



Fabrication of Polyaniline Electrode Using Nickel Foam Substrate for Use in Supercapacitors Electrode

Mojtaba Masoumnezhad^{1*}

¹Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 01.01.2024

Revised: 04.10.2024

Accepted: 05.11.2024

Keyword:

Supercapacitor
Electrode
Polyaniline
Nickel Foam
Hydrothermal

*Corresponding Author:

Mojtaba Masoumnezhad

Email:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir

Research on environmentally friendly energy storage devices is a necessary solution to solve the energy crisis and environmental pollution caused by it. A major challenge for superbarriers is to introduce cost-effective, stable and suitable electrode nanomaterials for further industrialization of these tools. For this purpose, in this research, a polyaniline electrode using a nickel foam substrate for use in supercapacitors was made. Using X-ray diffraction analysis, the crystal structure was studied and its surface morphology was examined using a scanning electron microscope. In addition, IDEX mapping analysis showed the elements on the surface and how they are distributed. Investigations of current-voltage cycles were performed at different scanning speeds. The fabricated electrode showed faradaic behaviour with electron transfer. In addition, the electrochemical resistance was investigated using electrochemical impedance analysis, and the resistance due to charge transfer was found to be approximately 1.2 ohms. Finally, electrochemical investigations showed a specific capacity of 1100 F/g at a current density of 1 A/g.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Among the ideal candidate materials for pseudocapacitors, polyaniline (PANI) has a low budget, excellent environmental stability, flexibility, high ideal capacity (3000 Fg-1), and reversibility. However, due to the inherent molecular structure and faradic reaction limitations, charge-discharge cycles cause structural expansion and contraction of PANI, which results in poor specific capacitance, rate performance, limited stability, and rapid degradation. Polyaniline is a type of conducting polymer (CPs) that is formed by repeatedly linking aniline monomers. In addition to proper conductivity, PANIs also have a good specific surface area, which can introduce polyaniline electrodes as a suitable option for making supercapacitor devices. For this purpose, in this research, the construction of a Polyaniline electrode on the surface of nickel foam was investigated for introduction as a supercapacitor electrode. The hydrothermal reactor at optimal temperature was used to make the electrode. The studies were carried out in a three-electrode system and potassium hydroxide environment. Analyses of current, voltage, electrochemical resistance, and charge-discharge of the electrode were also investigated.

Methodology

To make polyaniline electrodes on nickel foam substrate, first, nickel foams are cut into 1x2 cm dimensions and sonicated using 0.2 M sulfuric acid solution for 5 minutes to remove surface impurities. Repeat the process of washing the nickel foam with water and ethanol several times so that no acid remains on the surface. Next, 0.02 grams of polyaniline was dispersed in 40 ml of deionized water for 30 minutes and added to the autoclave reactor along with nickel foam to keep it at 120 degrees Celsius for 10 hours. Finally, the obtained electrodes were washed with distilled water and ethanol and dried at room temperature.

Results and discussion**Characterization**

To check the purity and crystal structure of the synthesized nano material, XRD analysis was performed. The X-ray reflectance study was carried out using a 3000 EQUINOX INEL device with a CuK α lamp at room temperature, the corresponding peaks were observed at 2 θ angles from 10 to 80. Figure 1 shows the XRD pattern of polyaniline. As can be seen, the index peaks (14.8), (20.5), (25) which correspond to the Miller indices (001), (020), (200) are in accordance with the reports made about polyaniline.

SEM analysis was used to investigate the surface morphology of the nanocomposite. For this purpose, SEM images were prepared at magnifications of 200 and 500 and of nanoparticles on a nickel foam substrate. In dimensions larger than 200 nanometers, compact patterns were repeated in almost the same order. Next, to check the available elements, EDS mapping analysis was conducted. The elemental mapping was carried out at 2 micrometers magnification, and the distribution of particles was almost the same on the

nickel foam substrate. In addition, Figure 2b confirms the presence of C, N and O elements on the nickel foam substrate.

Electrochemical investigations

To investigate the behavior of the electrode at different scanning speeds (10 30 50 70 100), CV analysis of polyaniline was performed. For this purpose, two sharp peaks were observed in the return path at the potentials of 0.3 and 0.2 volts. With an increase in scanning speed, the area under the graph surface also increased. Next, the specific capacitance of the electrode material using CV analysis based on equation 1 was obtained; the specific capacitance was obtained at different scanning speeds which are considered acceptable values. GCD analysis was performed on the electrode made at different current densities. To obtain the specific capacitance using this test, the following relationship was used.

