود، یک کامپوزیت کربن فعال-کربن سیاه سنتز شد. فرآیند سنتز با هم زدن $0/4$ گرم کربن فعال و $0/04$ گرم کربن سیاه با استفاده از همزن آغاز شد. پس از آن، $3/24$ گرم آب مقطر در دمای اتاق به مخلوط پودر اضافه شد. مخلوط به مدت 30 دقیقه هم زده شد و پس از آن، فلاسک حاوی مخلوط به مدت 30 دقیقه دیگر در حمام اولتراسونیک تحت عملیات فراصوت قرار گرفت. این عملیات منجر به تشکیل کامپوزیت کربن فعال-کربن سیاه شد.

پس از سنتز مواد کامپوزیتی، مرحله بعدی شامل ساخت الکتروودها بود. بر اساس توضیحات ارائه شده و داده های جدول ۲، در مجموع ۵ نمونه الکتروود تهیه شد. در این مرحله، ساخت الکتروودهای $\text{CuCrO}_2/\text{AC-CB}$ و CuCrO_2 شرح داده خواهد شد. لازم به ذکر است که ساخت سایر الکتروودها نیز از روشی مشابه پیروی کرده است. الکتروود مبتنی بر CuCrO_2 برای اهداف ارزیابی سنتز شد. در این فرآیند، $0/44$ گرم نانوذرات سنتز شده CuCrO_2 با $3/24$ گرم آب مقطر مخلوط شدند. پس از 30 دقیقه هم زدن، مخلوط تحت عملیات فراصوت 30 دقیقه ای قرار گرفت. جهت پایداری بیشتر در اتصال اجزای الکتروود، $0/12$ گرم SBR LATEX هنگام هم زدن اضافه شد و محلول حاصل برای پوشش فوم نیکل استفاده شد. سپس الکتروود به مدت 24 ساعت در شرایط محیط خشک شد. برای ارزیابی خواص الکتروشیمیایی کامپوزیت هیبریدی $\text{CuCrO}_2/\text{AC-CB}$ ، کربن فعال (AC) و کربن سیاه (CB) در ترکیب CuCrO_2 گنجانده شدند. نسبت های خاص CuCrO_2 ، AC و CB بر اساس جدول ۲ تعیین شدند. AC و CB با CuCrO_2 مخلوط شدند و ۵ الکتروود با استفاده از این مخلوط ساخته شدند. مقادیر درج شده در این جدول پس از بررسی های و تست های متعدد انتخاب شده است. همچنین لازم به ذکر است که بر اساس نتایج این پژوهش استفاده از مقدار بیشتری نانوذره منجر به کاهش پایداری الکتروود می گردد.

Table 2. The composition of the synthesized electrode

Electrode	AC/CB (g)	SBR (g)	H ₂ O (g)	CuCrO ₂ (g)
CuCrO ₂	0/0	0.12	3.24	0.44
CuCrO ₂ C1	0.4/0.04	0.12	3.24	0.22
CuCrO ₂ C2	0.4/0.04	0.12	3.24	0.44
CuCrO ₂ C3	0.4/0.04	0.12	3.24	0.66
CuCrO ₂ C4	0.4/0.04	0.12	3.24	0.88

۳-۲- مشخصه یابی مواد

آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس PANalytical X'Pert PRO ساخت کشور هلند و با استفاده از تابش با طول موج تابش $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1/542 \text{ \AA}$) انجام شد. آنالیز BET با استفاده از دستگاه JWGB, JW-BK132F ساخت کشور چین جهت بررسی تخلخل نانوذرات سنتز شده مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، بررسی‌های FESM و TEM به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی TESCAN MIRA III (ساخت کشور جمهوری چک) و ZEISS EM10 (ساخت آلمان) انجام شد. سنتز تمام مونولیت‌ها با استفاده از کوره MUFFLE، مدل HD150 PAD انجام شد. بررسی‌های الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانسیواستات گالوانواستات Metrohm PGSTAT204 با FRA32M انجام شد.

۴-۲- مشخصه یابی الکتروشیمیایی

آزمایش‌های الکتروشیمیایی با استفاده از یک سیستم آزمایش ۳ الکترودی انجام شد که شامل اجزای زیر بود: الکتروود کار (CuCrO₂/AC-CB)، الکتروود مرجع (Ag/AgCl)، الکتروود شمارنده (Graphite rod) و محلول ۱ مولار KOH به عنوان الکتروولیت. الکترودهای تهیه شده در این پژوهش با ابعاد ۱ cm × ۱ cm مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. ظرفیت ویژه (F.g⁻¹) الکتروود کار سلسله مراتبی از طریق آزمایش ولتامتری چرخه‌ای (CV) تعیین شد. برای ارزیابی پایداری چرخه‌ای، چگالی انرژی و چگالی توان الکتروود، از آزمایش شارژ-دشارژ گالوانواستاتیک (GCD) استفاده شد. ظرفیت ویژه (C_p) پس از قرار دادن الکتروود در معرض چندین چرخه شارژ و دشارژ با چگالی جریان ثابت با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه شد. همچنین دانسیته انرژی و دانسیته توان نیز از روابط (۴) و (۵) قابل محاسبه است. در این روابط I نشان دهنده دانسیته جریان (A.g⁻¹)، m نشان دهنده جرم مواد الکتروود (g)، ΔV نشان دهنده پنجره پتانسیل (V) و v نشان دهنده نرخ روبش (mV.s⁻¹) است.

