



# Pseudocapacitive Performance of Molybdenum Oxide/Reduced Graphene Oxide Hybrid Electrode Fabricated by a Two-Step Procedure of Electrochemical Deposition and Hydrothermal

Mina Pirhayati <sup>1</sup>, Mahdi Kazazi <sup>2\*</sup>, Behzad Koozegar Kaleji <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master's degree, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Hamedan, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Hamedan, Iran.

\*Corresponding Author's Email: [m\\_kazazi@malayeru.ac.ir](mailto:m_kazazi@malayeru.ac.ir); [mahdi.kazazi@gmail.com](mailto:mahdi.kazazi@gmail.com) (M. Kazazi)

## Paper History:

Received: 2024-12-21

Revised: 2025-01-19

Accepted: 2025-03-01

## Keywords:

Supercapacitor,  
Binder Free Electrode,  
Molybdenum Oxide,  
Hydrothermal,  
Electrochemical Deposition

**Abstract:** A binder-free hybrid electrode composed of reduced graphene oxide (rGO) and molybdenum oxide (MoO<sub>3</sub>) was prepared using hydrothermal and electrodeposition processes. First, rGO nanosheets were deposited hydrothermally, followed by the electrochemical deposition of MoO<sub>3</sub>. The structural and morphological properties of MoO<sub>3</sub> and rGO/MoO<sub>3</sub> electrodes were examined using XRD and FESEM. The findings indicated that  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> particles were effectively deposited onto the surface of reduced graphene oxide (rGO) nanosheets, resulting in a porous structure ideal for energy storage applications. The pseudocapacitive characteristics of the electrodes were assessed through CV, GCD, and EIS techniques in potassium hydroxide aqueous electrolyte. The as-fabricated pure and hybrid electrodes exhibited specific capacitance values of 563 and 1021 F g<sup>-1</sup>, respectively, when tested at a galvanostatic discharge rate of 1 A g<sup>-1</sup>. Additionally, the rGO/MoO<sub>3</sub> hybrid electrode demonstrated excellent cyclic stability, achieving a capacitance retention of 84.7% after 2000 cycles at 5 A g<sup>-1</sup>.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.493058.1312>

URL: [https://www.jamt.ir/article\\_216424.html](https://www.jamt.ir/article_216424.html)

## 1. INTRODUCTION

Supercapacitors have garnered significant interest from both researchers and industry professionals, thanks to their impressive power density, extended lifespan, biocompatibility, and reliable performance. These attributes make them a compelling option among the diverse range of energy storage systems available today ([Oyedotun & Mamba, 2024](#)).

Supercapacitors are categorized into two main types: faradic pseudocapacitors and non-faradic electrochemical double layer capacitors (EDLC). The electrodes of EDLCs are composed of various carbon materials that possess excellent electrical conductivity and large surface area, including graphene, carbon nanotubes, and activated carbon. In these supercapacitors, no faradaic reactions take place. In contrast, pseudocapacitors utilize various conductive polymers (including polythiophene, polypyrrole, and polyaniline) and metal oxides (such as MnO<sub>2</sub>, NiO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, MoO<sub>3</sub>) as their electroactive materials. They store electric charge through reversible faradaic reactions occurring at the interface of the electrolyte and electrode ([Subramaniyan et al., 2025](#); [Shahrokhian et al., 2018](#)). Among the diverse range of metal oxides, Molybdenum oxide (MoO<sub>3</sub>) is emerging as a promising active material for supercapacitors, thanks to its affordability, non-toxic nature, and eco-friendly characteristics. Hexavalent molybdenum oxide exists in three polymorphic forms:

hexagonal (h-MoO<sub>3</sub>), monoclinic (m-MoO<sub>3</sub>), and orthorhombic ( $\alpha$ -MoO<sub>3</sub>). Although  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> offers significant advantages, it also has drawbacks, including low electrical conductivity, limited current capacity, and short lifespan, which have restricted its commercial use. To address these challenges, molybdenum oxide is typically combined with carbon-based materials like carbon nanotubes or graphene to create hybrid electrodes that offer high supercapacitor efficiency, improved capacity, and extended cycle life ([Askari et al., 2024](#)).

In this study, a highly efficient two-step technique was applied to prepare the reduced graphene oxide/molybdenum oxide (rGO/MoO<sub>3</sub>) hybrid electrode. A conductive and porous rGO framework was first formed onto the Ni current collector via the hydrothermal method. Subsequently, molybdenum oxide particles were deposited onto the graphene nanosheets using the cathodic galvanostatic electrochemical deposition technique.

## 2. MATERIALS AND METHODS

The rGO nanosheets were uniformly and seamlessly coated onto the Ni surface using the hydrothermal procedure. To achieve this, 0.2 g of acid-washed rGO was dissolved in 100 ml of deionized water, and a controlled amount of dilute KOH solution was gradually added until the pH of the suspension reached approximately 8.5. The prepared suspension was then

Please cite this article as: Pirhayati M., Kazazi, M. & Koozegar Kaleji, B. (2024). Pseudocapacitive Performance of Molybdenum Oxide/Reduced Graphene Oxide Hybrid Electrode Fabricated by a Two-Step Procedure of Electrochemical Deposition and Hydrothermal. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 13, No. 4, 27-39. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.493058.1312>.

2783-0829/© 2025 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)



heated for 48 hours at 150°C in an autoclave, with nickel foam included to facilitate the deposition of rGO onto its surface. In the subsequent step, molybdenum oxide particles were uniformly coated onto the rGO framework using a cathodic electrodeposition method. To prepare the electrolyte, 0.15 g of sodium acetate, 0.045 g of Triton X-100, and 0.75 g of sodium molybdate were carefully dissolved in 30 ml of deionized water. The pH of the as-prepared aqueous solution was adjusted to 4 by adding dilute sulfuric acid. Electrochemical deposition was performed at 5 mA cm<sup>-2</sup> for 10 minutes. Subsequently, the electrodes were calcined at 300°C for 2 hours. The morphology, structure, and supercapacitor characteristics of the as-prepared electrodes were thoroughly analyzed using various analytical techniques.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Characterization of the fabricated electrodes

The XRD patterns of the nickel foam substrate, pure MoO<sub>3</sub> electrode, and rGO/MoO<sub>3</sub> hybrid electrode are illustrated in Figure 1. As observed, aside from three intense peaks corresponding to Ni current collector, the remaining peaks are attributed to the orthorhombic structure of  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> (JCPDS. No. 89-5108).

The morphology of the rGO/MoO<sub>3</sub> electrode was

analyzed using FESEM, the results of which are presented in Figure 2. It can be seen that molybdenum oxide particles are electrodeposited onto the graphene matrix, forming a porous hybrid structure. The graphene scaffold, known for its high electronic conductivity, enhances the pseudocapacitive performance of the MoO<sub>3</sub> active material through this hybrid microstructure.