In this equation, C is the capacitance (farads per gram), i is the current density (amps per gram), t is the discharge time (seconds) and V is the working potential difference of the electrochemical cell. For this purpose, galvanostat charge and discharge analysis was performed at current densities of 1, 2, 4, and 6 ampere/gram. As Figure 4 shows, the charging and discharging time decreased with the increase in current density.

Capacitive capacity for the current density of 1, 2, 4 and 6 A/g was calculated as 1100, 705, 438, and 190 F/g respectively.

EIS measurements were also performed. The diameter of the semicircle represents the resistance to charge transfer, which is approximately 1.2 ohms for the polyaniline electrode. Furthermore, the slope of the Warberg line, which represents the resistance to ion transfer, also shows the acceptable behavior of the electrode capacitance (Figure 5).

Conclusion

In summary, in this research, the fabrication of supercapacitor electrodes using nickel foam substrate and polyaniline conductive polymer was discussed. The hydrothermal method was used to modify the nickel foam electrode. The current-voltage investigations showed the faradaic behavior of the electrode in addition to the electron transfer and the maximum current density of approximately 0.2 A/g. Moreover, charge-discharge studies showed the maximum specific capacity of 1100 F/g at a current density of 1 A/g. The electrochemical resistance of approximately 1.2 ohms of this electrode showed that the resistance to charge transfer for this electrode is very low and the electrode made possessed good conductivity. Finally, the results showed that it is possible to continue the research for use in supercapacitor devices as well as more industrial applications regarding the polyaniline electrode on nickel foam.

$$C = \frac{1}{2mv\Delta V} \int IdV \quad (1)$$

$$C_s = \frac{C}{S} = \frac{I\Delta t}{\Delta V S} \quad (2)$$

Table 1. The specific capacity at different scanning speeds.

100 mv/s	70 mv/s	50 mv/s	30 mv/s	10 mv/s	Scan rate
F/g 210	F/g 492	F/g 740	F/g 982	F/g 1284	Specific capacity

ساخت الکتروود پلی آنیلین با استفاده از زیر لایه فوم نیکل جهت استفاده در الکتروود ابرخازن‌ها

مجتبی معصوم‌نژاد^{۱*}

۱- دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گیلان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

پانزنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

کلید واژگان:

ابر خازن

الکتروود

پلی آنیلین

فوم نیکل

هیدروترمال

پژوهش پیرامون دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی سازگار با محیط‌زیست، یک راه‌حل ضروری برای حل بحران انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آن است. در این بین، یک چالش اساسی برای ابر خازن‌ها معرفی نانو مواد الکتروودی مقرون به صرفه، پایدار و با ظرفیت مناسب جهت استفاده‌های صنعتی بیشتر از این ابزارها می‌باشد. به همین منظور، در این پژوهش به ساخت الکتروود پلی آنیلین با استفاده از بستر فوم نیکل برای استفاده در ابر خازن‌ها پرداختیم. با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس به مطالعه ساختار کریستالی و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی به بررسی مورفولوژی سطحی آن پرداختیم. همچنین، آنالیز ایدکس مپینگ^۱، عناصر موجود روی سطح و چگونگی توزیع آن‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. بررسی‌های چرخه‌های جریان-ولتاژ در سرعت‌های روبش مختلف انجام شد. الکتروود ساخته شده، رفتار فاراداییک همراه با انتقال الکترون را از خود نشان داد. همچنین، مقاومت الکتروشیمیایی با استفاده از آنالیز امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت که مقاومت ناشی از انتقال بار حدود ۱.۲ اهم به دست آمد. در نهایت بررسی‌های الکتروشیمیایی ظرفیت ویژه ۱۱۰۰ F/g را در چگالی جریان ۱ A/g نشان داد.

*نویسنده مسئول: مجتبی معصوم‌نژاد

پست الکترونیکی:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir

¹ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

مقدمه

در دنیای مدرن امروز که بشر نیاز روزافزونی به انرژی دارد، استفاده از نسل جدید ادوات تولید و ذخیره‌سازی انرژی امری ضروری به نظر می‌رسد. این ادوات، اغلب از منابع انرژی سبز و تمیز برای تولید استفاده می‌کنند. بیشترین توجهات در میان این ادوات در تولید انرژی به سمت سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و انواع پیل‌ها سوختی و در حوزه ذخیره‌سازی انرژی به سمت انواع باتری‌ها و ابر خازن‌ها معطوف شده است. طبیعتاً ساخت این وسایل مستلزم فناوری بروز و نسبتاً پیچیده‌ای است که تقریباً هم‌روزه توسط محققین مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱].