$$SC_p(F.g^{-1}) = \frac{\int I \times dV}{v \times m \times \Delta V} \quad (2)$$

$$C(F.g^{-1}) = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \quad (3)$$

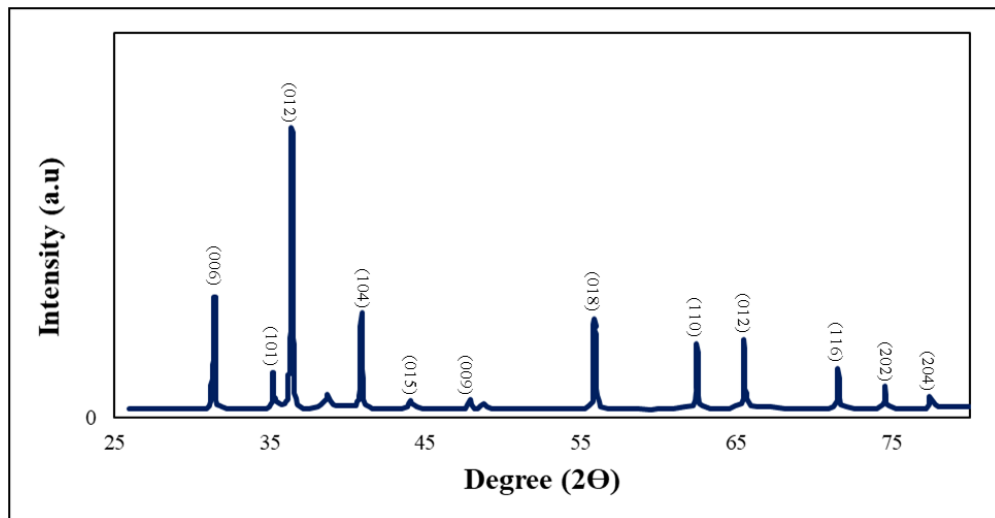
$$E_d(Wh.kg^{-1}) = \frac{C_{sp} \times \Delta V^2}{2 \times 3.6} \quad (4)$$

$$P_d(W.kg^{-1}) = \frac{E \times 3600}{\Delta t} \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی و ساختار نمونه‌های سنتز شده

شکل ۳ طیف پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به CuCrO_2 را نشان می‌دهد. پیک‌های مشاهده شده در فواصل 2θ به ترتیب $31/42$ ، $35/24$ ، $36/56$ ، $40/85$ ، $44/12$ ، $47/82$ ، $55/88$ ، $62/48$ ، $65/27$ ، $72/31$ ، $74/43$ و $77/32$ به ترتیب مربوط به صفحات شبکه‌ای (006) ، (101) ، (012) ، (104) ، (015) ، (009) ، (018) ، (101) ، (110) ، (116) ، (202) و (204) هستند. با توجه به نتایج XRD، پیک‌های ذکر شده و این واقعیت که هر جزء مورد استفاده پیک‌های منحصر به فرد خود را دارد، می‌توان نتیجه گرفت که CuCrO_2 به درستی و تقریباً بدون ناخالصی سنتز شده است. با مقایسه پیک‌های الگوی XRD با کارت استاندارد JCPDS مربوط به CuO و CuCrO_2 ، مقادیر اندکی از CuO در نمونه قابل مشاهده است. از طرفی، ساختار پیش بینی شده از نتایج منتج از XRD نشان می‌دهد که ساختار CuCrO_2 سنتز شده به صورت دلفوسیت^۱ می‌باشد. ساختار دلفوسیت بواسطه لایه‌ای بودن می‌تواند منجر به رسانایی بالا و پایداری مکانیکی بالا گردد.



شکل ۳. الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات CuCrO_2

Figure ۳. XRD Pattern of CuCrO_2 nano-material

مساحت سطح ویژه و تخلخل نانوذرات سنتز شده با استفاده از BET بررسی شد. نتایج این آنالیز در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق داده‌های جدول ۳، تخلخل نانوذرات سنتز شده به عنوان مزوپور طبقه‌بندی می‌شود. شایان ذکر است که مزوپورها^۲ نقش مخازن یا کانال‌هایی برای الکترولیت‌ها را ایفا می‌کنند. با توجه به اینکه یون‌های الکترولیت می‌توانند با استفاده از این کانال‌ها به سرعت در سطح داخلی الکتروود نفوذ کنند، در مقایسه با

¹ Delafossite

² Mesoporous

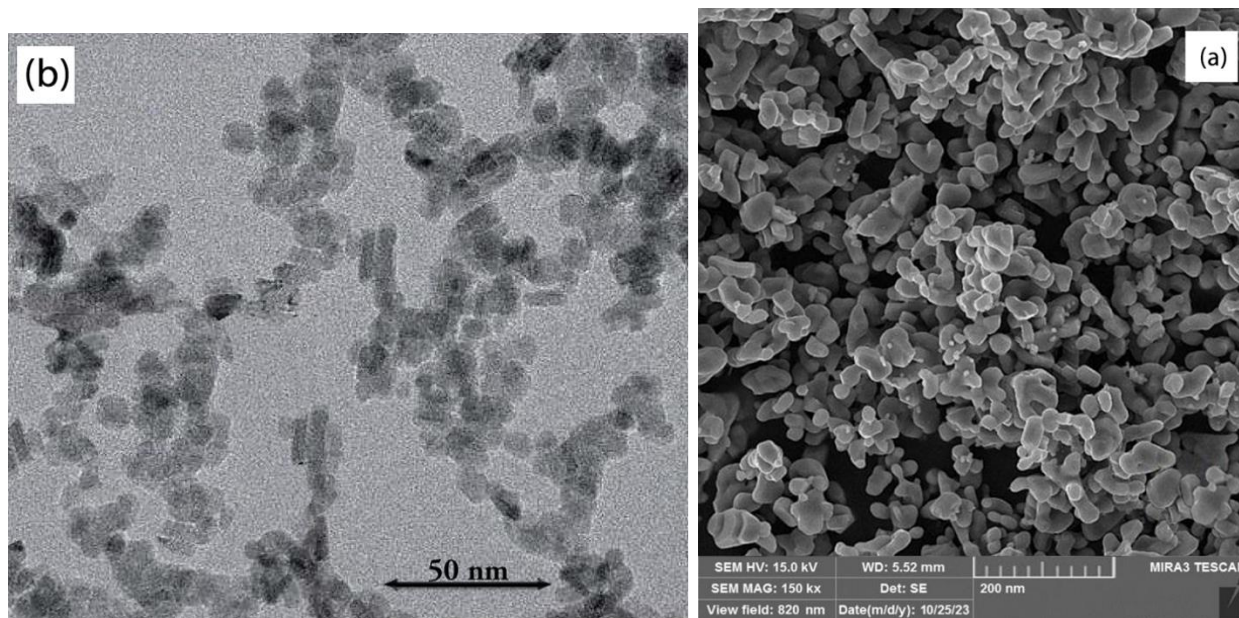
میکروپورها، استفاده از الکترودهای دارای مزوپور منجر به ظرفیت خازنی ویژه بالاتر در نرخ‌های شارژ-دشارژ سریع می‌شود [۲۶].