#### 3.2. Electrochemical performance of the prepared electrodes

Figure 3(a) presents the voltammograms of MoO<sub>3</sub> and rGO/MoO<sub>3</sub> electrodes at 20 mV s<sup>-1</sup>. As observed, both electrodes exhibit a pair of oxidation/reduction peaks, indicating a faradic reaction mechanism. Additionally, the hybrid electrode shows a significantly larger area under its CV curve, reflecting its higher capacitance. This enhanced capacitance suggests that the rGO support framework facilitates electron and ion movement within the electrode structure.

As shown in Figure 3(b), the rGO/MoO<sub>3</sub> electrode exhibits high specific capacitances of 1021, 979, 892, and 833 F g<sup>-1</sup> at discharge rates of 1, 2, 5, and 10 A g<sup>-1</sup>, respectively, which are significantly higher than those of the pure MoO<sub>3</sub> electrode (563, 526, 467, and 433 F g<sup>-1</sup>).

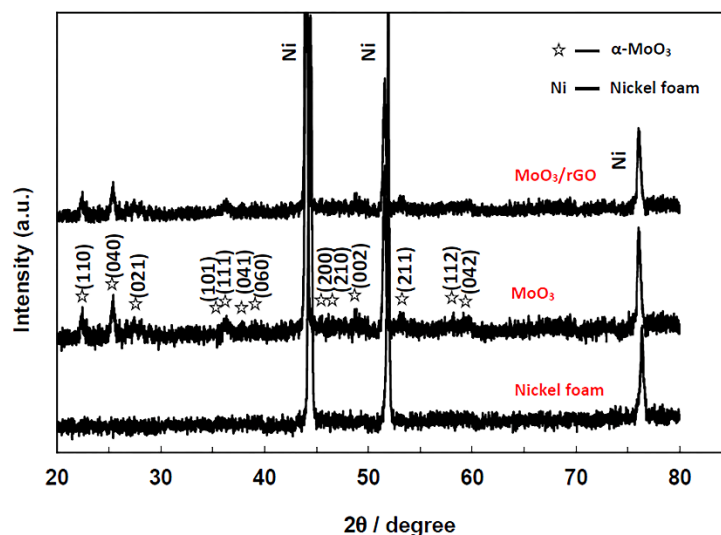


Figure 1. XRD patterns of the bare nickel foam, MoO<sub>3</sub> and rGO/MoO<sub>3</sub> electrodes.

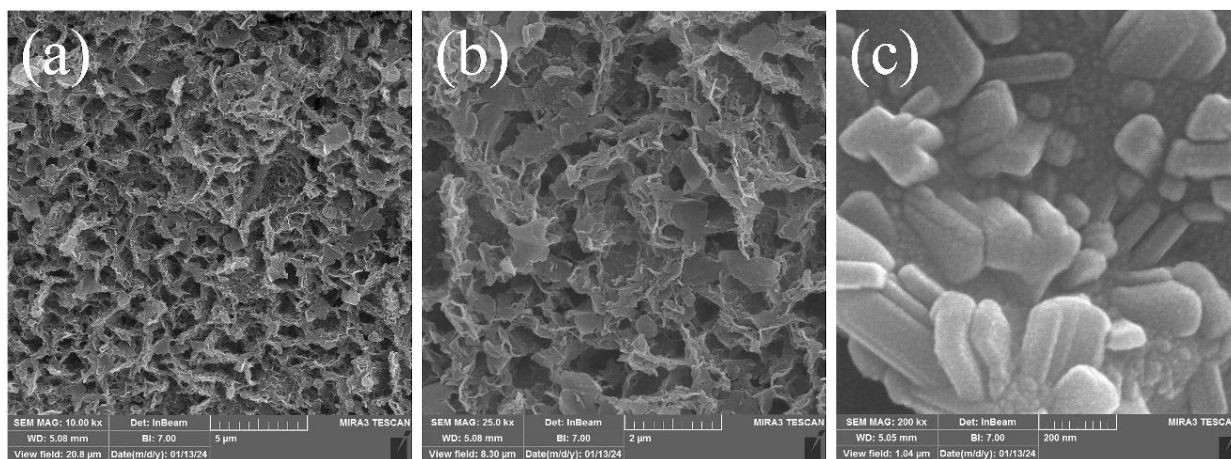
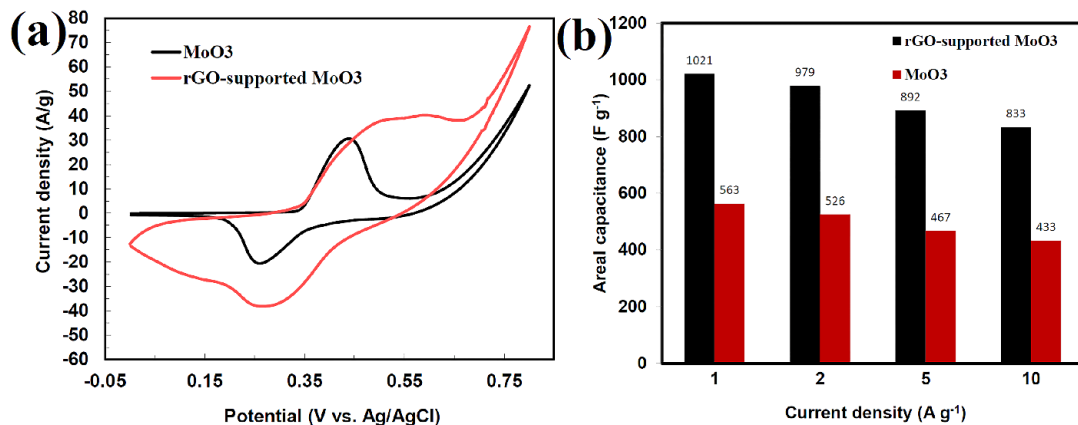


Figure 2. FESEM images of the hybrid rGO/MoO<sub>3</sub> electrode.



**Figure 3.** (a) voltammograms of the molybdenum oxide and reduced graphene oxide/molybdenum oxide electrodes at 20 mV s<sup>-1</sup>; (b) Specific capacitances of the molybdenum oxide and reduced graphene oxide/molybdenum oxide electrodes at various current rates.

#### 4. CONCLUSION

In conclusion, the binder-free rGO/MoO<sub>3</sub> hybrid electrode was synthesized through a two-step approach, which included the hydrothermal deposition of rGO followed by the electrodeposition of molybdenum oxide particles. The influence of the three-dimensional rGO conductive network on the morphology and pseudocapacitive properties of the molybdenum oxide electrode was systematically investigated. The hybrid electrode shows a significantly high capacitance of 1021 F g<sup>-1</sup> at 1 A g<sup>-1</sup>, exceptional cycling performance (with 84.7% capacity retention after 2000 cycles), and enhanced discharge rate capability (maintaining 81.6% capacity retention despite a 10-fold increase in discharge rate).