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های ادوات ذکر شده که می‌تواند قابلیت صنعتی شدن این دستگاه‌ها را به شکل قابل توجهی افزایش دهد، مواد مورد استفاده در ساختار الکترودها و کاتالیزورها هستند. طبیعتاً پیشنهاد استفاده از یک ماده ارزان‌قیمت با بازدهی بسیار خوب و پایداری چرخه‌ای عالی و همچنین با سنتزی راحت و مقرون‌به‌صرفه می‌تواند گزینه‌ای جذاب برای محققین حوزه ذخیره‌سازی باشد. مواد الکترودی جهت کاربرد در ابر خازن‌ها برای پژوهشگران و محققین این حوزه بسیار جذاب است [۲؛ ۳].

معمولاً باتری‌ها در مقایسه با خازن‌ها می‌توانند انرژی بیشتری ذخیره کنند؛ اما به دلیل بهره‌گیری از واکنش‌های شیمیایی، عملکرد سریعی ندارند و به عبارت دیگر، چگالی توان آن‌ها کم است. برخلاف رفتار باتری‌ها، خازن‌ها به دلیل بهره‌گیری از جداسازی الکتروستاتیکی بارهای الکتریکی، انرژی ذخیره‌شده را به سرعت در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهند و چگالی توان بالایی دارند؛ اما مشکل اساسی خازن‌ها، ذخیره انرژی کم آن‌هاست [۴؛ ۵]. اگر بخواهیم مزیت‌های باتری و خازن را به‌طور هم‌زمان داشته باشیم و درعین حال معایب ذکر شده را نداشته باشیم، پیشنهاد محققان استفاده از نسل جدید ادوات ذخیره انرژی به نام ابر خازن‌هاست [۶].

بنابراین، چالش اصلی برای ابر خازن‌ها عبارت است از: چگالی انرژی بالا (نزدیک به باتری‌های قابل شارژ) و در همین حال، حفظ ویژگی‌های ذاتی خود نظیر چگالی توان بالا و عمر چرخه طولانی. ابر خازن‌ها که به نام خازن‌های الکتروشیمیایی نیز شناخته می‌شوند، از ادوات مهم در زمینه ذخیره انرژی در نسل آینده خواهند بود [۷؛ ۸]. ابر خازن‌ها به دلیل ظرفیت بالا، در حوزه‌های مختلف از جمله دستگاه‌های الکتریکی، دوربین‌های دیجیتال، تلفن‌های همراه، وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی، ابزارآلات الکتریکی، ذخیره‌سازی انرژی سلول‌های خورشیدی و... را دارا می‌باشند [۹].

ابر خازن‌ها از نظر مکانیسم ذخیره انرژی به دودسته تقسیم می‌شوند. (۱) خازن‌های لایه دوگانه الکتروشیمیایی (EDLCs)^۱ که در آن‌ها از موادی مانند انواع کامپوزیت‌های کربنی با مساحت سطح بالا و رسانندگی نسبتاً خوب الکتریکی استفاده می‌شود و شبه خازن‌ها یا ابر خازن‌های اکسایش-کاهش که در این دسته از اکسیدهای فلزات واسطه و نیز پلیمرهای هادی به‌عنوان مواد فعال استفاده می‌شود؛ (۲) خازن‌های هیبریدی که در آن‌ها از مواد الکترودی کامپوزیت و یا هر دو نوع شبه خازن و (EDLCs) به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود [۱۰].

پلی آنیلین (PANI) در میان مواد کاندید ایده‌آل برای شبه خازن‌ها دارای بودجه کم، پایداری محیطی عالی، انعطاف‌پذیری، ظرفیت ایده‌آل بالا (300 Fg^{-1}) و برگشت‌پذیری است [۱۱]. با این حال، به دلیل ساختار مولکولی ذاتی و محدودیت‌های واکنش فارادیک، چرخه‌های شارژ-تخلیه باعث انبساط و انقباض ساختاری PANI می‌شود.