Table 3. The results of BET analysis for synthesized CuCrO_2

جدول 3. نتایج آزمایش BET برای CuCrO_2

Sample	S_{BET} ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Pore Size ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	Pore Diameter (nm)
CuCrO_2	35/240	0.3736	10

آنالیز FESEM روش بررسی دیگری برای توصیف مورفولوژی نانوذرات سنتز شده است. با توجه به اندازه نانوذرات CuCrO_2 ، از TEM در کنار FESEM استفاده شد. شکل ۴ نتایج FESEM و TEM نانوذرات CuCrO_2 را با مقیاس‌های مربوطه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ می‌توان به این مورد پی برد که اندازه نانوذرات سنتز شده به صورت تقریباً یک پارچه است. با توجه به ابعاد نانوذرات، نتیجه آنالیز TEM در شکل ۴ (b) می‌تواند این موضوع را به صورت شفافتری نشان دهد.

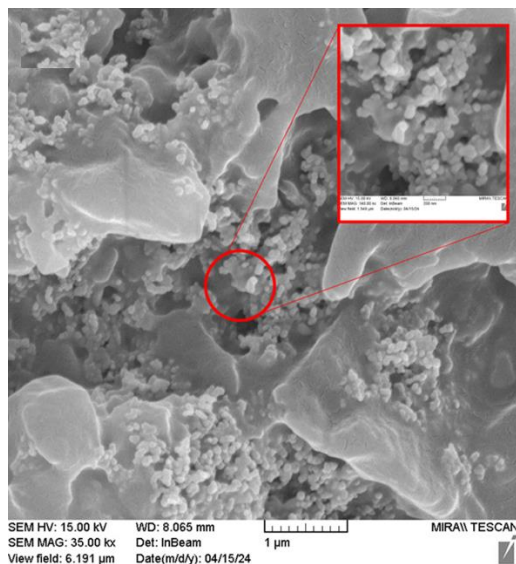


شکل ۴. نتایج (a) آنالیز FESEM و (b) آنالیز TEM مربوط به نانوذرات CuCrO_2 سنتز شده

Figure 4. Results of (a) FESEM and (b) TEM for synthesized CuCrO_2 nanoparticles

پس از اطمینان از سنتز و ساخت صحیح نانوذرات CuCrO_2 آزمایش FESEM از الکترودهای CuCrO_2/C انجام شد. این آزمایش برای بررسی ساختار شماتیک الکترودهای سنتز شده انجام شد و نتایج آن در شکل ۵ قابل مشاهده است. یکی از مشاهدات قابل توجه در تصویر، تخلخل ساختاری ماده کامپوزیتی است. عامل اصلی مؤثر در این تخلخل، اجزای فلزی در الکتروده است. این منافذ به عنوان مجاری برای تسهیل حرکت سریع الکترون‌ها عمل می‌کند. این پدیده منجر به کاهش مقاومت انتقال الکترون شده و در نتیجه رسانایی و قابلیت سرعت الکتروده را افزایش می‌دهد. همچنین، این تخلخل‌ها سطح تماس الکتروده با الکترولیت را افزایش داده و در نتیجه سطح ویژه

الکتروود را افزایش داده و در نتیجه ظرفیت ویژه را بالا می‌برند. همانگونه که مشاهده می‌گردد، SBR استفاده شده در ساخت الکتروود، سطوح و تخلخل الکتروود را نپوشانیده است. همچنین نانوذرات ساختاری در سطح تشکیل داده اند که منجر به افزایش سطح تماس الکتروود و الکتروولیت گردد. این موضوع می‌تواند منجر به رسانایی بالاتر و افزایش بازدهی الکتروود گردد.

