

## ساخت و مطالعه هیدروژل الکترولیت با قابلیت خود ترمیمی جهت استفاده در ابرخازن‌های الکتروشیمیایی

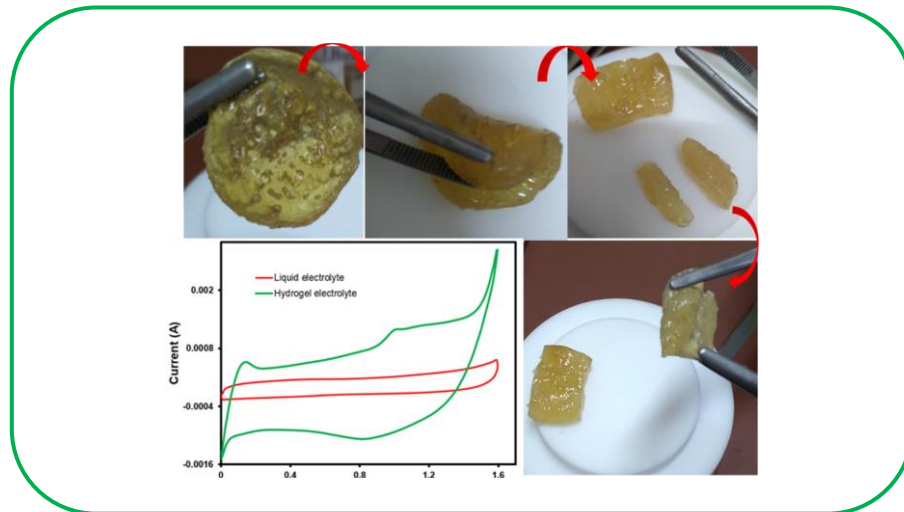
محمد برازنده<sup>۱،۲</sup> و حبیب اله کاظمی<sup>۱،۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کدپستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، ایران  
<sup>۲</sup>مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۶ دی ۱۴۰۳

**چکیده:** در سال‌های اخیر با توسعه وسایل الکترونیکی پوششی و انعطاف‌پذیر قابل حمل توجه به سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی انعطاف‌پذیر و سبک با چگالی توان بالا افزایش پیدا کرده است. یکی از مورد توجه‌ترین سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی در این زمینه، ابرخازن‌های الکتروشیمیایی انعطاف‌پذیر می‌باشد. هیدروژل الکترولیت به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزا در ابرخازن‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این میان هیدروژل‌های خودترمیم شونده انعطاف‌پذیر نقشی اساسی را در طراحی ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهند. در این کار هیدروژل الکترولیتی برپایه هیدروکسی اکریلات و وینیل‌ایمیدازولیوم تهیه گردید که توانایی خودترمیمی و انجام واکنش‌های فارادایی را دارا می‌باشد. هیدروژل سنتز شده به عنوان الکترولیت و جداکننده با هدایت یونی  $23/88 \text{ mS cm}^{-1}$  در ابرخازن‌ها به کار رفت و توانست ظرفیت ویژه  $50/94 \text{ F g}^{-1}$  را در سرعت اسکن  $5 \text{ mV s}^{-1}$  ارائه دهد. نتایج حاصل از بررسی مکانیکی و الکتروشیمیایی هیدروژل سنتزی حاکی از آن است که این هیدروژل سنتز شده می‌تواند نامزد خوبی جهت استفاده در سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی انعطاف‌پذیر از جمله ابرخازن‌ها باشد.

**کلید واژه:** سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی، ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر، هیدروژل الکترولیت‌ها، خود ترمیمی



### ۱- مقدمه

امروزه وسایل الکترونیکی پوشیدنی، قابل حمل و به ویژه وسایل الکترونیکی انعطاف‌پذیر به سرعت در دنیا پرکاربرد شده‌اند [۱-۳]. الکترولیت‌های جامد انعطاف‌پذیر با توانایی خم شدن و مقاومت مکانیکی بالا جهت توسعه وسایل الکترونیکی پوشیدنی بسیار مورد توجه می‌باشند و می‌توانند نقش به‌سزایی در این امر داشته باشند [۴-۶].