پلی آنیلین نوعی پلیمر رسانا (CPS) است که از اتصال مکرر مونومرهای آنیلین تشکیل می‌شود [۱۱]. در واقع، PANI‌ها علاوه بر رسانندگی مناسب، مساحت سطح ویژه خوبی نیز دارند. همین موضوع می‌تواند الکترودهای پلی آنیلین را به‌عنوان گزینه مناسبی برای ساخت دستگاه‌های ابر خازن معرفی نماید [۱۰]. به همین منظور، در این پژوهش به ساخت الکتروُد Polyaniline بر روی سطح فوم نیکل جهت بررسی برای معرفی به‌عنوان الکتروُد ابر خازن پرداخته شد. برای ساخت الکتروُد از راکتور هیدروترمال در دمای بهینه استفاده شد. مطالعات در سیستم سه الکتروُد و در محیط

¹ Electric Double Layer Capacitor

پتاسیم هیدروکسید انجام شد. آنالیزهای جریان ولتاژ، مقاومت الکتروشیمیایی و شارژ - دشارژ الکتروود نیز مورد بررسی قرار گرفت.

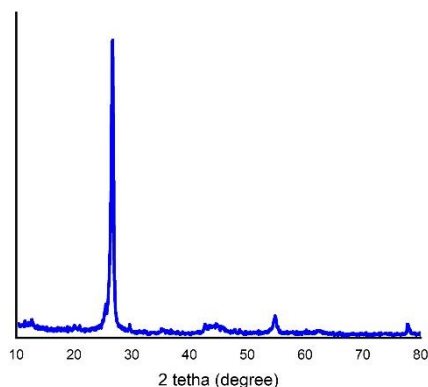
بخش تجربی

برای ساخت الکتروود پلی آنیلین بر روی زیر لایه فوم نیکل، در ابتدا فوم نیکل‌ها را در ابعاد 1×2 سانتی‌متر برش داده و با استفاده از محلول 0.2 مولار سولفوریک اسید به مدت ۵ دقیقه سونیکیت کرده تا ناخالصی‌های سطحی آن از بین برود. فرآیند شستشوی فوم نیکل را با آب و اتانول چندین مرتبه تکرار کرده تا اسید روی سطح باقی نماند. بدین منظور در دفعات بعدی مقداری از ترکیب آب و اتانول را به مقداری که تمام الکتروود را غوطه‌ور سازد استفاده می‌کنیم. سپس، الکتروود را در دمای 35 درجه به مدت ۲ ساعت خشک می‌کنیم. در ادامه، مقدار 0.2 گرم پلی آنیلین را در 40 میلی‌لیتر آب دیونیزه به مدت ۳۰ دقیقه پخش می‌کنیم. لازم به ذکر است که این فرآیند شامل سه زمان 10 دقیقه‌ای و 4 دقیقه استراحت بین هر بخش است. در نهایت محلول سیاه‌رنگ حاصل شده به همراه نیکل فوم را به راکتور اتوکلاو اضافه می‌کنیم تا به مدت 10 ساعت در دمای 120 درجه سانتی‌گراد بماند. در نهایت الکترودهای حاصل شده را با آب مقطر و اتانول شستشو داده و در دمای محیط خشک می‌کنیم.

نتایج و بحث

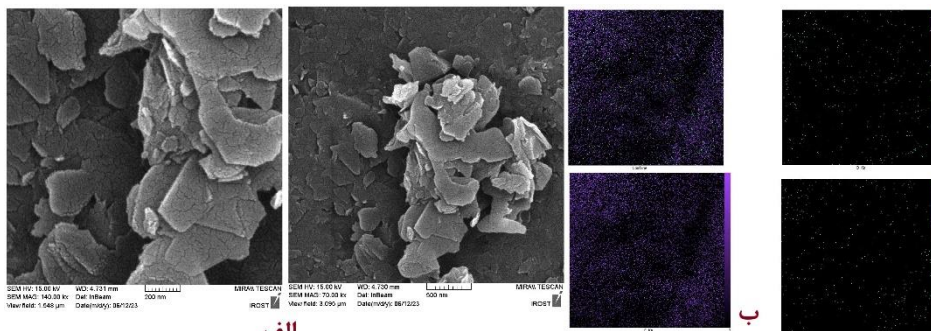
مشخصه‌یابی

برای بررسی خلوص و ساختار کریستالی نانو ماده سنتز شده آنالیز XRD انجام شد. بررسی بازتاب پرتو X با استفاده از دستگاه EQUINOX INEL ۳۰۰۰ با لامپ $CuK\alpha$ در دمای اتاق انجام شد. قله‌های مربوط در زوایای 2θ از 10 تا 80 مشاهده شدند. تصویر ۱، الگوی XRD مربوط به پلی آنیلین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله‌های شاخص (14.8) ، (20.5) و (25) که به ترتیب متناسب با اندیس‌های میلر (001) ، (020) و (200) می‌باشد که در تطابق با گزارش‌های انجام‌شده در مورد پلی آنیلین است.