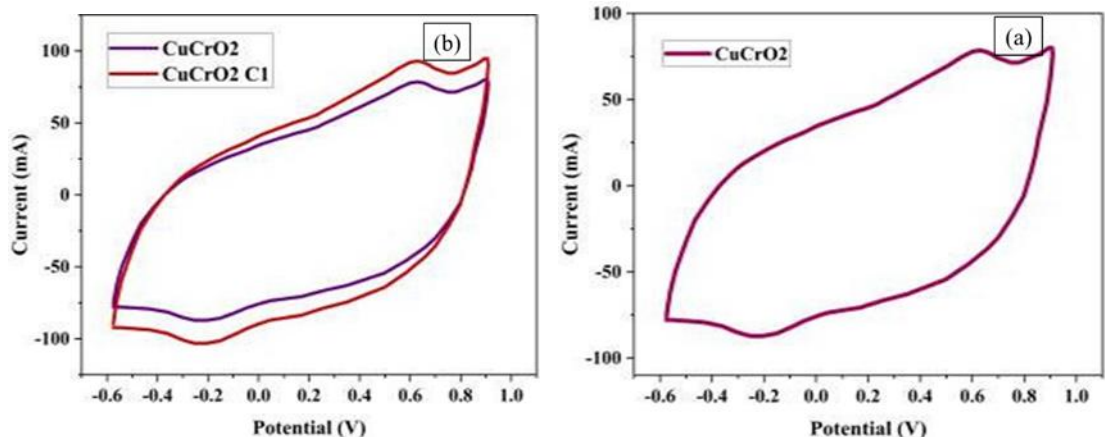


شکل ۵. تصویر FESEM الکتروود CuCrO_2 سنتز شده

Figure 5. FESEM of CuCrO_2 synthesized electrode

۳-۲- ارزیابی عملکرد الکتروشیمیایی

مطابق با اهداف این مقاله، یک بررسی جامع برای تجزیه و تحلیل خواص الکتروشیمیایی CuCrO_2 و CB-AC به عنوان یک کامپوزیت دو فلزی هیبریدی انجام شده است. شکل ۶ منحنی‌های CV الکترودهای CuCrO_2 و CuCrO_2/CB را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ (a) نشان داده شده است، پیک‌های مشاهده شده در ولتاژهای 0.2 و 0.8 ولت، همراه با شماتیک کروی-مستطیلی متمایز، نشان دهنده وجود یک مکانیسم شبه خازنی برای ذخیره بار در کامپوزیت دو فلزی CuCrO_2 است. این پیک‌ها نشان از وجود واکنش اکسایش و کاهش در الکتروود به واسطه نانوذرات CuCrO_2 دارد. همچنین، طبق نتیجه CV الکتروود CuCrO_2 ، ظرفیت ویژه 550 F.g^{-1} در 50 mV.s^{-1} بود. شکل ۶ منحنی‌های CV مربوطه به CuCrO_2/CB را به عنوان یک کامپوزیت دو فلزی هیبریدی نشان می‌دهد. همانطور که از منحنی نشان داده شده در شکل ۶ (b) مشخص است، شدت پیک‌های اکسیداسیون کاهش یافته و شماتیک منحنی به سمت شکل مستطیلی تری تغییر یافته است. این مشاهده، استفاده از مکانیسم ذخیره‌سازی هیبریدی توسط کامپوزیت را تأیید می‌کند. با این حال، الکتروود CuCrO_2 منجر به ظرفیت ویژه 650 F.g^{-1} در 50 mV.s^{-1} شد. ظرفیت ویژه مناسب حاصل از کامپوزیت CuCrO_2/CB را می‌توان به مساحت سطح ویژه مناسب و رسانایی بالای الکتروود نسبت داد. به منظور بررسی بیشتر خواص الکتروشیمیایی کامپوزیت $\text{CuCrO}_2/\text{CB-AC}$ ، کامپوزیت با نسبت‌های مختلف CuCrO_2 سنتز شد و سپس آزمایش‌های CV انجام شد.



شکل ۶. منحنی CV مربوط به (a) CuCrO_2 ، (b) CuCrO_2 و $\text{CuCrO}_2\text{C1}$ در 50 mV.s^{-1}

Figure 6. CV Curve of a) CuCrO_2 b) CuCrO_2 , $\text{CuCrO}_2\text{C1}$ at 50 mV.s^{-1}

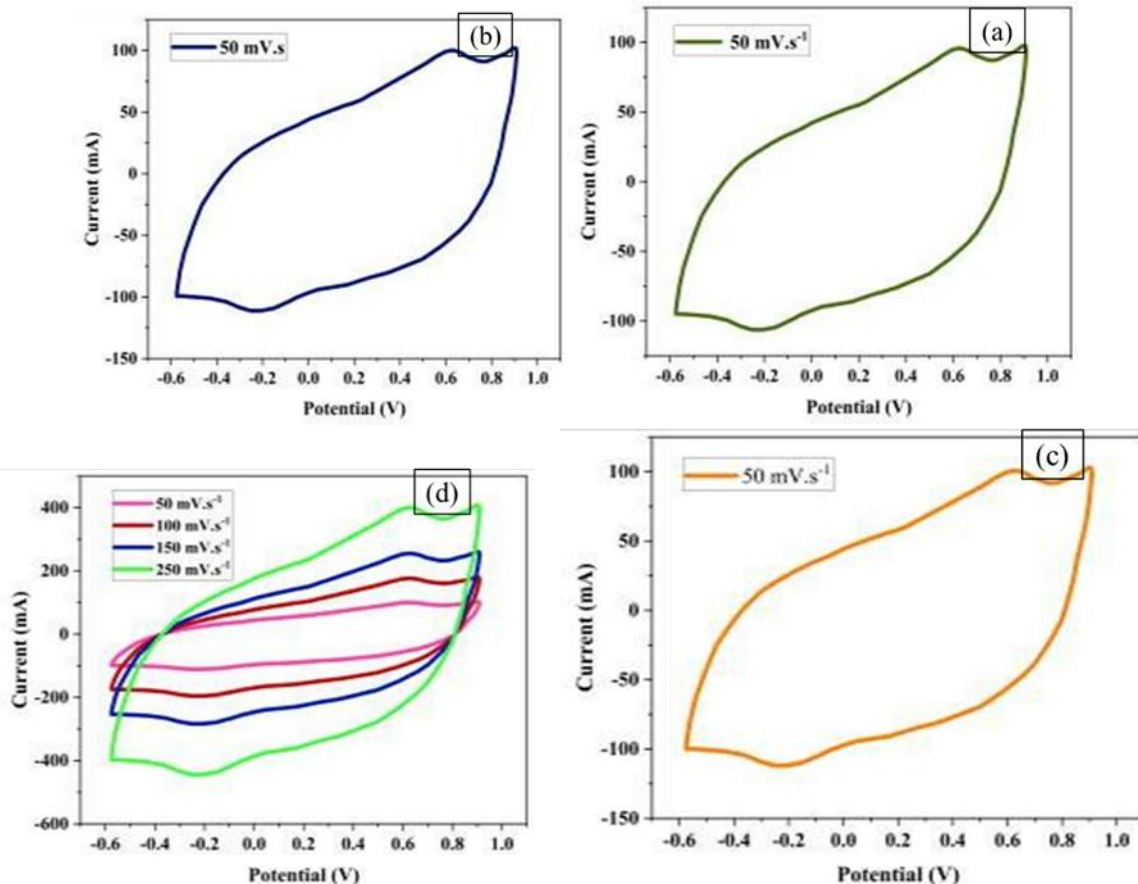
همانطور که در شکل‌های ۷ (a)، (b) و (c) نشان داده شده است، می‌توان روند قابل تشخیصی را مشاهده کرد که در آن افزایش نسبت CuCrO_2 در کامپوزیت $\text{CuCrO}_2/\text{CB-AC}$ با افزایش متناسب در مساحت داخلی منحنی‌های ولتامتری چرخه‌ای (CV) همراه است. در واقع، با افزایش مساحت سطح داخلی منحنی ولتامتری چرخه‌ای (CV)، افزایش متناظری در ظرفیت ویژه وجود دارد. الکترودهای $\text{CuCrO}_2\text{C2}$ ، $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ و $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ منجر به ظرفیت ویژه ۶۷۰، ۷۰۰ و ۷۰۵ فاراد در گرم در ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه شدند. نکته قابل توجه این است که در نسبت ۰/۷۵، ظرفیت ویژه کامپوزیت به مقدار بهینه خود می‌رسد. افزایش‌های بعدی در نسبت CuCrO_2 تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت ویژه نداشت. علاوه بر این، با توجه به صرف زمان و هزینه برای کامپوزیت $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ ، کامپوزیت $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد و بنابراین ظرفیت ویژه بهینه‌ای را نشان داد و یک کامپوزیت بهینه بین تمام کامپوزیت‌های $\text{CuCrO}_2\text{C1}$ ، $\text{CuCrO}_2\text{C2}$ و $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ است.

