



ارزیابی عملکرد کربن فعال با سطح ویژه بالا از پیش‌ماده‌ی زیستی پوست نارگیل در سامانه‌های ابرخازنی هیبرید یون-روی با قابلیت شارژ/دشارژ

سریع

نیما دلیر^{۱*}، علی زین‌الدینی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده علوم و فناوری‌های بین‌رشته‌ای، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری، گروه شیمی فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*صندوق پستی: ۱۷۵-۱۴۱۱۵، تهران، ایران
n.dalir@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

چکیده

پیشرفت روزافزون وسایل الکترونیکی قابل حمل و خودروهای برقی، تقاضا برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با کارایی بالا را به شدت افزایش می‌دهد. اما متأسفانه فناوری‌های فعلی در این حوزه هرکدام نقاط ضعف خاص خود را دارند. ابرخازن‌ها از چگالی انرژی پایین رنج می‌برند، باتری‌های لیتیم‌یون با مخاطرات ایمنی همراه هستند و باتری‌های قلیایی روی/دی‌اکسید منگنز نیز پایداری مناسبی در طول چرخه‌های مکرر ندارند. در این پژوهش، ما نوع جدیدی از سیستم ذخیره‌سازی انرژی با عنوان ابرخازن هیبریدی روی-یون (ZHS) معرفی می‌کنیم که در آن از کربن فعال، فلز روی و محلول آبی سولفات روی به ترتیب به عنوان الکترود مثبت، الکترود منفی و الکترولیت استفاده می‌شود. عملکرد این دستگاه بر پایه‌ی دو فرایند برگشت‌پذیر جذب و دفع یون‌ها روی سطح کربن فعال در سمت کاتد، و رسوب‌گذاری و حل‌شدن یون‌های روی روی آند فلزی استوار است. این مکانیسم دوگانه به ابرخازن‌های هیبریدی یون-روی امکان می‌دهد تا انرژی الکتریکی را به‌طور مکرر و با سرعت بالا ذخیره و آزاد کنند. نتایج نشان می‌دهد که این دستگاه‌ها به ظرفیت ویژه‌ای معادل ۱۰۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم و پایداری چرخه‌ای مطلوب دست می‌یابند. با توجه به ایمنی عالی، قابلیت شارژ/دشارژ سریع و طول عمر بسیار زیاد، این ابرخازن‌های هیبریدی روی-یون می‌توانند به عنوان گزینه‌هایی امیدوارکننده برای نسل بعدی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مطرح شوند.

کلمات کلیدی: ابرخازن هیبریدی روی-یون، زیست‌توده، الکترولیت آبی، ذخیره‌سازی انرژی

۱- مقدمه

جامعه‌ی مدرن امروزی به دلیل مصرف بی‌سابقه‌ی انرژی، توجه ویژه‌ای به سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی دارد که بتوانند انرژی را با کارایی بالاتر ذخیره کنند و در زمان نیاز مورد استفاده قرار دهند [۱]. ابرخازن‌ها، به عنوان یکی از نمونه‌های شاخص این سیستم‌ها، از چگالی توان چشمگیر و پایداری چرخه‌ای بسیار خوبی برخوردارند [۲-۵]. با این وجود، ظرفیت انرژی کم‌تر آنها نسبت به باتری‌ها، توسعه‌ی کاربردهای کلان‌مقیاس آنها را با محدودیت مواجه کرده است. از این رو، عمده‌ی پژوهش‌های فعلی در حوزه‌ی ابرخازن‌ها، بر ارائه راهکارهایی برای افزایش چگالی انرژی آنها متمرکز شده است. مهم‌ترین این راه‌بردها عبارتند از: (الف) تولید مواد سازنده‌ی الکتروود با ویژگی‌های خازنی مطلوب، و (ب) بالا بردن ولتاژ عملکرد دستگاه از طریق استفاده از الکتروولیت‌های آلی یا طراحی ابرخازن‌های نامتقارن [۶].

یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای رسیدن به چگالی انرژی بالا بدون از دست دادن چگالی توان زیاد، طراحی ابرخازن‌های هیبریدی است که از ترکیب یک الکتروود با رفتار شبه‌باتری و یک الکتروود با رفتار خازنی ساخته می‌شوند. این نوع ابرخازن‌ها را گاهی زیرمجموعه‌ای از ابرخازن‌های نامتقارن در نظر می‌گیرند. به عنوان مثال، تاکنون نمونه‌هایی از ابرخازن‌های هیبریدی لیتیم-یون، سدیم-یون و پتاسیم-یون معرفی شده‌اند که در هر یک به ترتیب از یون‌های تک‌بار مثبت Li^+ ، Na^+ و K^+ به عنوان حامل‌های شارژ استفاده شده است [۷، ۸]. اما نقطه ضعف اصلی این سیستم‌ها، استفاده از الکتروولیت‌های آلی است که مخاطرات ایمنی به همراه دارد. علاوه بر این، کمیابی لیتیوم و نیاز به فرایند پیش-لیتیوم‌سازی نیز باعث می‌شود که ساخت ابرخازن‌های لیتیم-یون، علاوه بر پرهزینه بودن، از پیچیدگی بالایی برخوردار باشد [۹-۱۱]. از سوی دیگر، تحقیقات جدید حاکی از آن است که سامانه‌های مبتنی بر یون‌های چندظرفیتی مانند Zn^{2+} ، Ca^{2+} و Al^{3+} در قیاس با نمونه‌های یک‌ظرفیتی، برتری‌هایی از جمله دینامیک انتقال بار سریع‌تر، را دارند [۱۲]. یکی از چالش‌های اساسی در ابرخازن‌های هیبریدی روی-یون، این است که انجام

مکرر فرایند آبکاری و حذف روی در شرایطی که مقدار روی محدود است، موجب بروز رفتارهای ناپایدار در آند روی می‌شود. از سوی دیگر، اگر مقدار روی بیش از حد باشد، چگالی انرژی کل دستگاه کاهش می‌یابد. همچنین، باید در نظر داشت که روی فلزی در مجاورت هوا به سرعت اکسید می‌شود. به همین دلیل، برای گسترش کاربردهای صنعتی این سیستم‌های نوظهور ذخیره‌سازی انرژی، لازم است پژوهش‌های بیشتری برای طراحی آرایش‌های گوناگون برای آنها انجام شود [۱۳-۱۵].

در مطالعه‌ی حاضر، آرایشی نوین برای ابرخازن‌های هیبریدی روی-یون مبتنی بر ذخیره‌سازی یون‌های چندظرفیتی طراحی شد تا امکان ذخیره و آزادسازی برگشت‌پذیر انرژی الکتریکی فراهم شود. در این طراحی، کربن فعال حاصل از بیوجار پوست نارگیل به عنوان کاتد و پودر روی به عنوان آند استفاده شده است و محیط الکتروولیت از محلول‌های آبی حاوی یون Zn^{2+} تشکیل شده است. این سیستم علاوه بر توان خروجی بالا، از قابلیت شارژ و دشارژ در سرعت‌های بسیار بالا نیز برخوردار بودند. به طور کلی، سیستم ابرخازن هیبریدی روی-یون جدید معرفی شده در این کار، گزینه‌ای بسیار امیدوارکننده برای ساخت دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی با کارایی بالا، ایمنی فوق‌العاده و سازگاری با محیط‌زیست است که می‌تواند در وسایل الکترونیکی پوشیدنی و قابل حمل و همچنین خودروهای هیبریدی برقی استفاده شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد اولیه

پودر کربن فعال مورد استفاده نیز از یک مرجع تجاری از شرکت مرک تهیه شد و بدون هیچگونه فرایند خالص‌سازی اضافی، مستقیماً به کار رفت. کربن فعال تجاری عمدتاً از مواد اولیه کربندار مانند زغال سنگ (مخصوصاً آنتراسیت)، پوست نارگیل، چوب و پیت تولید می‌شود. انتخاب ماده اولیه به هزینه، در دسترس بودن و کاربرد نهایی بستگی دارد؛ برای مثال، پوست نارگیل معمولاً کربنی با ریزحفره‌های بیشتر تولید می‌کند که کربن مورد استفاده نیز با توجه به مدل و کد اختصاصی حاصل از منبع پوست نارگیل است. پودر روی نیز به صورت آزمایشگاهی از شرکت Janssen

است.

بسته‌بندی شدند.