شکل ۱. الگوی پراش اشعه ایکس از پلی آنیلین.

از آنالیز SEM جهت بررسی مورفولوژی سطحی نانو کامپوزیت استفاده شد. برای این هدف، تصاویر SEM با استفاده از دستگاه (VEGA۳) ساخت شرکت TESCAN در بزرگنمایی‌های ۵۰۰، ۲۰۰ و از نانو ذرات بر روی بستر نیکل فوم تهیه شد. تصاویر ۲ (الف)، به‌وضوح مورفولوژی خاص پلی آنیلین را نشان می‌دهند. در ابعاد بزرگ‌تر از ۲۰۰ نانومتر الگوهای فشرده بانظم تقریباً یکسانی تکرار شده است. در ادامه، جهت بررسی عناصر موجود، آنالیز EDS مپینگ انجام شد. تصویر ۲ (ب). در سیستم EDS، تعداد پرتوهای X ساطع‌شده در مقابل انرژی آن‌ها شمارش می‌شود؛ انرژی هر پرتو X مشخصه عنصری است که پرتو از آن ساطع‌شده است. بدین ترتیب، با به دست آوردن طیفی از انرژی در مقابل پرتوهای X شمارش‌شده، برآوردهای کیفی و کمی عناصر موجود در نمونه بررسی شد. تصویرب به بررسی مپینگ عنصری در بزرگنمایی ۲ میکرومتر پرداخته است. توزیع ذرات، تقریباً یکسان بر روی بستر نیکل فوم انجام شده است. تصویر ۲ (ب)، همچنین، حضور عناصر C، N و O را بر روی بستر فوم نیکل تأیید می‌کند.



شکل ۲. الف: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در ابعاد ۲۰۰ و ۵۰۰ نانومتر. شکل ۲ ب: آنالیز مپینگ از عناصر موجود در سطح رنگ بنفش مربوط به حضور کربن، رنگ سبز مربوطه به حضور عنصر اکسیژن و رنگ نیلی عنصر نیتروژن را نشان می‌دهد.

بررسی‌های الکتروشیمیایی

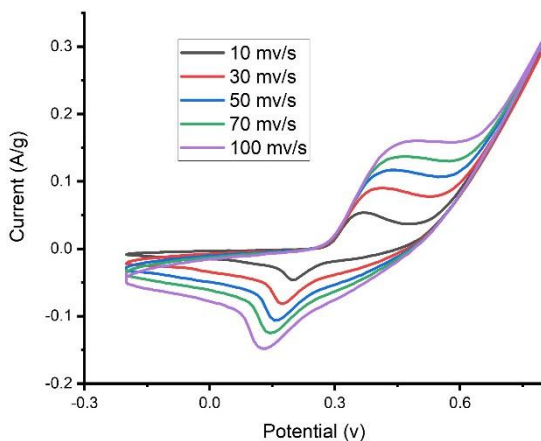
جهت بررسی خواص الکتروشیمیایی تک الکتروود سنتز شده از سیستم سه الکتروود استفاده شد. در واقع در این سیستم، الکتروود کار (پلی آنیلین) با الکتروود مرجع (Ag/AgCL) جفت (کوپل) می‌شود و اختلاف پتانسیل بین الکتروود کار و الکتروود مرجع گزارش می‌شوند و جریان تولیدشده و یا اعمال‌شده به سیستم از الکتروود کار و الکتروود کمکی (سیم پلاتین به قطر نیم میلی‌متر) عبور می‌کند. بدین منظور، بررسی‌های الکتروشیمیایی از جمله CV^۱ و GCD^۲ و EIS^۳ برای الکتروود سنتز شده در حضور محلول ۳ مولار پتاسیم هیدروکسید (KOH) به‌عنوان الکتروولیت انجام شد. در ادامه، جهت بررسی رفتار الکتروود در سرعت‌های جاروب‌کردن‌های مختلف (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰) آنالیز CV از پلی آنیلین به عمل آمد. شکل ۳ نشان می‌دهد که در بازه پتانسیلی ۰/۲- تا ۰/۸، رفتار الکتروود در فرآیند و برگشت به‌صورت فارادایک و همراه با انتقال الکترون می‌باشد. به همین منظور، دو قله شارپ در مسیر رفت و برگشت در پتانسیل‌های ۰/۳ و ۰/۲ ولت مشاهده می‌شود. پهنای پیک می‌تواند نشان‌دهنده مورفولوژی متخلخل پلی آنیلین باشد که در تناسب با تصاویر

¹ Cyclic Voltammetry

² Galvanostatic Charge-discharge

³ Electrochemical Impedance Spectroscopy

میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جاروب کردن، مساحت زیر سطح نمودار افزایش یافته است.