در ساختار و ماهیت مواد بکار برده شده در الکتروده باید به این نکته توجه داشت که CuCrO_2 یک ماده با ساختار دلفوسیت است که می‌تواند واکنش فارادیکی^۱ از خود به نمایش گذارد. در عین حال نفوذ یونی محدود در این دسته از نانوذرات ناگزیر است. با این وجود استفاده از مواد پایه کربنی در این پژوهش که دارای رسانایی الکترونی بالا و سطح ویژه بالا هستند می‌تواند انتقال الکترون سریع و دسترسی بالای الکترولیت را به ارمغان آورند. CuCrO_2 به صورت ذاتی نیمه‌رسانای p-type است اما رسانایی آن از مواد پایه کربنی کمتر است. وقتی CuCrO_2 روی بستری از مواد پایه کربنی قرار می‌گیرد کربن مانند شبکه رسانا عمل می‌کند و انتقال الکترون بین ذرات اکسید از طریق سطح کربن بسیار سریع‌تر انجام می‌شود و در نتیجه کاهش مقاومت داخلی را شاهد خواهیم بود. از طرفی مواد کربنی دارای تخلخل است و این منافذ مسیرهای انتقال الکترولیت را باز می‌کنند و یون‌های OH^-

¹ Faradic reaction

به راحتی به سطح CuCrO نفوذ کرده و واکنش های فارادیک را فعال می کنند. نتیجه این امر افزایش ظرفیت استفاده شده از CuCrO (بیش از سطح بیرونی آن) است.

برای بررسی بیشتر خواص الکتروشیمیایی کامپوزیت CuCrO_2C_3 ، آزمایش CV با نرخ های روبش از ۵۰ تا ۲۵۰ میلی ولت بر ثانیه انجام شد. نتایج این بررسی را می توان در شکل ۷ (d) مشاهده کرد. همانطور که از منحنی ارائه شده در شکل ۷ (d) مشاهده می شود، افزایش نرخ روبش منجر به جابجایی پیک های اکسیداسیون به سمت جریان های بالاتر شد. نکته مهم این است که این پیک ها حتی در نرخ های روبش بالا نیز قابل تشخیص باقی ماندند. ظرفیت ویژه به دست آمده برای کامپوزیت CuCrO_2C_3 در نرخ های روبش ۵۰ تا ۲۵۰ میلی ولت بر ثانیه برابر با ۷۰۰، ۶۱۶، ۵۹۵ و ۵۶۰ فاراد بر گرم است. حفظ ۸۰٪ ظرفیت ویژه همراه با ۵ برابر نرخ روبش، نتیجه مطلوبی برای کامپوزیت CuCrO_2C_3 محسوب می شود. سنتز مناسب این کامپوزیت که منجر به افزایش اثر هم افزایی CuCrO_2 و CB-AC در داخل کامپوزیت شده است، به همراه رسانایی الکتریکی بالا و سطح ویژه بالای CuCrO_2 ، مهم ترین دلایل نتایج الکتروشیمیایی مطلوب هستند.



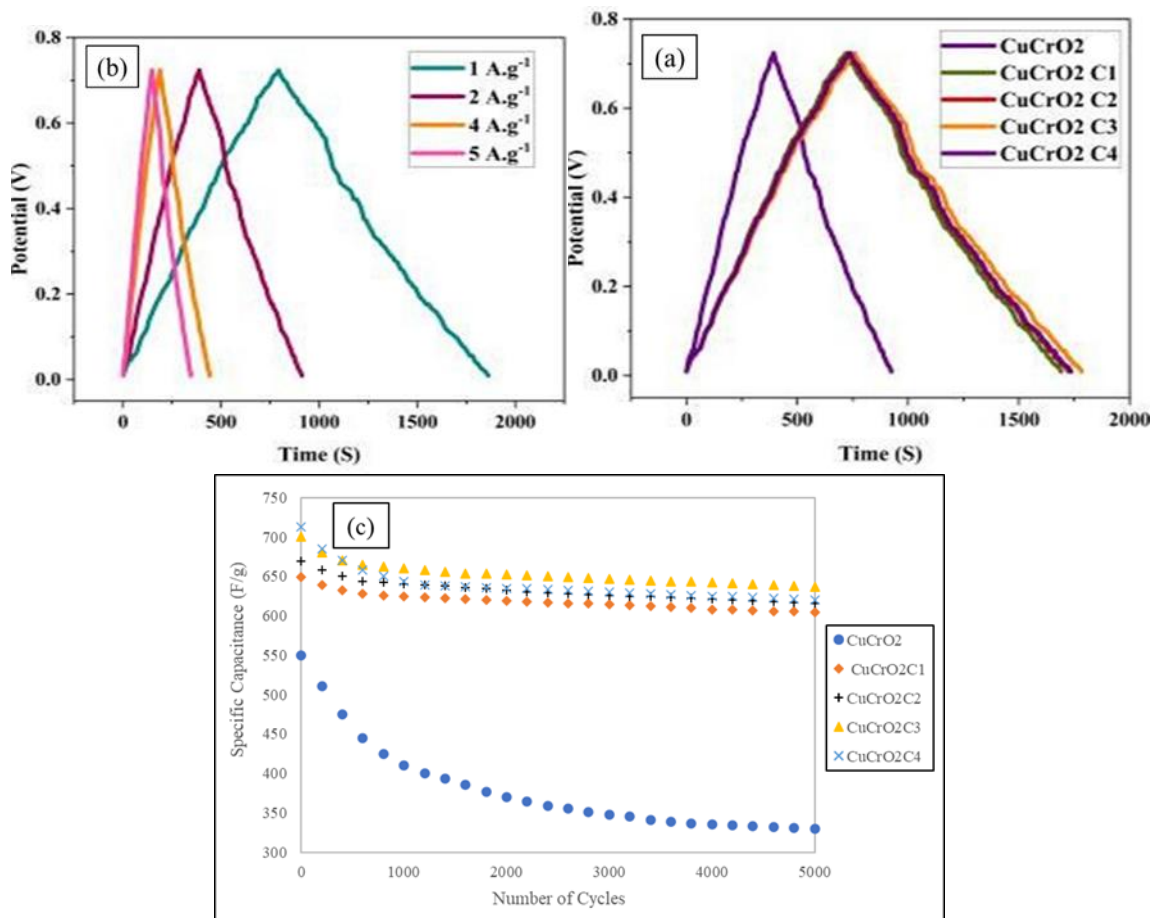
شکل ۷. دیاگرام CV الکتروکود (a) CuCrO_2C_2 (b) CuCrO_2C_3 (c) CuCrO_2C_4 و (d) CuCrO_2C_3