چراکه این الکترولیت‌ها هم‌زمان می‌توانند نقش رسانش یونی و جداکننده الکترودها را در سامانه داشته باشند. درحالت کلی، الکترولیت‌های جامد به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: الف) الکترولیت جامد (خشک)، ب) ژل پلیمر الکترولیت (GPE) و ج) پلی‌الکترولیت‌ها. به هر حال موانعی مانند هدایت یونی پایین ( $10^{-8}$  تا  $10^{-7} \text{ S cm}^{-1}$ ) در الکترولیت‌های جامد مانع از به کار بردن شدن گسترده آن‌ها شده است [۷]. خوشبختانه، ژل الکترولیت‌ها می‌توانند به

پژوهش‌گران به سمت ژل‌های خودترمیم‌شونده برپایه‌ی پیوند کوالانسی برگشت‌پذیر (پویا) به دلیل برتری‌های اشاره شده، کشیده شده‌اند. این موضوع بدلیل آن است که در درجه اول زمان نوترکیبی بین پیوندهای شکسته‌شده کوتاه می‌باشد (پیوندهای شکسته‌شده در زمان کوتاهی بهبود می‌یابند)، و در درجه دوم، فرایند خودترمیمی را می‌توان در محیط‌های کم‌تهاجمی انجام داد و از تاثیرگذاری بر روی ساختارهای شیمیایی و یا فیزیکی پلیمرها جلوگیری کرد. علاوه بر این، شرایط ترمیم، ملایم‌تر و راحت‌تر می‌باشد. به دلیل این ویژگی‌های استثنايي، مواد خودترمیم‌شونده مبتنی بر پیوندهای کوالانسی برگشت‌پذیر، به یک حوزه پژوهشی روبه رشد در زمینه‌های مختلف از جمله سامانه‌های ذخیره-کننده انرژی تبدیل شده است [۲۳-۲۰]. در سال‌های اخیر، هیدروژل‌های الکترولیت‌ها در زمینه ابرخازن‌های الکتروشیمیایی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و بررسی‌های زیادی در این زمینه بر روی موادی مانند هیدروژل‌های الکترولیت‌های پلی(اتیلن اکسید)، پتاسیم پلی(اکریلات)، پلی(وینیل الکل)، هیدروژل‌های الکترولیت ژلاتین و بعضی هیدروژل‌های الکترولیت‌های معدنی انجام شده است [۸، ۱۱ و ۲۴-۲۶]. همه این کارها نشان دهنده اهمیت و تأثیر به‌سزای هیدروژل‌های الکترولیت‌ها در زمینه ابرخازن‌های الکتروشیمیایی می‌باشد.

در این پژوهش، هیدروژل‌های الکترولیت اکسایش-کاهش فعال برپایه پلی‌هیدروکسی‌اکریلات و وینیل ایمیدازولیوم تهیه و همچنین از چارچوب فلز-آلی به عنوان پرکننده حین سنتز استفاده گردید که توانایی انجام واکنش‌های فارادایی و خودترمیمی را دارا می‌باشد.

## ۲- بخش تجربی

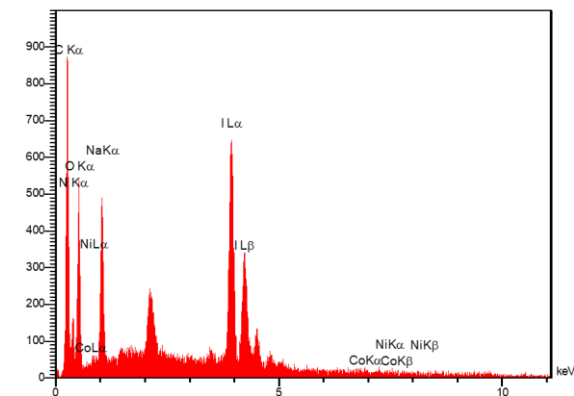
### ۱-۲- مواد شیمیایی و دستگاه‌ها

بررسی‌های الکتروشیمیایی شامل ولتامتری چرخه‌ای و امپدانس الکتروشیمیایی توسط دستگاه‌های پتانسیو-گالوانوستات زائر ساخت کشور هلند و در دمای محیط صورت گرفت. همچنین، طیف‌های زیرقرمز با توسط دستگاه وکتور ۲۲ ساخت شرکت بروکر آمریکا ثبت شدند. چارچوب فلز-آلی نیکل کبالت و همچنین هیدروژل برپایه پلی‌اکریلات و وینیل ایمیدازولیوم با استفاده از روش‌های گفته‌شده در کارهای قبلی تهیه شد [۲۷ و ۲۸]. همه مواد از شرکت سیگما آلدریج خریداری گردید و بدون خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین همه محلول‌ها با استفاده از آب بدون یون تهیه گردید.