شکل ۳. چرخه‌های جریان-ولتاژ در سرعت‌های جاروب کردن مختلف برای الکتروود سنتز شده شامل سرعت‌های جاروب ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ mv/s.

در ادامه، ظرفیت ویژه خازنی ماده الکتروودی، با استفاده از آنالیز جریان-ولتاژ و از رابطه ۱ به دست آمد. در واقع در سرعت‌های روبش بالا، فرصت کافی برای نفوذ یون‌ها از الکتروولیت به درون ساختار الکتروود و انتقال الکترون به سطح مشترک وجود ندارد و صرفاً سطح بیرونی الکتروود در واکنش دخالت دارد. همین امر منجر به کاهش ظرفیت ویژه در سرعت‌های روبش بالاتر می‌شود. ظرفیت ویژه خازنی در سرعت روبش‌های مختلف به دست آمد که مقادیر قابل قبول محسوب می‌گردد.

$$C = I \int Idv / 2mv\Delta v \quad (1)$$

جدول ۱. ظرفیت ویژه در سرعت‌های روبش.

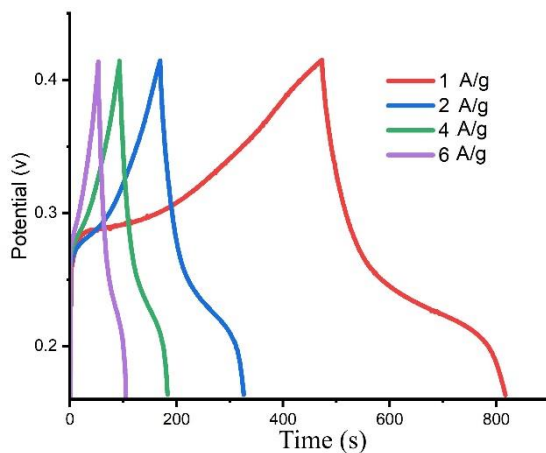
سرعت روبش	۱۰ mv/s	۳۰ mv/s	۵۰ mv/s	۷۰ mv/s	۱۰۰ mv/s
ظرفیت ویژه	F/g ۱۲۸۴	F/g ۹۸۲	F/g ۷۴۰	F/g ۴۹۲	F/g ۲۱۰

همچنین آزمون شارژ-دشارژ که روشی دقیق‌تر نسبت به CV برای به دست آوردن ظرفیت ویژه خازنی است، از الکتروود ساخته شده در چگالی جریان‌های مختلف به عمل آمد. جهت به دست آوردن ظرفیت ویژه خازنی با استفاده از این آزمون از رابطه زیر استفاده شد.

$$C = I\Delta t / \Delta V S \quad (2)$$

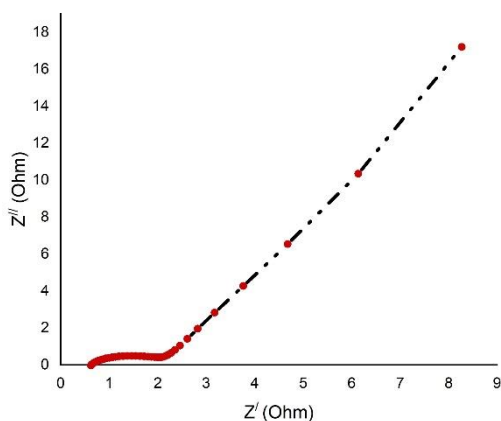
که در این معادله C ظرفیت خازنی (فاراد بر گرم)، I چگالی جریان (آمپر بر گرم)، t زمان دشارژ (ثانیه) و V اختلاف پتانسیل کار سلول الکتروشیمیایی است و S مقدار ماده روی سطح الکتروود بر حسب گرم می‌باشد. برای این هدف،

آنالیز شارژ-دشارژ گالوانواستات در چگالی جریان‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ A/g انجام شد. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، با افزایش چگالی جریان، زمان شارژ و دشارژ کاهش یافته است، ظرفیت خازنی برای چگالی جریان‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ A/g به ترتیب ۱۱۰۰، ۷۰۵، ۴۳۸ و ۱۹۰ F/g محاسبه شد. علاوه بر این رفتار الکتروود سنتز شده در فرآیند شارژ و دشارژ، در تطابق با نمودارهای جریان-ولتاژ، الگوی فارادایک را نشان می‌دهد. قله‌های مشاهده‌شده نیز انتقال الکترون را نشان می‌دهد.