۲-۲ روش‌های شناسایی و آنالیز

برای تعیین ساختار بلوری نمونه‌ها و الکترودها، از آنالیز پراش پرتو ایکس با دستگاه در محدوده‌ی زاویه‌ای ۱۰ تا ۹۰ درجه و با سرعت پویش ۵ درجه بر دقیقه استفاده شد. برای تعیین نقص و درصد گرافیتی بودن نیز آزمون رامان گرفته شده است همچنین، مساحت سطح ویژه و تخلخل پودر کربن فعال با استفاده از دستگاه جذب-واجذب گاز BET مدل اندازه‌گیری شد.

۳-۲ فرایند ساخت دستگاه‌ها

برای ساخت الکتروکاتد کربن فعال به همراه پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF) با نسبت وزنی ۸۰:۲۰ در حلال N-متیل‌پیرولیدینون پخش شده و دوغابی همگن حاصل شد. این دوغاب روی فویل استیل (به عنوان کلکتور جریان) پوشش داده شد و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. الکتروکاتد نیز با روش مشابه و با استفاده از پودر روی و گرافیت با ترکیب وزنی ۱:۲ به عنوان آند و کاغذ صافی به عنوان جداکننده به کار رفتند. نمونه با الکترولیت ۳ مولار سولفات روی مورد آزمایش قرار گرفته است. کلیه‌ی این سیستم‌ها در سلول‌های کیسه‌ای لمینتی

۴-۲ آزمون‌های الکتروشیمیایی

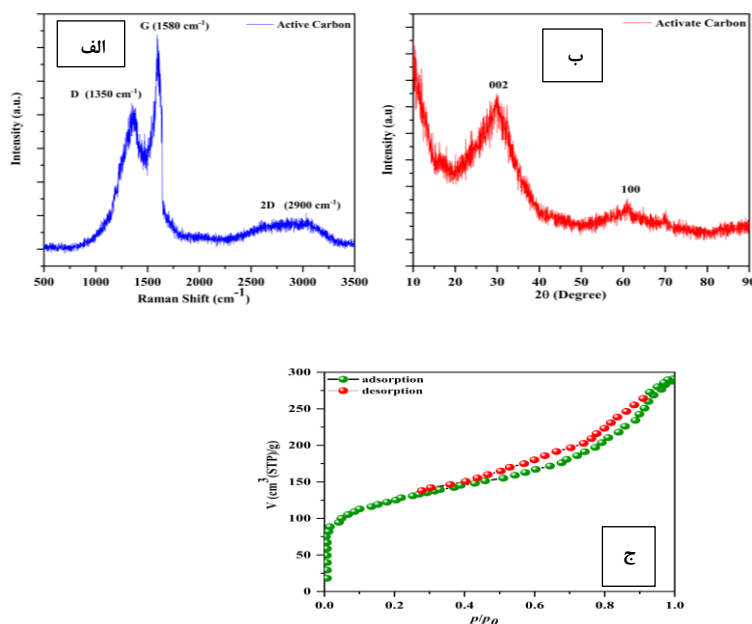
ارزیابی عملکرد الکتروشیمیایی با استفاده از دو دستگاه الکتروشیمیایی EG&G و باتری تستر کیمیاستات انجام شد. آزمون‌های انجام شده شامل ولتامتری چرخه‌ای، شارژ-دشارژ با جریان ثابت بودند.

۳- نتایج و بحث

۱-۳ ماهیت شناسی مواد

۱-۱-۳ آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

کربن فعال ساختار بلوری منظمی ندارد، بلکه از نانوبلورک‌های گرافیت مانند با چینش توربوستراتیک (لایه‌های جابه‌جا و نامنظم) تشکیل شده است. الگوی XRD کربن فعال حاصل از بیوپچار مشتق شده از پوست نارگیل در شکل ۱-الف آورده شده است که در الگوی آن دو قله پهن دیده می‌شود که قله (۰۰۲) در زاویه حدود ۲۳ تا ۲۶ متناظر با فاصله بین لایه‌های کربنی (d_{002}) بوده و قله (۱۰۰) در ۴۳ نشان‌دهنده نظم نسبی درون صفحه‌ای حلقه‌های آروماتیک است.