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

We sincerely thank Mr. Seyyed Mostafa Mirshahvalad at the Central Laboratory of Malayer University for his valuable assistance.

#### REFERENCES

1. Askari, M.B., Salarizadeh, P., & Ramezan /zadeh, M.H. (2024). MoO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>/rGO as electrode material for supercapacitor and catalyst for methanol and ethanol electrooxidation. *Scientific Reports*, 14, 9904. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59018-2>.
2. Oyedotun, K.O., & Mamba, B.B. (2024). New trends in supercapacitors applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113154>.
3. Shahrokhian, S., Rahimi, S., & Mohammadi, R. (2018). Nickel-cobalt layered double hydroxide ultrathin nanosheets coated on reduced graphene oxide nanosheets/nickel foam for high performance asymmetric supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4), 2256-2267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.019>.
4. Subramaniyan, S., Govindasamy, M., Sakkarapani, S., & KuO, C.Y. (2025). Exploration of CeO<sub>2</sub> decorated on MoO<sub>3</sub> as a potential electrode for high performance hybrid supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 1013, 178518. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178518>.



مقاله‌ی کامل پژوهشی

## کارایی شبه‌خازنی الکتروُد هیبریدی اکسید مولیبدن / اکسید گرافن احیاشده‌ی تهیه‌شده‌ی به روش دومرحله‌ای رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی و هیدروترومال

مینا پیرحیاتی<sup>۱</sup>، مهدی کزازی<sup>۲\*</sup>، بهزاد کوزه‌گر کالجی<sup>۲</sup><sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

**تاریخچه‌ی مقاله:** ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱  
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰  
پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

**کلیدواژه‌ها:** ابرخازن، الکتروُد بدون چسب، اکسید مولیبدن، هیدروترومال، رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی

**چکیده** الکتروُد هیبریدی بدون چسب اکسید مولیبدن/اکسید گرافن احیاشده با استفاده از روشی دومرحله‌ای شامل رسوب‌نشانی هیدروترومال نانورقه‌های اکسید گرافن احیاشده (rGO) و سپس رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی اکسید مولیبدن ( $\alpha\text{-MoO}_3$ ) بر سطح فوم نیکل تهیه شد. ویژگی‌های ساختاری و ریخت‌شناختی الکتروُد های  $\text{MoO}_3$  و rGO/MoO<sub>3</sub> با استفاده از روش‌های پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی بررسی شدند. نتایج نشان دادند که ذرات  $\alpha\text{-MoO}_3$  به‌خوبی بر سطح نانورقه‌های rGO رسوب کرده‌اند و ساختاری با تخلخل‌های باز ایجاد کرده‌اند که برای ذخیره‌سازی انرژی مناسب است. کارایی الکتروشیمیایی الکتروُد های تهیه‌شده با استفاده از روش‌های ولتامتری چرخه‌ای، شارژ-تخلیه‌ی جریان ثابت و امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شدند. ظرفیت ویژه الکتروُد های خالص و هیبریدی به‌ترتیب برابر ۵۶۳ و  $1021 \text{ F g}^{-1}$  در چگالی جریان  $1 \text{ A g}^{-1}$  اندازه‌گیری شدند. همچنین، پایداری چرخه‌ای بسیاری خوبی معادل ابقای ظرفیت ۸۴/۷ درصد پس از ۲۰۰۰ چرخه در نرخ جریان  $5 \text{ A g}^{-1}$  برای الکتروُد هیبریدی به دست آمد.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.493058.1312>[https://www.jamt.ir/article\\_216424.html](https://www.jamt.ir/article_216424.html)

### ۱- مقدمه

دوگانه‌ی الکتروشیمیایی و شبه‌خازن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. مواد فعال مورد استفاده در ساخت الکتروُد های ابرخازن‌های لایه‌ی دوگانه شامل انواع مواد کربنی با مساحت سطح بالا و هدایت الکتریکی بالا (مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی و کربن فعال) هستند که الکترون‌ها را از طریق جدایش بارهای الکتریکی و الکترولیتی در فصل مشترک الکتروُد / الکترولیت ذخیره می‌کنند. در این نوع ابرخازن‌ها، هیچ‌گونه واکنش فارادیک اکسایش و کاهش رخ نمی‌دهد. در مقابل، شبه‌خازن‌ها که از انواع اکسیدهای فلزات واسطه ( $\text{NiO}$ ،  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ،  $\text{MnO}_2$ ،  $\text{MoO}_3$  و غیره) و پلیمرهای رسانا (پلی‌پیرول، پلی‌آنلین و پلی‌تیوفن) به‌عنوان مواد فعال الکترواکتیو استفاده می‌کنند، بار الکتریکی را به‌واسطه‌ی انجام واکنش‌های فارادیک برگشت‌پذیر اکسایش / کاهش در فصل مشترک الکتروُد / الکترولیت ذخیره می‌کنند. علی‌رغم اینکه

امروزه توسعه‌ی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی کارآمد و قابل اطمینان به‌دلیل کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و آلودگی هوا به‌شدت مورد توجه هستند ([Rashid Khan & Latif](#)). در میان انواع سیستم‌های ذخیره‌کننده‌ی انرژی، ابرخازن‌ها به‌دلیل چگالی توان بالا، طول عمر بالا، زیست‌سازگاری و قابلیت اطمینان خوب توجه محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده‌اند. با تمام این مزایا، چگالی انرژی ابرخازن‌ها پایین‌تر از باتری‌ها است و، به همین دلیل، عمده‌ی کاربردهای ابرخازن‌ها در ترکیب با باتری‌ها در خودروهای الکتریکی و هیبریدی است ([Oyedotun &](#) [Mamba, 2024; Patil et al., 2017](#)). بر اساس سازوکار ذخیره‌سازی انرژی، ابرخازن‌ها به دو نوع ابرخازن‌های لایه‌ی

عهده‌دار مکاتبات: مهدی کزازی

نشانی: ایران، ملایر، دانشگاه ملایر، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد.

پیام‌نگار: [m\\_kazazi@malayeru.ac.ir](mailto:m_kazazi@malayeru.ac.ir)

اکسید مولیبدن عمدتاً با یک ماده‌ی پایه‌ی کربن مانند نانولوله‌های کربنی یا گرافن ترکیب می‌شود تا الکترودی هیبریدی با کارایی ابرخازنی بالا و ظرفیت و عمر چرخه‌ای طولانی حاصل شود ([Wang et al., 2016](#); [Noerochim et al., 2013](#); [Zhou et al., 2010](#); [Askari et al., 2024](#)).