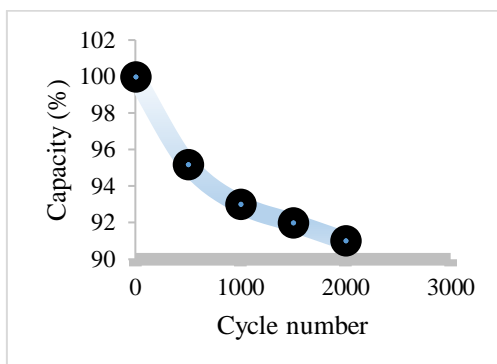
شکل ۴. آنالیز شارژ-دشارژ در چگالی جریان‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ A/g.

اندازه‌گیری‌های EIS با جمع‌آوری داده‌های مقاومت ظاهری (امپدانس) در یک پتانسیل خاص با دامنه ولتاژ ۵ یا ۱۰ میلی‌ولت در طیف وسیعی از فرکانس‌های ۰/۰۱ هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز، انجام می‌شود. در نمودار این آنالیز دارای دو قسمت است که شامل یک نیم‌دایره در ابتدای نمودار و یک خط راست در امتداد آن می‌باشد. قطر نیم‌دایره بیانگر مقاومت در برابر انتقال بار است که این مقدار برای الکتروود پلی‌انیلین حدود ۱/۲ اهم می‌باشد. همچنین شیب خط واربرگ که بیانگر مقاومت در برابر انتقال یون می‌باشد نیز رفتار قابل‌قبول خازنی الکتروود را نشان می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۵. آنالیز امپدانس جهت بررسی مقاومت الکتروشیمیایی الکتروود سنتز شده.

از آنجایی که پایداری الکتروود سنتز شده یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در کاربردهای صنعتی می‌باشد. الکتروود سنتز شده طی ۲۰۰۰ چرخه متوالی جریان - ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۶)، نمودار پایداری برحسب تعداد چرخه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش ظرفیت در ۵۰۰ چرخه ابتدایی رخ داده است که دلیل آن می‌تواند در دسترس نبودن تمام مکان‌های فعال برای انجام واکنش باشد. همچنین، به نظر می‌رسد در ۵۰۰ چرخه پایانی، الکتروود تقریباً به ثبات رسیده است. در نهایت، پایداری ۹۱٪ مشاهده می‌شود.



شکل ۶. نمودار پایداری بر حسب تعداد چرخه طی ۲۰۰۰ چرخه متوالی.

در ادامه به مقایسه نتایج بدست آمده در این پژوهش با پژوهش‌های مشابه در این زمینه پرداخته شده است.

جدول ۲. ظرفیت ویژه و پایداری در سرعت‌های روبش مختلف.

الکتروود	ظرفیت ویژه	پایداری	الکتروولیت	مرجع
rGO/PANI	۱۳۴۸ F/g	۷۵ %	۱ مولار H_2SO_4	[۱۲]

الکتروود	ظرفیت ویژه	پایداری	الکتروولیت	مرجع
PANI/CoO	$F\ g^{-1}\ 2473$	86.3 %	۱ مولار KOH	[۱۳]
CoS/PANI	$123.6\ C\ g^{-1}$	86.4%	۳ مولار KOH	[۱۴]
این پژوهش	$F/g\ 1100$	91%	۳ مولار KOH	

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، در این پژوهش به ساخت الکتروود ابر خازن، با استفاده از زیر لایه نیکل فوم و پلیمر رسانای پلی آنیلین، پرداخته شد. از روش هیدروترمال برای اصلاح الکتروود نیکل فوم استفاده شد. بررسی‌های جریان-ولتاژ رفتار فارادایی الکتروود را همراه با انتقال الکترون و حداکثر چگالی جریانی حدود $0.2\ A/g$ نشان داد. همچنین، بررسی‌های شارژ-دشارژ حداکثر ظرفیت ویژه $1100\ F/g$ در چگالی جریانی $1\ A/g$ را نشان داد. همچنین مقاومت الکتروشیمیایی حدود $1/2$ اهمی این الکتروود نشان داد که مقاومت در مقابل انتقال بار برای این الکتروود بسیار کم بوده و الکتروود ساخته‌شده رسانندگی مناسبی دارد. درنهایت، نتایج نشان داد که می‌توان به ادامه پژوهش‌ها برای استفاده در دستگاه‌های ابر خازن و همچنین کاربردهای صنعتی بیشتر در مورد الکتروود پلی آنیلین بر روی نیکل فوم امیدوار بود. از آنجایی که مقرون‌به‌صرفه بودن در کاربردهای صنعتی عامل مهمی است، می‌توان برای بهبود ظرفیت ویژه، مساحت سطح مؤثر و افزایش پایداری از اکسیدهای فلزی ارزان قیمت و در دسترس و همچنین کربن‌های فعال در پژوهش‌های آینده استفاده کرد.