شکل ۱ کربن فعال مشتق شده از پوست نارگیل. (الف) XRD؛ (ب) Raman؛ (ج) BET

در فرایند فعال سازی مزوحفره‌هایی (قطر ۲ تا ۵۰ نانومتر) نیز ایجاد شده باشد، ایزوترم ممکن است ترکیبی از نوع I و IV همراه با حلقه هیستریزس باشد. آنالیز سطح ویژه و تخلخل برای کربن فعال حاصل در شکل ۱-ج آورده شده است سطح ویژه BET برای کربن فعال حاصل حدود ۲۵۰-۳۰۰ مترمربع بر گرم است که سطح بالا منجر به ظرفیت جذب فوق‌العاده می‌شود. حجم کل حفره‌ها حدود ۰,۳ سانتی‌مترمکعب بر گرم بوده که هرچه حجم بیشتر باشد، قابلیت ذخیره‌سازی مولکول‌ها بیشتر است. در مورد کربن فعال حاصل این مقدار متوسط است.

۳-۲ بررسی‌های الکتروشیمیایی

شکل ۲-الف آزمون شارژ و تخلیه شارژ گالوانستاتیک را نشان می‌دهد که شامل مقادیر شارژ، دشارژ و بازده کولمبی در چرخه‌های متوالی است. ظرفیت ویژه اولیه حدود ۱۰۰ میلی آمپر ساعت بر گرم در چگالی جریان ۱ آمپر بر گرم است که پس از ۵۰ چرخه به ۵۵ میلی‌آمپر ساعت بر گرم رسیده است این مقدار برای کربن فعال در سیستم‌های آبی بسیار رقابتی است و نشان از استفاده‌ی بهینه از سطح ویژه و تخلخل دارد. در چرخه‌های اولیه، بازده کولمبی ۱۰۰ درصد است که نشان‌دهنده‌ی برگشت‌پذیری کامل فرایند جذب/واجذب یون‌ها و عدم وجود واکنش‌های جانبی برگشت‌ناپذیر است. از چرخه‌ی ۶ به بعد، بازده کولمبی به تدریج از ۱۰۰ درصد به حدود ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد؛ از جمله تله‌اندازی یون‌ها که در آن برخی از یون‌های روی ممکن است در منافذ بسیار ریز کربن فعال به دام بیفتند و در فرایند دشارژ آزاد نشوند؛ واکنش‌های جانبی سطحی، که منجر به تشکیل لایه‌های نازک اکسیدی یا جذب ناخالصی‌ها روی سطح کربن می‌شوند و در نتیجه باعث افزایش مقاومت و کاهش کارایی کولمبی می‌شود؛ و یا همچنین تغییرات ریزساختاری. اگرچه منحنی‌های ولتاژ-ظرفیت همپوشانی دارند، اما ممکن است تغییرات جزئی در توزیع اندازه‌ی منافذ رخ دهد که بر بازده تأثیر بگذارد.

شکل ۲-ب نیز منحنی‌های شارژ/دشارژ را برای چرخه‌های ۱، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ نشان می‌دهد.

پهن بودن قله‌ها و نبود قله‌های تیز، ماهیت عمدتاً آمورف کربن فعال را تأیید می‌کند. فاصله بین لایه‌ای d₀₀₂ بین ۰,۳۵ تا ۰,۳۹ نانومتر محاسبه شده است. این مقدار بزرگتر از گرافیت خالص (۰,۳۳۵ نانومتر) بوده و نشان‌دهنده بی‌نظمی بیشتر و اتصالات عرضی یا گروه‌های عاملی بین لایه‌هاست. هرچه d₀₀₂ بزرگ‌تر باشد، ساختار بازتر و برای جذب مساعدتر است. با استفاده از فرمول شرر (Scherrer) می‌توان ارتفاع بلورک (Lc) و قطر بلورک (La) را از پهنای قله‌ها محاسبه کرد. برای کربن فعال حاصل، Lc حدود ۱ نانومتر (معادل ۲ تا ۵ لایه گرافیتی) و La حدود ۳ نانومتر است. کوچک‌بودن این ابعاد یعنی صفحات کربنی منظم بسیار ریزند و بخش عمده ماده بی‌نظم است.