### ۲-۲- ساخت هیدروژل اکسایش-کاهش فعال برپایه پلی‌اکریلات و وینیل ایمیدازولیوم

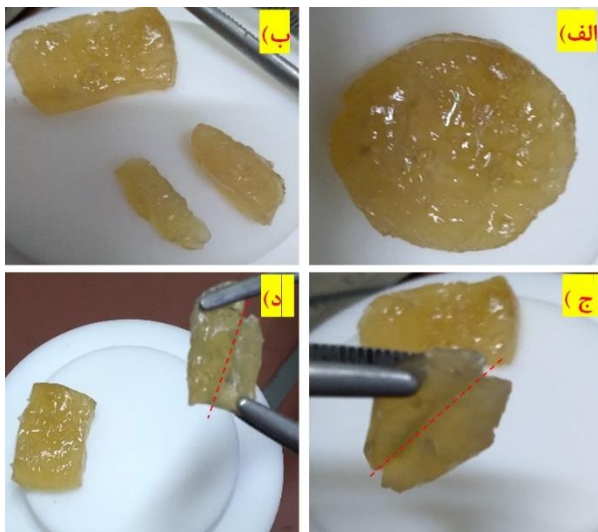
ابتدا، ۰/۳ میلی‌لیتر مونومر هیدروکسی‌پروپیل اکریلات و ۰/۵ میلی‌لیتر وینیل ایمیدازولیوم در

عنوان حواسطی بین الکترولیت‌های مایع و الکترولیت‌های جامد خشک در نظر گرفته شوند. رسانش یونی ژل پلیمر الکترولیت‌ها حدود  $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$  در دمای محیط می‌باشد که این کمیت مستلزم اضافه کردن یک نرم‌کننده با وزن مولکولی کم به سامانه پلیمر-نمک جهت تشکیل ژل پلیمر الکترولیت می‌باشد [۷]. ژل پلیمرها با دارا بودن ویژگی‌هایی مانند چسبندگی و رفتار شبه مایع به عنوان دسته‌ای از الکترولیت‌های جامد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. متأسفانه، کاربرد این ژل پلیمر الکترولیت‌ها به دلیل استفاده از حلال‌های سمی آلی، حلال‌های اشتعال‌پذیر (مانند حلال‌های پایه استر) و برهم‌کنش با الکترودهای باردار محدود می‌شوند [۷]. یک راه برای حل این مشکل، جایگزینی محلول ژل پلیمر الکترولیت‌ها با وارد کردن الکترولیت‌های آبی به داخل آن‌ها می‌باشد. این کار می‌تواند از مشکلات حالت بدون رطوبت (سختی و شکنندگی) و نبود ایمنی استفاده از مواد خطرناک و اشتعال‌پذیر جلوگیری کند. بر همین پایه، انواع مختلفی از هیدروژل‌های الکترولیت‌ها جهت استفاده در ابرخازن‌ها به وجود آمد [۱۲-۸]. با توجه به توسعه وسایل الکترونیکی انعطاف‌پذیر پوشیدنی و نیاز آن‌ها به سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی انعطاف‌پذیر، با چگالی توان بالا، مقاوم مکانیکی و خودترمیم‌شونده افزایش یافته است [۱۳ و ۱۴]. در نتیجه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر و خودترمیم‌شونده توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند، چراکه این ابرخازن‌ها توانایی بازیابی ویژگی‌های خازنی خود در مواقعی که بر اثر خمش یا تغییر فرم ساختار آن دچار خسارت شده باشد، را دارا می‌باشند [۱۵ و ۱۶]. هیدروژل‌های خودترمیم‌شونده انعطاف‌پذیر نقشی اساسی را در طراحی ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهند. در حال حاضر بیشتر کارهای پژوهشی برای ساخت ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر پوشیدنی خودترمیم‌شونده به وسیله طراحی و ساخت مواد الکتروودی و الکترولیتی جدید می‌باشد [۱۷]. در هسته این وسایل انعطاف‌پذیر خودترمیم‌شونده ژل الکترولیت‌های خودترمیم‌شونده وجود دارد که با ژل الکترولیت‌های معمولی متفاوت می‌باشند. زیرا این دسته از الکترولیت‌ها دارای تعداد زیادی از پیوندهای هیدروژنی غیرکوالانسی و پیوندهای کوالانسی برگشت‌پذیر دینامیکی می‌باشند. این پیوندها به آن‌ها امکان بازیابی ساختار داخلی و خارجی خود را به‌طور مستقل پس از آسیب‌دیدن می‌دهند. این ویژگی خودترمیمی، توانایی کاهش اثر پاره‌شدن و خسارت را در حین کارکردن وسایل انعطاف‌پذیر دارد و در نتیجه، قابلیت استحکام مکانیکی و طول عمر کارکردن وسایل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، این توانایی خودترمیمی آن‌ها، بازیابی تجهیزات را ارتقا می‌دهد و همچنین نیازهای توسعه سازگار با محیط‌زیست و پایدار را برآورده می‌کند [۱۹-۱۵]. هیدروژل‌های خودترمیم‌شونده براساس واکنش‌های شیمیایی و سازوکار خودترمیمی به دو دسته هیدروژل‌های پیوندی کوالانسی پویا و هیدروژل‌های غیرکوالانسی پویا تقسیم می‌شوند. در سال‌های اخیر،