References

- [1] Jafarian, M., Ghazipour Shirvan, M., Babaeian, M., & Izadi, M. (2022). Investigation of Some Important Thermal Properties of Phase Change Materials Upgraded with Nanomaterials. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(4), 453-473. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.313531.1818>
- [2] Arvas, M. B., Gürsu, H., Gencten, M., & Sahin, Y. (2022). Supercapacitor applications of novel phosphorus doped graphene-based electrodes. *Journal of Energy Storage*, 55, 105766. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105766>
- [3] Srinivasan K V, S., Santo, J., & Penumakala, P. K. (2022). Effect of surface modification of printed electrodes on the performance of supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 56, 106043. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106043>
- [4] Dhandapani, P., Balan, B., Dinadayalane, T., & Angaiah, S. (2022). In-situ grown of FeCo₂O₄ @ 2D-Carbyne coated nickel foam - A newer nanohybrid electrode for high performance asymmetric supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 56, 105943. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105943>
- [5] Zhao, G.-y., Wang, F.-c., Liu, M.-j., Sui, Y.-m., Zhang, Z., Kang, F.-y., & Yang, C. (2022). A high-frequency flexible symmetric supercapacitor prepared by the laser-defocused ablation of MnO₂ on a carbon cloth. *New Carbon Materials*, 37(3), 556-563. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(22\)60600-0](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(22)60600-0)
- [6] Nayak, S., Kittur, A. A., & Nayak, S. (2022). Biosynthesis of zinc oxide-cobalt oxide nanocomposite as electrode material and its performance evaluation for the sustainable hybrid supercapacitor energy storage devices. *Chemical Physics Letters*, 806(5), 140058. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.140058>
- [7] Hu, L., Zeng, F., Song, X., Liang, J., Zhang, X., Zhou, H., Wu, X., Liu, Z., Wu, W., & Jiang, C. (2023). Synthesis, analysis and characterization of nitrogen/sulfur co-

- doped activated carbon for high-performance all-printed flexible supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 73, 109004. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109004>
- [8] Devi, M., Upadhyay, S., Mir, R. A., Kumar, N., & Sharma, S. (2023). Synthetic waste derived graphitic carbon nitride (g-CN) and g-CN/carbon hybrid for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 73, 109067. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109067>
- [9] Lin, Q., Wang, Y., Du, J., & Chen, A. (2023). Preparation of dispersed hollow carbon spheres assisted by silica/carbon shell isolation for supercapacitors. *Diamond and Related Materials*, 139, 110346. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110346>
- [10] Sun, H., Miao, Y., Wang, G., Ren, X., Bao, E., Han, X., Wang, Y., Ma, X., Xu, C., & Chen, H. (2023). Flower-like ZnCo₂O₄ microstructures with large specific surface area serve as battery-type cathode for high-performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 72, 108502. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108502>
- [11] Li, S., Zhang, Q., Liu, L., Wang, J., Zhang, L., Shi, M., & Chen, X. (2023). Ultra-stable sandwich shaped flexible MXene/CNT@Ni films for high performance supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, 941, 168963. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168963>
- [12] Pawar, D. C., Malavekar, D. B., Lokhande, A. C., & Lokhande, C. D. (2024). Facile synthesis of layered reduced graphene oxide/polyaniline (rGO/PANI) composite electrode for flexible asymmetric solid-state supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 79, 110154. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110154>
- [13] Sahoo, S., Dhakal, G., Kim, W. K., Lee, Y. R., & Shim, J.-J. (2023). Unidirectional growth of polyaniline on 3D CoO nanowires for aqueous asymmetric supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 73, 109061. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109061>
- [14] Iqbal, M. Z., Ullah, A., Aziz, U., Asif, M., Wabaidur, S. M., & Ansari, M. Z. (2023). Unveiling the performance of hydrothermally synthesized transition metal sulfide with polyaniline composite for hybrid supercapacitor applications. *Current Applied Physics*, 52(3), 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2023.05.017>