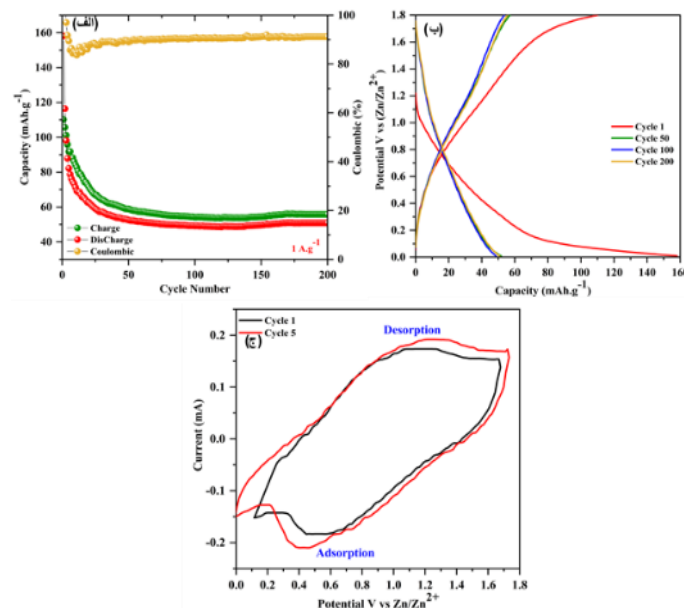
۳-۱-۲ آنالیز طیف‌سنجی رامان (Raman)

در طیف رامان کربن فعال حاصل از بیوپچار مشتق شده از پوست نارگیل دو باند اصلی دیده می‌شود که در شکل ۱-ب به وضوح قابل مشاهده است. باند G در حدود cm^{-1} ۱۵۸۰-۱۶۰۰ که از ارتعاشات کششی پیوندهای sp^2 در حلقه‌ها و زنجیره‌های کربنی (ساختار گرافیتی) ناشی می‌شود. باند D در حدود cm^{-1} ۱۳۵۰ که ناشی از تنفس حلقه‌های آروماتیک است و تنها در حضور بی‌نظمی، نقص‌ها و مرز بلورک‌ها ظاهر می‌شود و باند 2D در cm^{-1} ۲۷۰۰-۲۹۰۰ نیز دیده می‌شود که پهن و ضعیف است.

نسبت شدت Id/Ig معیار اصلی بی‌نظمی است. برای کربن فعال معمولاً این نسبت بالاتر از ۱ (مثلاً ۱,۲ تا ۱,۵) و حتی تا ۲) گزارش می‌شود که نشان‌دهنده حضور بالای نقص‌ها، لبه‌های باز و گروه‌های عاملی است اما در نمونه کربن فعال حاصل این مقدار کمتر از ۱ و حدود ۰,۸ است که نشان‌دهنده بی‌نظمی کمتر در ساختار کربن فعال پوست نارگیل و ساختار لایه و گرافیتی بودن است. اگر کربن فعال دارای نانوحفره‌های گرافیتی شده باشد، گاهی باند 2D اندکی تیزتر می‌شود، ولی در کربن‌های کاملاً آمورف، 2D بسیار پهن و ضعیف دیده می‌شود.

۳-۱-۳ آنالیز اندازه‌گیری سطح ویژه و تخلخل (BET)

برای کربن فعال، ایزوترم جذب-واجذب معمولاً از نوع I طبق طبقه‌بندی IUPAC است، که نشان‌دهنده ساختاری عمدتاً میکروحفره‌ای (قطر کمتر از ۲ نانومتر) می‌باشد. اگر



شکل ۲ کربن فعال مشتق شده از پوست نارگیل. (الف) شارژ و تخلیه شارژ گالوانستاتیک (GCD)؛ (ب) پروفایل تخلیه و شارژ؛ (ج) ولتامتری چرخه‌ای