گرافن به دلیل رسانایی الکتریکی بالا، انعطاف‌پذیری، استحکام مکانیکی، پایداری شیمیایی بالا و پنجره‌ی الکتروشیمیایی گسترده، به عنوان یک ماده‌ی کربنی دوبعدی عالی برای دستگاه‌های انرژی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. با این حال، گرافن متشکل از لایه‌های انباشته، به دلیل جاذبه‌ی قوی واندروالس، تمایل دارد که دوباره به شکل گرافیت انباشته شود، که این امر به نفوذ کوچک الکترولیت به ورقه‌های گرافن منجر می‌شود و سطح فعال را محدود می‌کند. کامپوزیت‌های اکسید فلزی/ گرافن ظرفیت ویژه‌ی بالاتری را با قابلیت نرخ جریان‌دهی بالاتر، پایداری الکتروشیمیایی فوق‌العاده و چگالی انرژی بالاتر نشان می‌دهند. ظرفیت ویژه‌ی کلی نانوکامپوزیت از مقادیر گرافن و اکسید فلز فراتر می‌رود، که این امر نشان‌دهنده‌ی اثر هم‌افزایی مثبت اکسید فلز و گرافن با بهبود خواص الکتروشیمیایی است ([Moyseowicz & Gryglewicz, 2019](#); [Tarascon & Armand, 2001](#); [Borhani et al., 2016](#)).

اخیراً تلاش‌هایی برای سنتز کامپوزیت‌های اکسید فلزی/ گرافن به عنوان مواد الکتروود برای ابرخازن‌ها انجام شده است. چندین گروه کامپوزیت‌های  $\text{MoO}_3$  / شبکه‌ی هادی را گزارش کرده‌اند که می‌توان به نانوذرات  $\text{MoO}_3$  روی نانولوله‌های کربنی چندجداره، نانوتسمه‌های هم‌محور  $\text{MoO}_3/\text{PANI}$ ، نانوتسمه‌ی  $\text{MoO}_{3-x}$  / نانولوله‌های کربنی و هیبریدهای اکسید مولیبدن/ گرافن برای ابرخازن‌ها اشاره کرد. کامپوزیت  $\alpha\text{-MoO}_3$  / گرافن، مسیره‌های مؤثری برای انتقال یون‌ها به سمت مواد الکتروودی فراهم می‌کند تا عملکرد ابرخازن را بهبود بخشد.  $\text{MoO}_3$  / گرافن همچنین می‌تواند ثبات چرخه‌ای و چگالی توان ابرخازن را افزایش دهد. در بیشتر منابع، نانوکامپوزیت  $\alpha\text{-MoO}_3$  / گرافن با روش‌های مرسوم مانند روش‌های رسوب‌نشانی شیمیایی و سونوشیمیایی تهیه شده است. با این حال، این روش‌ها زمان‌بر و کنترل ریخت‌شناسی دشوار است ([Zhou et al., 2015](#); [Shatabda et al., 2015](#)). این در حالی است که رسوب‌نشانی

شبه‌خازن‌ها دارای چگالی توان پایین‌تری از ابرخازن‌های لایه‌ی دوگانه هستند، چگالی انرژی به‌مراتب بالاتری دارند و به دلیل همین مزیت مورد توجه قرار گرفته‌اند ([Thakur & Lokhande, 2017](#); [Jiang et al., 2016](#); [Subramaniyan et al., 2025](#); [Thakur & Lokhande, 2018](#); [Shahrokhian et al., 2018](#)).

بر اساس رابطه‌ی چگالی انرژی،  $E = 0.5 \text{ CV}^2$ ، دو راهکار اساسی برای افزایش چگالی انرژی یک ابرخازن وجود دارد: افزایش ولتاژ سلول ابرخازنی و افزایش ظرفیت ویژه‌ی مواد الکتروفعال در الکتروودها. برای افزایش ظرفیت ویژه‌ی مواد الکتروودی چهار راهکار معرفی شده‌اند ([Sharma & Chand, 2023](#); [Kazazi, 2018](#)):

- (۱) معرفی مواد فعال الکتروودی جدید با ظرفیت ویژه‌ی تئوریک بالاتر؛
  - (۲) افزایش هدایت الکتریکی الکتروودها به روش‌های مختلف مانند ترکیب با مواد کربنی یا نانوذرات فلزی که به استفاده الکتروشیمیایی بهتری از مواد فعال منجر می‌شود و در نتیجه ظرفیت عملی افزایش می‌یابد؛
  - (۳) کنترل ریخت‌شناسی مواد فعال الکتروودی برای حصول ساختاری متخلخل‌تر به منظور نفوذ بهتر یون‌های الکترولیت به درون ساختار الکتروود؛
  - (۴) استفاده از روش‌های مدرن تهیه‌ی الکتروود بدون استفاده از چسب<sup>۱</sup> مانند رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی و الکتروفوریتیک که در نتیجه به کاهش مقاومت داخلی الکتروود منجر می‌شود.
- در بین انواع اکسیدهای فلزی، اکسید مولیبدن ( $\text{MoO}_3$ ) به دلیل قیمت پایین، غیرسمی بودن و دوستدار محیط زیست بودن به عنوان یکی از مواد فعال مناسب برای ابرخازن‌ها معرفی شده است. اکسید مولیبدن شش‌ظرفیتی دارای سه پلی‌مورف اورتورومبیک ( $\alpha\text{-MoO}_3$ )، مونوکلینیک ( $m\text{-MoO}_3$ ) و هگزاگونال ( $h\text{-MoO}_3$ ) است. سیستم بلوری اورتومبیک به دلیل ساختار لایه‌ی دوگانه و رشد ناهمسانگرد از نظر ترمودینامیکی پایدارتر و فاز بسیار مطلوبی است. این لایه از  $\alpha\text{-MoO}_3$  جاسازی یون‌های الکترولیت را بین لایه‌های دوتایی تسهیل می‌کند که برای عملکرد ابرخازن بسیار مهم است. علی‌رغم مزایای قابل توجه،  $\alpha\text{-MoO}_3$  دارای معایبی مانند هدایت الکتریکی پایین، قابلیت جریان‌دهی پایین و طول عمر کم است که این ویژگی‌ها کاربرد تجاری آن را محدود می‌کنند. برای غلبه بر این مشکلات،

گرم rGO اسیدشویی شده در داخل ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته و سپس مقدار مناسبی از محلول رقیق KOH به آن اضافه شد تا در نهایت pH سوسپانسیون به حدود ۸/۵ برسد. سوسپانسیون تهیه شده به مدت ۲ ساعت التراسونیک شد تا ذرات به خوبی درون محلول پراکنده شوند. سپس، سوسپانسیون تهیه شده درون اتوکلاو ریخته و فوم نیکل اسیدشویی شده درون آن انداخته شد و، پس از بستن در اتوکلاو، مجموعه درون کوره گذاشته شد. حرارت دهی در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت انجام شد تا نانورقه‌های rGO بر روی سطح فوم نیکل لایه‌نشانی شوند. پس از گذشت زمان مورد نظر، در اتوکلاو را باز و فوم نیکل با پوشش rGO را خارج کردیم و با آب مقطر شست‌وشو دادیم و در نهایت در خشک‌کن ۲ به مدت ۶ ساعت قرار دادیم تا فوم نیکل با پوشش rGO به دست آید.