Figure 7. CV Curve of a) CuCrO_2C_2 b) CuCrO_2C_3 c) CuCrO_2C_4 d) CuCrO_2C_3

خواص الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های سنتز شده با استفاده از آزمون شارژ-دشارژ گالوانواستاتیک (GCD) ارزیابی شدند. از طریق این ارزیابی، دو پارامتر محوری، یعنی پایداری چرخه‌ای و قابلیت سرعت کامپوزیت‌ها، تعیین و نتایج حاصل مورد تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای قرار گرفتند. شکل ۸ نتایج آزمون GCD انجام شده بر روی کامپوزیت‌ها را پس از ۵۰۰۰ چرخه شارژ و دشارژ، با استفاده از چگالی جریان ۱ آمپر بر گرم نشان می‌دهد.

شکل ۸ (a)، (b) و (c) پایداری چرخه‌ای الکترودهای CuCrO_2 ، $\text{CuCrO}_2\text{C1}$ ، $\text{CuCrO}_2\text{C2}$ ، $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ و $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ را نشان می‌دهد که با پاسخ آن به ۵۰۰۰ چرخه شارژ و دشارژ متوالی در چگالی جریان خاص ۱ آمپر بر گرم نشان داده شده است. الکترودهای CuCrO_2 ، $\text{CuCrO}_2\text{C1}$ ، $\text{CuCrO}_2\text{C2}$ ، $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ و $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ به ترتیب ۶۰٪ (330 F.g^{-1})، ۹۳٪ (604 F.g^{-1})، ۹۲٪ (616 F.g^{-1})، ۹۱٪ (637 F.g^{-1}) و ۸۷٪ (620 F.g^{-1}) از ظرفیت ویژه اولیه خود را حفظ کرده‌اند. افزودن مواد پایه کربنی (AC-CB) به کامپوزیت منجر به افزایش قابل توجه پایداری چرخه‌ای شده است. این پدیده را می‌توان با مقایسه پایداری چرخه‌ای به‌دست‌آمده برای دو الکترودهای CuCrO_2 و $\text{CuCrO}_2\text{C1}$ خاص توضیح داد. مشاهده مهمی که تأثیر نسبت‌های مختلف مواد پایه فلزی را در کامپوزیت برجسته می‌کند، کاهش تدریجی پایداری چرخه‌ای تا نسبت نشان داده شده توسط $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ و به دنبال آن کاهش شدید از این نسبت به نسبت نشان داده شده توسط $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ است.

این نکته قابل ذکر است که مواد کربنی ساختاری سبک و منعطف دارند و در حین سیکل‌های شارژ-دشارژ تغییر حجم CuCrO_2 (در اثر تغییر حالت اکسایش) مهار می‌شود. در این صورت الکترودها ترک نمی‌خورند و تداوم تماس الکتریکی حفظ می‌شود. با افزایش مقدار CuCrO_2 این پایداری کسب شده از مواد کربنی نقش کم‌رنگتری در کل ساختار ایفا می‌کنند و نتیجه آن کاهش پایداری چرخه‌ای و عدم حفظ ظرفیت در سیکل‌های زیاد است.



شکل ۸. منحنی GCD الکتروود (a) CuCrO_2 , $\text{CuCrO}_2\text{C1}$, $\text{CuCrO}_2\text{C2}$, $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ و $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ در 1 A.g^{-1} ، (b) $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ در 1 تا 5 A.g^{-1} و (c) منحنی long cycling performance مربوط به CuCrO_2 , $\text{CuCrO}_2\text{C1}$, $\text{CuCrO}_2\text{C2}$, $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ و $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ در 1 A.g^{-1} تا 5 A.g^{-1}

Figure 8. GCD Curve of a) CuCrO_2 , $\text{CuCrO}_2\text{C1}$, $\text{CuCrO}_2\text{C2}$, $\text{CuCrO}_2\text{C3}$, and $\text{CuCrO}_2\text{C4}$ at 1 A.g^{-1} b) $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ at 1 to 5 A.g^{-1} and c) long cycling performance curves of CuCrO_2 , $\text{CuCrO}_2\text{C1}$, $\text{CuCrO}_2\text{C2}$, $\text{CuCrO}_2\text{C3}$, and $\text{CuCrO}_2\text{C4}$