شکل ۲. نتایج آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس مربوط به هیدروژل سنتز شده.

در ادامه، خود ترمیمی هیدروژل سنتز شده بررسی شد. برای انجام این آزمون، هیدروژل سنتز شده (شکل ۳-الف) برش داده شد. سپس قطعه‌های برش داده شده به مدت ۲۰ دقیقه در کنار هم قرار داده شد. نقاط برش داده شده با استفاده از نقاط خط چین نشان داده شده است (شکل ۳-ب). همان‌طور که مشاهده می‌شود، قطعه‌های مجزای هیدروژل دوباره به هم دیگر چسبیده و تائیدی بر پدیده خودترمیمی در هیدروژل می‌باشد (شکل ۳-ج). برای بررسی‌های بیشتر، هیدروژل خودترمیم شده مورد بررسی آزمایش کشسانی قرار گرفت (شکل ۳-د). همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحمل کشسانی و ازدیاد طول در هیدروژل نشان از ترمیم موفق ساختار هیدروژل دارد. این پدیده خودترمیمی در ساختار هیدروژل می‌تواند به افزایش کارایی ابرخازن و افزایش طول عمر آن کمک کند.

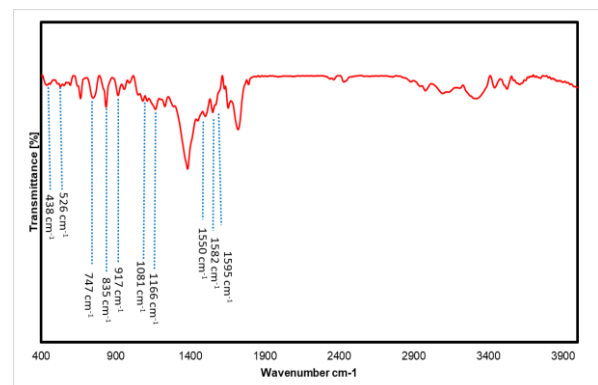


شکل ۳. شمایی از هیدروژل سنتز شده (الف)، هیدروژل برش داده شده (ب)، هیدروژل ترمیم یافته (ج)، و بررسی کشش هیدروژل ترمیم یافته (د).