ذخیره یون چند ظرفیتی طراحی شدند. بر اساس یافته‌های حاصل از آنالیزهای ساختاری XRD، رامان و BET و ارزیابی‌های الکتروشیمیایی CV، GCD و داده‌های پایداری، می‌توان نتیجه گرفت که کربن فعال حاصل از بیوچار پوست نارگیل، با دارا بودن ساختار توربوستراتیک متشکل از نانوبلورک‌های گرافیتی بسیار ریز $L_c \approx 1 \text{ nm}$ و $L_a \approx 3 \text{ nm}$ و فاصله‌ی بین‌لایه‌ای بزرگ‌تر از گرافیت خالص d_{002} معادل $0.35-0.39 \text{ nm}$ (سطح ویژه‌ی قابل توجه، $250-300 \text{ m}^2/\text{g}$ با غالب بودن ریزحفره‌ها (بیش از $70-80 \text{ درصد}$ حجم کل)، بستر مناسبی برای جذب/وا جذب برگشت‌پذیر یون‌های روی فراهم می‌آورد. این ویژگی‌های ساختاری، همراه با نسبت کم‌تر نقص‌های گرافیتی نسبت I_d/I_g برابر با 0.8 که حاکی از نظم نسبی بالاتر و حضور گروه‌های عاملی سطحی مناسب است، به عملکرد الکتروشیمیایی بسیار مطلوبی منجر شده است؛ به‌گونه‌ای که الکتروود کربن فعال در سیستم ابرخازن هیبریدی روی-یون، ظرفیت ویژه‌ای حدود $100 \text{ میلی آمپر ساعت بر گرم}$ در جریان 1 آمپر بر گرم از خود نشان می‌دهد و منحنی‌های شارژ/دشارژ خطی و متقارن آن (مشخصه‌ی رفتار خازنی دولایه‌ی الکتریکی) تا 200 چرخه بدون تغییر

پتانسیل با افزایش ظرفیت به‌صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد (از 1.8 ولت تا 0.1 ولت)، که رفتار مشخصه‌ی خازن‌های دولایه‌ی الکتریکی (EDLC) است. این امر نشان می‌دهد که مکانیسم غالب در الکتروود کربن فعال، جذب/وا جذب فیزیکی یون‌ها روی سطح متخلخل کربن است، نه واکنش‌های فارادایک. منحنی‌های مربوط به چرخه‌های 50 ، 100 و 200 عملاً بر یکدیگر منطبق هستند. این هم‌پوشانی نشان‌دهنده‌ی پایداری ساختاری و الکتروشیمیایی فوق‌العاده کربن فعال در طول 200 چرخه‌ی اولیه است و نیز بیانگر عدم تخریب قابل‌توجه در ریزساختار منافذ یا سطح مؤثر است. محدوده‌ی پتانسیلی 0.1 تا 1.8 ولت نسبت به Zn^{2+}/Zn برای کربن فعال در این الکترولیت آبی، نشان‌دهنده‌ی پنجره‌ی پایداری الکتروشیمیایی مطلوب و عدم وقوع واکنش‌های تجزیه‌ی آب در این بازه است. همچنین، شکل ۲-ج که مربوط به ولتامتری چرخه‌ای است به وضوح پیک‌های جذب و وا جذب یون‌ها در سطح کربن فعال را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

ابرخازن‌های هیبریدی روی آبی با کارایی بالا بر اساس

سایت‌های فعال را تسهیل کرده که می‌توان به بیشینه‌ی ظرفیت و چگالی انرژی در دستگاه دست یافت. در مجموع، کربن فعال زیست‌مبنای حاصل از پوست نارگیل نه تنها از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی مقرون به صرفه است، بلکه با ویژگی‌های ساختاری-الکتروشیمیایی برجسته‌ی خود، مسیری نوین برای توسعه‌ی نسل بعدی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با کارایی بالا و پایدار ارائه می‌دهد.