در میان الکترودهای بررسی شده، $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ بر اساس نتایج به دست آمده، عملکرد برتر را نشان داد. برای ارزیابی قابلیت سرعت این کامپوزیت، یک آزمایش شارژ-دشارژ گالوانوستاتیک (GCD) در طیف وسیعی از چگالی‌های جریان، به ویژه 1 آمپر بر گرم تا 5 آمپر بر گرم انجام شد. یافته‌های این تحقیق، همانطور که در شکل ۸ (b) نشان داده شده است، نشان می‌دهد که چگالی جریان بالا با کاهش زمان شارژ و دشارژ مطابقت دارد. این پدیده مشاهده شده با رفتار مورد انتظار در سیستم‌های الکتروشیمیایی همسو است. یک مشاهده قابل توجه مربوط به پایداری ظرفیت ویژه با افزایش چگالی جریان است. کامپوزیت $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ حفظ قابل توجه 92% از ظرفیت ویژه اولیه خود را هنگامی که چگالی جریان از 1 به 5 آمپر بر گرم افزایش یافت، نشان داده است. حفظ 92% از ظرفیت ویژه برای این کامپوزیت هیبریدی دوفلزی را می‌توان به عنوان یک نتیجه‌ی مثال‌زدنی در نظر گرفت که به ندرت در مطالعات مشابه مشاهده شده است. دستیابی به این نتیجه‌ی مطلوب را می‌توان به دو عامل محوری نسبت داد، اول نرخ انتقال بار قابل توجه و نهایتاً رسانایی افزایش‌یافته‌ی کامپوزیت. استفاده از یک روش سنتز سریع، آسان، مقرون‌به‌صرفه و سبز که قادر به ایجاد تخلخل مناسب در ساختار کامپوزیت و بهره‌برداری مؤثر از خواص ذاتی هر

جزء به همراه اثرات هم‌افزایی آن‌ها باشد، منجر به نتیجه‌ای فوق‌العاده مطلوب شده است که فاقد هرگونه تحقیق قابل مقایسه است.

خلاصه‌ای از نتایج الکتروشیمیایی به‌دست‌آمده برای تمامی نمونه‌های سنتز شده را می‌توان در جدول ۴ مشاهده کرد. نتایج به‌دست‌آمده از هر ۵ نمونه بسیار امیدوارکننده تلقی می‌شوند و هر نمونه پتانسیل قابل‌توجهی را به شیوه‌ای متمایز از خود نشان می‌دهد. با این حال، در میان الکترودهای تهیه‌شده، $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ مطلوب‌ترین نتایج را نشان داد که می‌توان آن را با سایر الکترودهای مشابه در جدول ۴ مقایسه کرد.

جدول 4. مقایسه ظرفیت ویژه و گایداری چرخه ای نمونه های سنتز شده

Table 4. Comparison of the specific capacity and cycle stability of the all-synthesized composite together

Composite	Specific Capacitance (F.g^{-1})	Scan Rate (mV.s^{-1})	Cycle Stability (%)	E_d (Wh.kg^{-1})	P_d (W.kg^{-1})
CuCrO_2	550	50	60	49	259
$\text{CuCrO}_2\text{C1}$	650	50	93	58	262
$\text{CuCrO}_2\text{C2}$	670	50	92	60	269
$\text{CuCrO}_2\text{C3}$	700	50	91	62	280
$\text{CuCrO}_2\text{C4}$	705	50	87	63	283

۴- نتیجه گیری

ابرخازن‌ها به دلیل ویژگی‌های عملکردی منحصر به فردشان در مقایسه با دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی جایگزین، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. الکتروود، که به عنوان جزء اصلی در ساختار ابرخازن مسئول ذخیره‌سازی بار عمل می‌کند، مورد بررسی‌های گسترده‌ای قرار گرفته است. در حوزه مواد الکتروود، مواد پایه فلزی به دلیل رسانایی استثنایی خود توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، در حالی که مواد پایه کربنی به دلیل پایداری چرخه‌ای قابل توجهشان مورد توجه تحقیقات قرار گرفته‌اند. چالش‌های اصلی مرتبط با استفاده از این دو نوع ماده در کامپوزیت‌های هیبریدی، حول روش‌های سنتز آنها و محدودیت‌هایی که مانع از مقیاس‌پذیری صنعتی آنها می‌شود، می‌چرخد.

هدف این مقاله، به‌کارگیری یک روش سنتز آسان و بررسی خواص الکتروشیمیایی الکتروود حاوی CuCrO_2 و مواد پایه کربنی فعال و کربن سیاه است که حاوی نسبت‌های مختلفی از مواد پایه فلزی بودند. پس از بررسی، مشاهده شد که کامپوزیت $\text{CuCrO}_2\text{C3}$ تحت بررسی، نتایج الکتروشیمیایی به‌طور قابل‌توجهی ایده‌آل‌تری در مقایسه با سایر کامپوزیت‌ها نشان داده است. عامل اصلی مؤثر در دستیابی به این نتایج مثال‌زدنی را می‌توان به استفاده از روش سنتز مناسب و تکنیک‌های ساخت دقیق نسبت داد.