۲۰ میلی لیتر محلول سدیم نیترات ۳ مولار مخلوط و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط توسط همزن مغناطیسی به همزده شد. سپس، ۱۰ میلی‌گرم از چارچوب فلز-آلی نیکل کبالت به این محلول افزوده و به مدت ۲ ساعت به همزده شد. در ادامه، ۲۵ میلی‌گرم اتصال‌دهنده عرضی  $N,N$ -متیلن بیس اکریل آمید به محلول اضافه گردید و به مدت ۲۰ دقیقه هم زدن ادامه یافت. بعد از این زمان، ۳۰ میلی‌گرم از آغازگر آمونیوم پرسولفات در جو خنثی (گاز آرگون) اضافه و محلول نهایی به مدت ۳ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا ساختار هیدروژل تشکیل گردد.

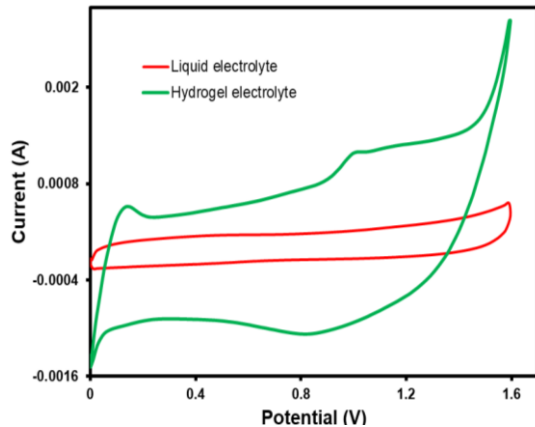
### ۳- نتایج و بحث

هیدروژل سنتز شده با طیف‌سنجی زیرقرمز مورد مشخصه‌یابی شد که طیف آن در شکل ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نوارهای مشاهده شده در نواحی ۸۳۵، ۷۴۷ و  $917\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش‌های خمشی در حلقه ایمیدازولی موجود در ساختار می‌باشد. نوارهای مشاهده شده در نواحی ۱۱۶۶، ۱۵۵۰ و  $1582\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی  $C-N$ ، ارتعاش‌های کششی  $C=N$  در حلقه ایمیدازولیوم و پیوند  $C=C$  در حلقه ایمیدازولی می‌باشد. نوار موجود در ناحیه  $1595\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش‌های کششی  $N=N$  می‌باشد و نوار مشاهده شده در ناحیه  $1081\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش‌های کششی حلقه بنزنی می‌باشد. نوارهای مشاهده شده در نواحی ۴۳۸ و  $526\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش‌های فلزات کبالت و نیکل می‌باشد، که به دلیل وجود چارچوب فلز-آلی در ساختار می‌باشد [۳۲-۲۹].

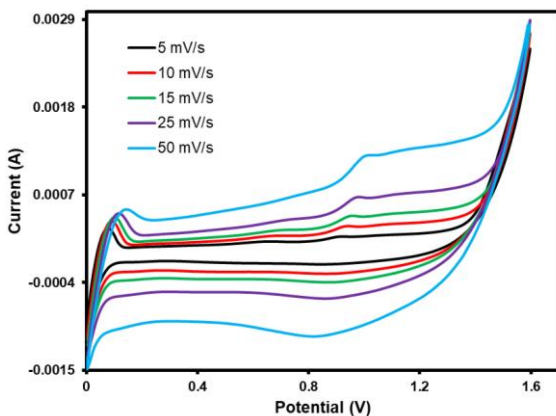


شکل ۱. طیف زیرقرمز مربوط به هیدروژل سنتز شده در این مطالعه.

همچنین هیدروژل سنتز شده با روش پراش انرژی پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود عناصر کبالت، نیکل، کربن، نیتروژن و ید نشان از تشکیل موفق هیدروژل می‌باشد.



شکل ۴. مقایسه رفتار ابرخازنی هیدروژل الکترولیت سنتز شده با الکترولیت مایع (سدیم نیترات ۳ مولار) با روش ولتامتری چرخه‌ای در سرعت روبش  $50 \text{ mV s}^{-1}$ .



شکل ۵. بررسی رفتار ابرخازنی هیدروژل سنتز شده در سرعت روبش‌های مختلف در ولتامتری چرخه‌ای.