۵-منابع

- [1] Electrochemical energy storage in a sustainable modern society. Energy & Environmental Science (RSC Publishing) DOI:10.1039/C3EE42613K, (n.d.). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/ee/c3ee42613k> (accessed June 25, 2026).
- [2] Materials for electrochemical capacitors | Nature Materials, (n.d.). <https://www.nature.com/articles/nmat2297> (accessed June 25, 2026).
- [3] Flexible electrodes and supercapacitors for wearable energy storage: a review by category - Journal of Materials Chemistry A (RSC Publishing) DOI:10.1039/C5TA10582J, (n.d.). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/ta/c5ta10582j> (accessed June 25, 2026).
- [4] Carbon-based materials as supercapacitor electrodes -Chemical Society Reviews (RSC Publishing), (n.d.). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2009/cs/b813846j> (accessed June 25, 2026).
- [5] Scopus -Document Details, (n.d.). <https://www.scopus.com/pages/publications/0142088003> (accessed June 25, 2026).
- [6] Scopus -Document Details, (n.d.). <https://www.scopus.com/pages/publications/84908210890> (accessed June 25, 2026).
- [7] Graphene-Based Materials for Lithium-Ion Hybrid Supercapacitors -Ma -2015 -Advanced Materials. Wiley Online Library, (n.d.). <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201501622> (accessed June 25, 2026).
- [8] Self-Templated Formation of Uniform NiCo₂O₄ Hollow Spheres with Complex Interior Structures for Lithium-Ion Batteries and Supercapacitors -Shen -2015 -Angewandte Chemie International Edition -Wiley Online Library, (n.d.). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201501622> (accessed June 25, 2026).
- [9] J. Zhang, Z. Shi, C. Wang, Effect of pre-lithiation degrees of mesocarbon microbeads anode on the electrochemical performance of lithium-ion capacitors, *Electrochimica Acta* 125 (2014), 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.01.04>.
- [10] High performance lithium-ion hybrid capacitors with pre-lithiated hard carbon anodes and bifunctional cathode electrodes - ScienceDirect, (n.d.). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775314012002> (accessed June 25, 2026).
- [11] J. Zhang, X. Liu, J. Wang, J. Shi, Z. Shi, Different types of pre-lithiated hard carbon as negative electrode material for lithium-ion capacitors, *Electrochimica Acta* 187 (2016) 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.05>.
- [12] M.-C. Lin, M. Gong, B. Lu, Y. Wu, D.-Y. Wang, M. Guan, M. Angell, C. Chen, J. Yang, B.-J. Hwang, H. Dai, An ultrafast rechargeable aluminium-ion battery, *Nature* 520 (2015) 324–328. <https://doi.org/10.1038/nature14340>.
- [13] Scopus Document Details, (n.d.). <https://www.scopus.com/pages/publications/84941711767> (accessed June 25, 2026).
- [14] J. Hao, J. Mou, J. Zhang, L. Dong, W. Liu, C. Xu, F. Kang, Electrochemically induced spinel-layered phase transition of Mn₃O₄ in high performance neutral aqueous rechargeable zinc battery, *Electrochimica Acta* 259 (2018) 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.16>.
- [15] L. Dong, X. Ma, Y. Li, L. Zhao, W. Liu, J.

Cheng, C. Xu, B. Li, Q.-H. Yang, F. Kang, Extremely safe, high-rate and ultralong-life zinc-ion hybrid supercapacitors, Energy

Storage Mater. 13 (2018) 96–102.
<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.01.003>.

Evaluation of the performance of high-specific-surface-area activated carbon from coconut shell bio-precursor in zinc-ion hybrid supercapacitor systems with fast charge/discharge capability

Nima Dalir^{1*}, Ali Zeinodiny²

1. Department of Renewable Energy, Faculty of Interdisciplinary Sciences and Technology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Ph.D. Candidate, Department of Physical Chemistry, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

n.dalir@modares.ac.ir

Receipt: 2026/07/11

Accepted: 2026/07/17

Abstract

The ever-increasing advancement of portable electronic devices and electric vehicles dramatically increases the demand for high-performance energy storage systems. Unfortunately, current technologies in this field each suffer from their own specific drawbacks. Supercapacitors suffer from low energy density, lithium-ion batteries are associated with safety hazards, and alkaline zinc/manganese dioxide batteries lack adequate stability over repeated cycles. In this research, we introduce a novel energy storage system termed zinc-ion hybrid supercapacitor (ZHS), in which activated carbon, zinc metal, and aqueous zinc sulfate solution are employed as the positive electrode, negative electrode, and electrolyte, respectively. The operation of this device is based on two reversible processes: adsorption/desorption of ions onto the surface of activated carbon at the cathode side, and deposition/dissolution of zinc ions on the metallic anode. This dual mechanism enables zinc-ion hybrid supercapacitors to repeatedly store and release electrical energy at high rates. The results demonstrate that these devices achieve a specific capacity of 100 mAh/g and favorable cycling stability. Owing to their excellent safety, fast charge/discharge capability, and ultra-long cycle life, these zinc-ion hybrid supercapacitors can be considered promising candidates for the next generation of energy storage systems.

Keywords: Zinc-ion hybrid supercapacitor, Biomass, Aqueous electrolyte, Energy storage