منابع

- [1] Mohammadzadeh Aydisheh, H., Rostami, R., & Momeni Hamaneh, M.M. (2024). Electrochemical plating of Selenium Nanoparticles on Titanium Oxide Nanotubes modified with Tungsten by simultaneous anodizing method for application in Solar Supercapacitors. *Iranian Chemical Engineering Journal*, e209043, [In Persian]
- [2] Daraee, M., Sadeghhassani, S., & Samiee, L. (2019). Application of Graphene for Producing of Clean Energy. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 18, 50-64, [In Persian].
- [3] Tie, D., Huang, S., Wang, J., Ma, J., Zhang, J., & Zhao, Y. (2020). Hybrid energy storage devices: advanced electrode materials and matching principles. *Energy Storage Mater*, 21, 22–40.
- [4] Benoy, S. M., Pandey, M., Bhattacharjya, D., & Saikia, B.K. (2022). Recent trends in supercapacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials. *Journal of Energy Storage*, 52, 104938.
- [5] Sharma, K., Arora, A., & Tripathi, S.K. (2019). Review of supercapacitors: Materials and devices. *Journal of Energy Storage*, 21, 801-825.
- [6] Salleh, N.A., Kheawhom, S., Hamid, N.A.A., Rahiman, W., & Mohamad, A.A. (2023). Electrode polymer binders for supercapacitor applications: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3470-3491.
- [7] Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L.. (2013). Supercapacitors: review of materials and fabrication methods. *Journal of energy engineering*, 139, 72-79.
- [8] Gilak, M.R., Pedram, M.Z., & Naikoo, G. (2023). Enhancement electrochemical properties of supercapacitors using hybrid CuO/Ag/rGO based nanoporous composite as electrode materials. *Journal of Energy Storage*, 74, 109330.
- [9] Hou, C., Yang, W., Kimura, H., Xie, X., Zhang, X., Sun, X., Yu, Z., Yang, X., Zhang, Y., & Wang, B. (2023). Boosted lithium storage performance by local build-in electric field derived by oxygen vacancies in 3D holey N-doped carbon structure decorated with molybdenum dioxide. *Journal of Materials Science & Technology*, 142, 185-195.
- [10] Yang, W., Peng, D., Kimura, H., Zhang, X., Sun, X., Pashameah, R.A., Alzahrani, E., Wang, B., Guo, Z., & Du, W. (2022). Honeycomb-like nitrogen-doped porous carbon decorated with Co₃O₄ nanoparticles for superior electrochemical performance pseudo-capacitive lithium storage and supercapacitors. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5, 3146-3157.
- [11] Lee, E.H., Kim, E.B., Akhtar, M.S., & Ameen, S. (2022). Delafossite CuCrO₂ nanoparticles as possible electrode material for electrochemical supercapacitor. *Ceramics International*, 48, 16667-16676.
- [12] Sakthinathan, S., Rajakumaran, R., Keyan, A.K., Yu, C.L., Wu, C.F., Vinothini, S., Chen, S.M., & Chiu, T.W. (2021). Novel construction of carbon nanofiber/CuCrO₂ composite for selective determination of 4-nitrophenol in environmental samples and for supercapacitor application. *RSC advances*, 11, 15856-15870.

- [13] Jennifer, P.S.J., Muthupandi, S., Niranjana, S., Ruban, M.J.R., Madhavan, J., Prathap, S., & Raj, M.V.A. (2022). Investigation of MnO₂/CuO/rGO ternary nanocomposite as electrode material for high-performance supercapacitor. *Inorganic Chemistry Communications*, 146, 110218.
- [14] Singh, M.K., Gupta, A.K., Krishnan, S., Guha, N., Marimuthu, S., & Rai, D.K. (2021). A new hierarchically porous Cu-MOF composited with rGO as an efficient hybrid supercapacitor electrode material. *Journal of Energy Storage*, 43, 103301.
- [15] Komal, N., Ali, G., Sohail, M., Mazhar, M., Malik, Z., & Wattoo, M.H.S. (2023). Facile preparation of porous Cu, Ni, and Cu–Ni alloy as electrodes for supercapacitor application. *Materials Chemistry and Physics*, 295, 127060.
- [16] Adewinbi, S.A., Maphiri, V.M., Taleatu, B.A., Marnadu, R., Shkir, M., Hakami, J., Kim, W.K., & Gedi, S. (2022). Binder-less fabrication, some surface studies, and enhanced electrochemical performance of Co, Cu-embedded MnO₂ thin film electrodes for supercapacitor application. *Ceramics International*, 48, 26312-26325.
- [17] Shanmugasundaram, E., Ganesan, V., Narayanan, V., Vellaisamy, K., Saleh, N.I., & Thambusamy, S. (2024). Construction of a binder-free PANI-CQD-Cu electrode via an electrochemical method for flexible supercapacitor applications. *Nanoscale Advances*, 6, 1765-1780.
- [18] Bhattacharya, D., Ghoshal, D., Mondal, D., Paul, B.K., Pal, J., Gupta, B., Bose, N., Nandy, P., Basu, M., & Das, S. (2021). Delafossite type CuCo_{0.5}Ti_{0.5}O₂ composite structure: a futuristic ceramics for supercapacitor and EMI shielding application. *Ceramics International*, 47, 9907-9922.
- [19] Xu, P., Liu, J., Liu, T., Ye, K., Cheng, K., Yin, J., Cao, D., Wang, G., & Li, Q. (2016). Preparation of binder-free CuO/Cu₂O/Cu composites: A novel electrode material for supercapacitor applications. *RSC advances*, 6, 28270-28278.
- [20] Al-Thabaiti, S.A., Mostafa, M.M.M., Ahmed, A.I., & Salama, R.S. (2023). Synthesis of copper/chromium metal organic frameworks-Derivatives as an advanced electrode material for high-performance supercapacitors. *Ceramics International*, 49, 5119-5129.
- [21] Zhang, C., Xie, A., Zhang, W., Chang, J., Liu, C., Gu, L., Duo, X., Pan, F., & Luo, S. (2021). CuMn₂O₄ spinel anchored on graphene nanosheets as a novel electrode material for supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 34, 102181.
- [22] Wang, Y., Wang, L., Yang, D., & Deng, M. (2014). Imputing missing values for genetic interaction data. *Methods*, 67, 269-277.
- [23] Bao, L., Zang, J., & Li, X. (2011). Flexible Zn₂SnO₄/MnO₂ core/shell nanocable– carbon microfiber hybrid composites for high-performance supercapacitor electrodes. *Nano letters*, 11, 1215-1220.

- [24] Wang, R., Sui, Y., Yang, F., Qi, J., Wei, F., He, Y., Meng, Q., & Sun, Z. (2018). Synthesis of Cu₂O by oxidation-assisted dealloying method for flexible all-solid-state asymmetric supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 2080-2090.
- [25] Ma, W., Nan, H., Gu, Z., Geng, B., & Zhang, X. (2015). Superior performance asymmetric supercapacitors based on ZnCo₂O₄@MnO₂ core-shell electrode. *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 5442-5448.
- [26] Yousif, Q.A., Mahdi, K.M., & Alshamsi, H.A. (2021). Enhanced photovoltaic performance of dye-sensitized solar cell based on ZnO nanoparticles and ZnO/graphene nanocomposites. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68, 1637-1643.