همچنین، ظرفیت ویژه ابرخازن در سرعت‌های روبش  $5 \text{ mV s}^{-1}$  تا  $50 \text{ mV s}^{-1}$  محاسبه گردید که نتایج در جدول شماره ۱ آورده شده است. از داده‌های جدول پیداست که بیشترین ظرفیت در سرعت روبش  $5 \text{ mV s}^{-1}$  برابر با  $50/94 \text{ F g}^{-1}$  می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت روبش به میزان ده برابر ( $50 \text{ mV s}^{-1}$ )، ظرفیت ویژه این سامانه به  $28/75 \text{ F g}^{-1}$  می‌رسد که حدود ۵۷ درصد از ظرفیت اولیه خود را حفظ کرده است که این نشان از کارایی بالای این سامانه در سرعت‌های روبش بالا می‌باشد.

رفتار الکتروشیمیایی هیدروژل سنتز شده به عنوان الکترولیت در ابرخازن‌های الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این آزمون، از سامانه متقارن تهیه شده از دو الکتروود استیل پوشیده شده با کربن فعال (۹ میلی‌گرم کربن فعال در ۴ میلی‌لیتر استون مطلق و ۱ میلی‌گرم پیونده پلی‌وینیلین فلورید به خوبی در دمای محیط با کمک همزن مغناطیسی به مدت ۶ ساعت پراکنده گردید و سپس با کمک پمپ پاشش رنگ آمیزی بر روی بستر استیل پوشیده شد) به عنوان آند و کاتد استفاده گردید. هیدروژل سنتز شده در ابعاد ۱ در ۳ سانتی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر برش داده شد و به عنوان الکترولیت و جداکننده در سامانه ابرخازن متقارن به کار گرفته شد. رفتار ابرخازنی آن با استفاده از روش‌های ولتامتری چرخه‌ای و امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. همچنین، برای مقایسه رفتار ابرخازنی هیدروژل یک سامانه مشابه ابرخازنی متقارن با استفاده از الکترولیت مایع (سدیم نیترات ۳ مولار) تهیه گردید. رفتار الکتروشیمیایی هر دو ابرخازن با استفاده از روش ولتامتری چرخه‌ای بررسی شد و نتایج آن در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سامانه متقارن تهیه شده با هیدروژل دارای مساحت سطح زیر پیک بالاتری است که نشان‌دهنده رفتار ابرخازنی بهتر آن می‌باشد. همچنین وجود پیک‌های اکسایشی-کاهشی در منحنی مربوط به ابرخازن متقارن تهیه شده با هیدروژل، به دلیل انجام واکنش اکسایش-کاهش زوج یدید/تری یدید می‌باشد. ظرفیت ابرخازنی با استفاده از منحنی ولتامتری چرخه‌ای برای هر دو ابرخازن به کمک معادله ۱ محاسبه شد. که در آن  $\int Idv$  مساحت زیر سطح منحنی ولتامتری چرخه‌ای،  $v$  سرعت روبش،  $m$  جرم ماده فعال و  $\Delta V$  پنجره پتانسیل اعمالی می‌باشد.

$$C = \frac{\int Idv}{v \cdot m \cdot \Delta V} \quad (1)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که از هیدروژل سنتز شده به عنوان الکترولیت استفاده شده است، ظرفیت در سرعت روبش  $50 \text{ mV s}^{-1}$  معادل  $28/75 \text{ F g}^{-1}$  می‌باشد، در حالتی که از الکترولیت مایع استفاده شده است، ظرفیت معادل  $3/36 \text{ F g}^{-1}$  است. این نتیجه بیانگر بهبود کارایی ابرخازنی با استفاده از هیدروژل الکترولیت سنتز شده، می‌باشد.

همچنین، رفتار ابرخازنی هیدروژل الکترولیت سنتز شده در سرعت روبش‌های مختلف از  $5 \text{ mV s}^{-1}$  تا  $50 \text{ mV s}^{-1}$  بررسی شد و نتایج آن در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت روبش، مساحت زیر سطح منحنی افزایش پیدا می‌کند و منحنی شکل چهارگوش خود را حفظ می‌کند، که نشان‌دهنده رفتار ایده‌آل ابرخازن می‌باشد.