#### ۲-۲- رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی MoO<sub>3</sub>

در این تحقیق، ذرات اکسید مولیبدن با استفاده از فرایند رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی جریان ثابت کاتدی در سلول دوالکترودی لایه‌نشانی شدند. برای تهیه الکترولیت مورد استفاده به ترتیب ۰/۷۵ گرم سدیم مولیبدات، ۰/۱۵ گرم سدیم استات و ۰/۰۴۵ گرم تریتون x-100 درون ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته و با همزن مغناطیسی همزده شد تا محلول شفاف به دست آید. سپس، با افزودن مقدار کمی اسید سولفوریک رقیق pH محلول به ۴ رسانیده شد. در سل الکتروشیمیایی مورد استفاده، محلول به دست آمده به عنوان الکترولیت، فوم نیکل با پوشش rGO به عنوان کاتد و ورق فولاد زنگ‌نزن با مساحت سطح cm<sup>2</sup> ۶ به عنوان آند استفاده شدند. همچنین، رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی با جریان ۵ mA cm<sup>-2</sup> و به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد تا الکتروُد rGO/MoO<sub>3</sub> به دست آید. پس از اتمام زمان رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی، الکتروُد هیبریدی rGO/MoO<sub>3</sub> از حمام خارج و با آب مقطر شست‌وشو داده شد و در نهایت در کوره در دمای ۳۰۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۲ ساعت کلسینه شد. گفتنی است که الکتروُد خالص MoO<sub>3</sub> بدون بستر rGO نیز برای مقایسه با همین روش تهیه شد.

#### ۲-۳- مشخصه‌یابی الکترودها و بررسی‌های الکتروشیمیایی

ساختار بلوری الکترودهای خالص و هیبریدی اکسید

الکتروشیمیایی به عنوان روشی ساده و کم‌هزینه برای لایه‌نشانی مواد الکترودی مختلف با یکنواختی و پایداری مناسب بر روی بستر جمع‌کننده‌ی جریان مطرح است. علاوه بر این، ریخت‌شناسی و ضخامت لایه‌های رسوب‌نشانی شده را می‌توان به سادگی از طریق تغییر شرایط رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی مانند الکترولیت، چگالی جریان و دمای حمام کنترل کرد (Kazazi & Ganji Ghelyji, 2024).

در این تحقیق، از یک روش دو مرحله‌ای کارآمد برای تهیه الکتروُد هیبریدی اکسید گرافن احیاشده/ اکسید مولیبدن (rGO/MoO<sub>3</sub>) استفاده شده است. به طور خلاصه، بستر رسانا و متخلخل rGO با استفاده از روش هیدروترمال بر روی سطح جمع‌کننده‌ی جریان فوم نیکل رسوب‌نشانی شد. در مرحله‌ی بعد، ذرات اکسید مولیبدن، با استفاده از روش رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی جریان ثابت کاتدی، بر روی سطح نانورقه‌های گرافن قرار گرفتند. اثر بستر پشتیبان rGO بر رفتار شبه‌خازنی الکتروُد MoO<sub>3</sub> توسط ولتامتری چرخه‌ای (CV)، شارژ-تخلیه‌ی جریان ثابت (GCD) در نرخ‌های مختلف و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) بررسی شد.

#### ۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر، همه‌ی مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت مرک<sup>۱</sup> آلمان خریداری شده بودند و بدون خالص‌سازی بیشتر استفاده شدند. همچنین، نانورقه‌های اکسید گرافن احیاشده (rGO) از شرکت Usnano خریداری شدند.

#### ۲-۱- رسوب‌نشانی هیدروترمال نانورقه‌های rGO

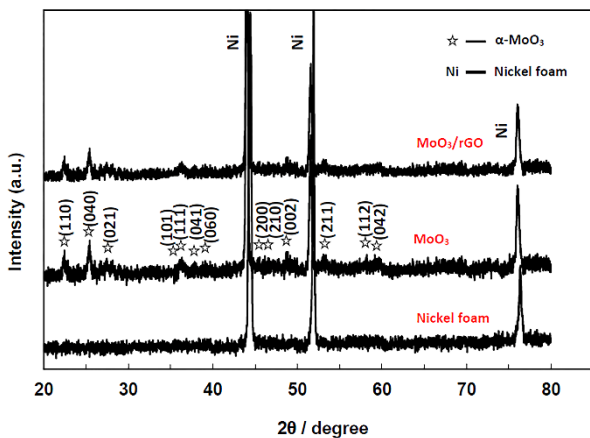
نانورقه‌های rGO به طور یکنواخت با استفاده از روش هیدروترمال بر روی سطح فوم نیکل لایه‌نشانی شدند. قبل از فرایند رسوب‌نشانی، فوم نیکل زیرلایه در محلول ۶ مولار HCl به مدت ۳۰ دقیقه اسیدشویی شد تا لایه‌های اکسید سطحی آن زدوده شود. همچنین، نانورقه‌های rGO در مخلوط ۳ به ۱ اسید سولفوریک/ اسید نیتریک در دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۶ ساعت اسیدشویی شدند تا ناخالصی‌ها زدوده شوند و سطح آن‌ها عامل‌دار شود تا سوسپانسیون پایداری حاصل شود. سپس، به دقت با آب مقطر شست‌وشو داده شدند و در نهایت در خشک‌کن خشک شدند. برای تهیه سوسپانسیون rGO، ۰/۲

فرایند کلسیناسیون واکنشی بین rGO و  $\text{MoO}_3$  ایجاد نشده است و صرفاً رسوب و رشد بر روی نانورقه‌های گرافن اتفاق افتاده است.