جدول ۱. ظرفیت ویژه محاسبه شده برای ابرخازن تهیه شده با هیدروژل الکترولیت در سرعت رویش های متفاوت

ظرفیت ویژه ( $F g^{-1}$ )	سرعت رویش ( $mV s^{-1}$ )
۵۰/۹۴	۵
۴۰/۰۸	۱۰
۳۴/۰۳	۱۵
۳۲/۵۰	۲۵
۲۸/۷۵	۵۰

همچنین، سامانه ابرخازن متقارن با الکترولیت هیدروژل سنتز شده و الکترولیت مایع، با روش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز، محدوده بسامدی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰۰ میلیهرتز و دامنه ولتاژ ۱۰ میلیولت بررسی شد و نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در سامانه ای که از هیدروژل الکترولیت استفاده شده است، مقاومت انتقال بار بسیار کمتر از الکترولیت مایع می باشد. همچنین در بسامدهای پایین، شیب خط واربرگ مربوط به سامانه بر پایه هیدروژل الکترولیت به زاویه ۹۰ درجه نزدیکتر است و در نتیجه رفتاری شبیه تر به خازن آرمانی دارد. این نتایج نشان دهنده بهبود کارایی ابرخازنی با استفاده از هیدروژل الکترولیت سنتز شده می باشد. همچنین هدایت یونی به دست آمده برابر  $23/88 \text{ mScm}^{-1}$  می باشد.

نویسندگان مقاله از حمایت های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان صمیمانه قدردانی می نمایند. این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری های علمی بین المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است.

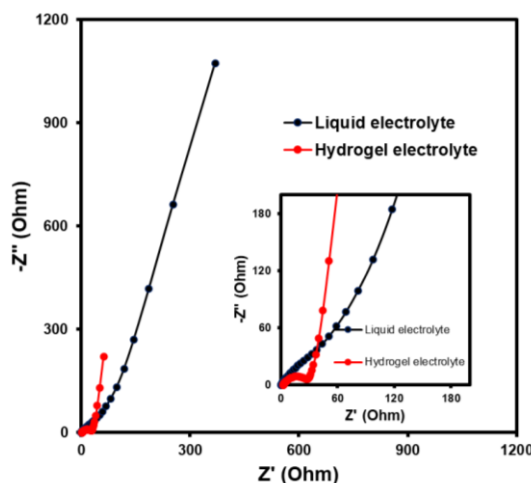
#### سیاسگذاری

\***عهده دار مکاتبات**  
نشانی: زنجان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان،  
habibkazemi@iasbs.ac.ir

#### منابع

- [1] G. Li, Z. Li, P. Zhang, H. Zhang, Y. Wu, Pure Appl. Chem. **80**, 2553 (2008).
- [2] Z. Yan, S. Luo, Q. Li, Z. S. Wu, S. Liu, Adv. Sci. **11**, 230217 (2024).
- [3] M. R. Islam, S. Afroj, N. Karim, ACS Nano, **17**, 18481 (2023).
- [4] T. Famprakis, P. Canepa, J. A. Dawson, M. S. Islam, C. Masquelier, Nature Mater. **18**, 1278 (2019).
- [5] M. M. Amaral, R. Venancio, A. C. Peterlevitz, H. Zanin, J. Energy Chem. **67**, 697 (2022).
- [6] H. He, Y. Fu, T. Zhao, X. Gao, L. Xing, Y. Zhang, X. Xue, Nano Energy, **39**, 590 (2017).
- [7] L. Cao, M. Yang, D. Wu, F. Lyu, Z. Sun, X. Zhong, H. Pan, H. Liu, Z. Lu, Chem. Commun. **53**, 1615 (2017).
- [8] N. Choudhury, S. Sampath, A. Shukla, Energy Environ. Sci. **2**, 55 (2009).
- [9] E. A. Appel, J. del Barrio, X. J. Loh, O. A. Scherman, Chem. Soc. Rev. **41**, 6195 (2012).
- [10] W. Li, F. Gao, X. Wang, N. Zhang, M. Ma, Angew. Chem. **128**, 9342 (2016).
- [11] Z. Wang, H. Li, Z. Tang, Z. Liu, Z. Ruan, L. Ma, Q. Yang, D. Wang, C. Zhi, Adv. Funct. Mater. **28**, 1804 (2018).
- [12] H. Peng, Y. Lv, G. Wei, J. Zhou, X. Gao, K. Sun, G. Ma, Z. Lei, J. Power Sources **431**, 210 (2019).
- [13] V. -P. Vu, V. -D. Mai, D. C. T. Nguyen, S. -H. Lee, ACS Appl. Energy Mater. **5**, 2211 (2022).
- [14] X. Tong, Z. Tian, J. Sun, V. Tung, R. B. Kaner, Y. Shao, Mater. Today, **44**, 78 (2021).

شکل ۶. مقایسه رفتار ابرخازنی هیدروژل الکترولیت سنتز شده با الکترولیت مایع (سدیم نیترات ۳ مولار) به کمک روش امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز.



۴- نتیجه گیری  
به طور خلاصه در این پژوهش، هیدروژل الکترولیتی برپایه هیدروکسی اکریلات و وینیل ایمیدازول تهیه گردید که توانایی انجام واکنش های فارادایی و خودترمیمی را دارا می باشد. هیدروژل الکترولیت سنتز شده هدایت یونی

- [15] Y. Cheng, X. Xiao, K. Pan, H. Pang, *Chem. Eng. J.* **380**, 122565 (2020).
- [16] H. Liao, W. Zhong, T. Li, J. Han, X. Sun, X. Tong, Y. Zhang, *Electrochim. Acta*, **404**, 139730 (2022).
- [17] Y. Zou, C. Chen, Y. Sun, S. Gan, L. Dong, J. Zhao, J. Rong, *Chem. Eng. J.* **418**, 128616 (2021).
- [18] D. Chen, D. Wang, Y. Yang, Q. Huang, S. Zhu, Z. Zheng, *Adv. Energy Mater.* **7**, 1700890 (2017).
- [19] C. Xiong, T. Wang, Z. Zhao, Y. Ni, *SmartMat*, **4** (2023) e1158.
- [20] M. Y. Mollajavadi, F. F. Tarigheh, R. Eslami-Farsani, *Polym. Compos.* **44**, 6869 (2023).
- [21] J. Karvinen, M. Kellomäki, *Eur. Polym. J.* 112864 (2024).
- [22] Z. Li, J. Lu, T. Ji, Y. Xue, L. Zhao, K. Zhao, B. Jia, B. Wang, J. Wang, S. Zhang, *Adv. Mater.* 2306350 (2024).
- [23] X. Wan, T. Mu, G. Yin, *Nano-Micro Lett.* **15**, 99 (2023).
- [24] S. Alipoori, S. Mazinani, S. H. Aboutalebi, F. Sharif, *J. Energy Storage* **27**, 101072 (2020).
- [25] J. O. Dennis, M. Shukur, O. A. Aldaghri, K. H. Ibaouf, A. A. Adam, F. Usman, Y. M. Hassan, A. Alsadig, W. L. Danbature, B. A. Abdulkadir, *Molecules* **28**, 1781 (2023).
- [26] X. Wang, Z. Bai, M. Zheng, O. Yue, M. Hou, B. Cui, R. Su, C. Wei, X. Liu, *J. Sci. Adv. Mater. Devices* **7**, 100451 (2022).
- [27] J. Wang, F. Liu, F. Tao, Q. Pan, *ACS Appl. Mater. Inter.* **9**, 27745 (2017).
- [28] J. Yu, X. Gao, Z. Cui, Y. Jiao, Q. Zhang, H. Dong, L. Yu, L. Dong, *Energy Technol.* **7**, 1900018 (2019).
- [29] M. Radhika, B. Gopalakrishna, K. Chaitra, L. K. G. Bhatta, K. Venkatesh, M. S. Kamath, N. Kathyayini, *Mater. Res. Express*, **7**, 054003 (2020).
- [30] X. Yang, X. Zhang, N. Yang, L. Yang, W. Wang, X. Fang, Q. He, *Molecules* **28**, 5613 (2023).
- [31] C. Zhan, S. C. Jana, *SPE Polym.* **1**, 55 (2020).
- [32] A. El Hoshoudy, S. Desouky, A. Al-sabagh, M. Elkady, M. Betiha, S. Mahmoud, *Int. J. Oil, Gas Coal Eng.* **3**, 43 (2015).