به علاوه، اندازه‌ی بلورک‌های ماده‌ی فعال اکسید مولیبدن با استفاده از رابطه‌ی شرر محاسبه شد:

$$d = (0.9 \times \lambda) / (w \times \cos \theta) \quad (1)$$

که در آن  $d$  میانگین اندازه بلورک‌ها است،  $\lambda$  طول موج  $\text{Cu K}\alpha$  پرتو ایکس (۰/۱۵۴ نانومتر) است،  $\theta$  زاویه‌ی پراش و  $w$  پهنای پیک در نصف شدت پیک به رادیان است. طبق محاسبات، با استفاده از پیک مربوط به صفحه‌ی (۰۴۰)، اندازه‌ی بلورک‌های ذرات اکسید مولیبدن در الکتروود خالص و هیبریدی به ترتیب برابر ۲۹/۱ و ۲۶/۲ نانومتر به دست آمد.



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس فوم نیکل و الکتروودهای خالص و هیبریدی اکسید مولیبدن

مشخصه‌ی ریخت‌شناختی الکتروودهای  $\text{MoO}_3$  و  $\text{rGO/MoO}_3$  با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی بررسی شد و به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپی شکل ۲ نشان می‌دهند که لایه‌ی رسوب‌نشانی‌شده‌ی اکسید مولیبدن خالص دارای ساختاری نسبتاً فشرده است و از ذرات مکعبی‌مانند تشکیل شده‌اند. در خصوص الکتروود  $\text{rGO/MoO}_3$  مشاهده می‌شود که ذرات اکسید مولیبدن بر روی بستر گرافن لایه‌نشانی شده‌اند و تشکیل یک ساختار هیبریدی متخلخل را می‌دهند (شکل ۳).

مولیبدن با استفاده از پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD، مدل Unisantis XMD-300) بررسی شد. همچنین، ریخت‌شناسی سطحی و نقشه‌ی آنالیز عنصری الکتروودها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۲</sup> (FE-SEM) مدل MIRA3 الکترونی TESCAN-XMU مجهز به طیف‌نگار پرتو ایکس تفرق انرژی (EDS) ارزیابی شد.

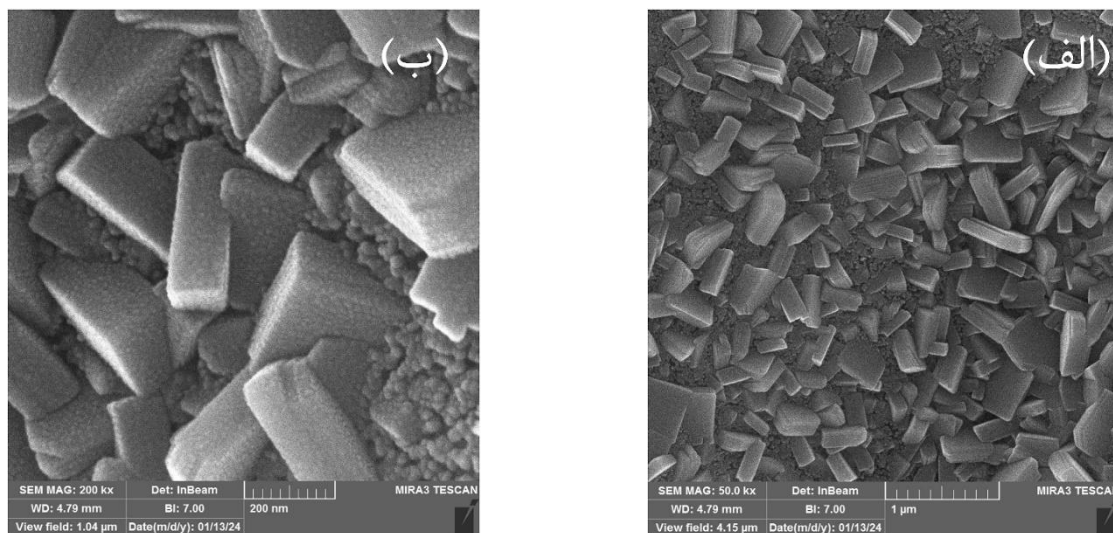
کارایی ابرخازنی الکتروودهای خالص و هیبریدی در محلول ۲ مولار پتاسیم هیدروکسید و با استفاده از سلول سه‌الکتروودی ارزیابی شد که در آن الکتروودهای تهیه‌شده به‌عنوان الکتروود کاری، الکتروود پلاتین به‌عنوان الکتروود شمارنده و الکتروود استاندارد  $\text{Ag/AgCl}$  به‌عنوان الکتروود مرجع استفاده شدند. برای ارزیابی رفتار ابرخازنی الکتروودها از آزمون‌های ولتامتری چرخه‌ای<sup>۳</sup> (CV)، شارژ/تخلیه‌ی جریان ثابت<sup>۴</sup> (GCD)، طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی<sup>۵</sup> (EIS) و چرخه‌پذیری استفاده شد. آزمون CV در بازه‌ی پتانسیل ۰ تا ۰/۸ ولت در مقایسه با الکتروود  $\text{Ag/AgCl}$  و با نرخ روبش پتانسیل ۱۰ تا ۱۰۰ mV  $\text{s}^{-1}$  انجام شد. آزمون GCD در جریان‌های ثابت مختلف ۱ تا ۱۰ A  $\text{g}^{-1}$  انجام شد. همچنین، EIS در بازه‌ی فرکانس ۱۰۰ تا ۱۰ mHz با دامنه‌ی پتانسیل  $\pm 10$  mV در پتانسیل مدار باز الکتروودها انجام شد.

## ۳- نتایج و بحث

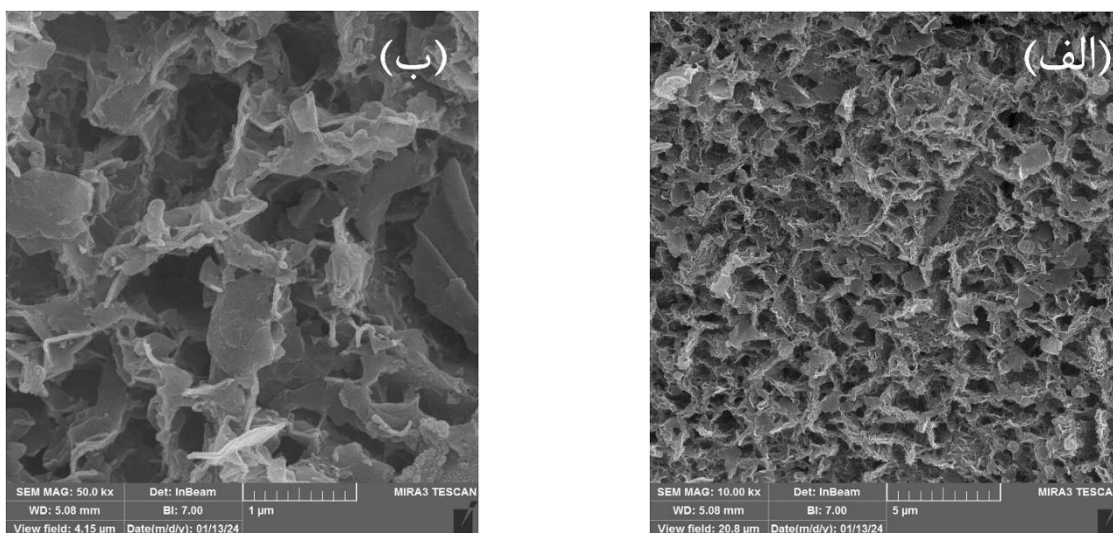
### ۳-۱- مشخصه‌یابی الکتروودهای خالص و هیبریدی $\text{MoO}_3$

الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به زیرلایه‌ی فوم نیکل، الکتروود خالص  $\text{MoO}_3$  و الکتروود هیبریدی  $\text{rGO/MoO}_3$  در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فارغ از ۳ پیک قوی، که به زیرلایه‌ی فوم نیکل مربوط می‌شوند، سایر پیک‌های مشخص‌شده به ساختار اورتورومبیک  $\alpha\text{-MoO}_3$  با شماره‌ی کارت ((JCPDS No. 89-5108)) نسبت داده می‌شوند. همچنین، مشخص است که الگوی XRD الکتروودهای خالص و هیبریدی کاملاً مشابه یکدیگر هستند که نشان می‌دهد در حین فرایند رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی و

1. X-ray diffraction
2. Field emission scanning electron microscopy
3. Cyclic voltammetry
4. Galvanostatic charge/discharge
5. Electrochemical impedance spectroscopy



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح الکتروکاتالیست  $\text{MoO}_3$  در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

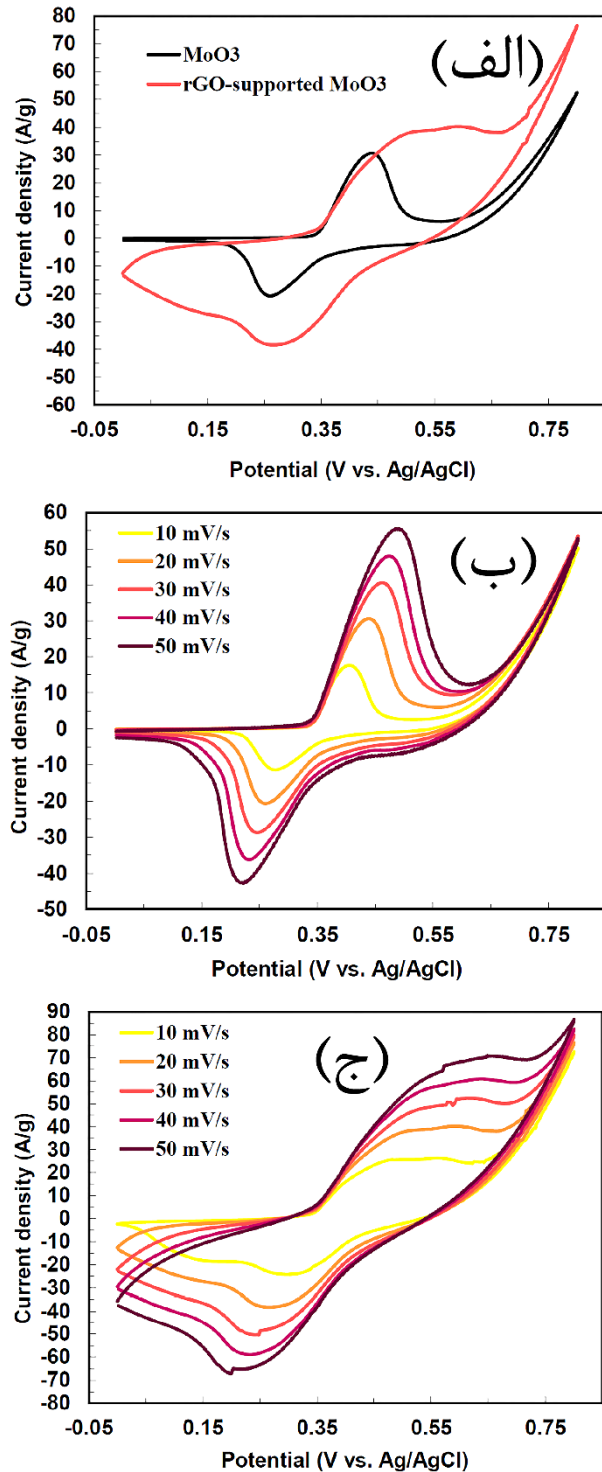


شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح الکتروکاتالیست  $\text{rGO}/\text{MoO}_3$  در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

می‌دهد و انتقال یون‌های الکتروولیت به سمت ماده‌ی فعال را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، بستر گرافن می‌تواند رسانایی الکتریکی الکتروکاتالیست را افزایش دهد و به واکنش‌های الکتروشیمیایی آسان و بهبود سینتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی منجر شود.

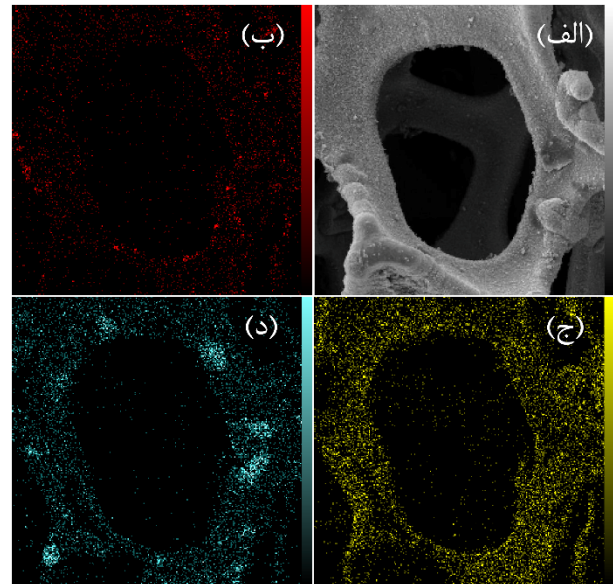
به دلیل ساختار داربستی گرافن با رسانایی الکترونیکی بالا، ریزساختار هیبریدی به دست آمده می‌تواند عملکرد شبه‌خازنی ماده‌ی فعال  $\text{MoO}_3$  را بهبود بخشد. ساختار متخلخل باز الکتروکاتالیست هیبریدی اجازه‌ی نفوذ آسان الکتروولیت به ساختار الکتروکاتالیست را

نشان‌دهنده‌ی کارایی شبه‌خازنی پایدار الکترودها در محلول قلیایی پتاسیم هیدروکسید است. همچنین، سطح زیر منحنی‌های CV مربوط به الکترودهیبریدی در همه‌ی نرخ‌های روبش بیشتر از الکترودهی خالص است که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت پایدار و بیشتر الکترودهیبریدی است.



شکل ۵. منحنی‌های ولتامتری چرخه‌ای الکترودهای خالص و هیبریدی در نرخ  $20 \text{ mV s}^{-1}$ ؛ منحنی‌های ولتامتری چرخه‌ای الکترودهای (ب) خالص و (ج) هیبریدی در نرخ‌های روبش پتانسیل مختلف

تصاویر نقشه‌ی آنالیز عنصری برای الکترودهیبریدی rGO/MoO<sub>3</sub> مجدداً توزیع یکنواخت عناصر کربن، مولیبدن و اکسیژن را تأیید می‌کنند که نشان‌دهنده‌ی توزیع یکنواخت ماده‌ی فعال اکسید مولیبدن بر روی بستر گرافن است (شکل ۴).

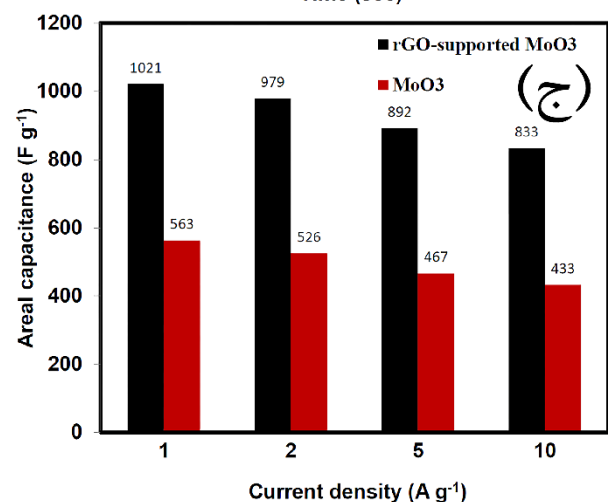
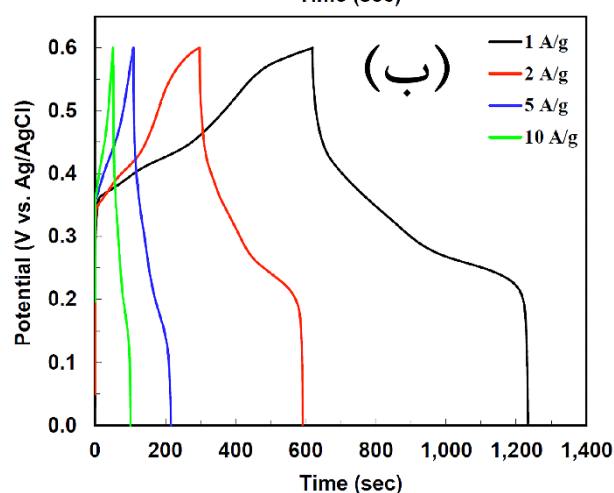
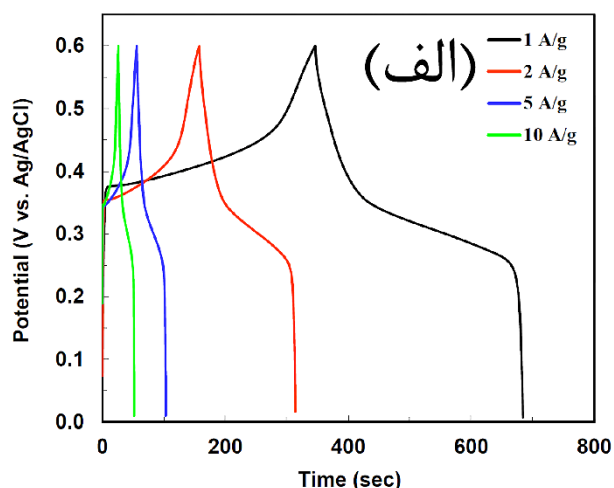


شکل ۴. نقشه‌ی آنالیز عنصری الکترودهیبریدی برای عناصر (ب) کربن، (ج) اکسیژن و (د) مولیبدن

### ۳-۲- بررسی عملکرد ابرخازنی الکترودها

رفتار الکتروشیمیایی و کارایی ابرخازنی الکترودهای خالص و هیبریدی اکسید مولیبدن در سل سه‌الکترودی حاوی محلول هیدروکسید پتاسیم ارزیابی شد. شکل ۵ (الف) منحنی‌های ولتامتری چرخه‌ای الکترودهای MoO<sub>3</sub> و rGO/MoO<sub>3</sub> را در بازه‌ی ولتاژ ۰ تا ۰/۸ ولت در مقایسه با الکتروده استاندارد Ag/AgCl و در نرخ روبش پتانسیل  $20 \text{ mV s}^{-1}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو الکتروده دارای یک جفت پیک اکسایش/کاهش هستند که نشان‌دهنده‌ی رفتار شبه‌خازنی آن‌ها است. همچنین، به‌وضوح مشاهده می‌شود که الکترودهیبریدی دارای مساحت سطح زیر نمودار بیشتری از الکترودهی خالص است که بیانگر استفاده‌ی الکتروشیمیایی بهتر از ماده‌ی فعال و در نتیجه ظرفیت ویژه بالاتر الکترودهیبریدی است. بهبود ظرفیت خازنی الکترودهیبریدی نشان می‌دهد که بستر پشتیبانی rGO به تسهیل انتقال الکترون و یون در ساختار الکتروده کمک می‌کند. شکل‌های ۵ (ب) و ۵ (ج) به ترتیب منحنی‌های CV الکترودهای خالص و هیبریدی را در نرخ‌های روبش مختلف از ۱۰ تا  $50 \text{ mV s}^{-1}$  نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ روبش پتانسیل، شکل منحنی‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند که

فرکانسی از ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۰/۱ هرتز در محلول پتاسیم هیدروکسید استفاده شد.



شکل ۶. منحنی‌های شارژ-تخلیه‌ی جریان ثابت الکترودهای (الف) خالص و (ب) هیبریدی در نرخ جریان‌های مختلف؛ (ج) مقایسه‌ی ظرفیت‌های ویژه‌ی الکترودهای خالص و هیبریدی در نرخ جریان‌های مختلف

شکل ۷ (الف) نمودارهای نایکوئیست را نشان می‌دهد که در پتانسیل مدار باز با سیستم سه‌الکترودی برای الکترودهای MoO<sub>3</sub> و rGO/MoO<sub>3</sub> اندازه‌گیری شده‌اند. نمودارهای هر دو الکترو

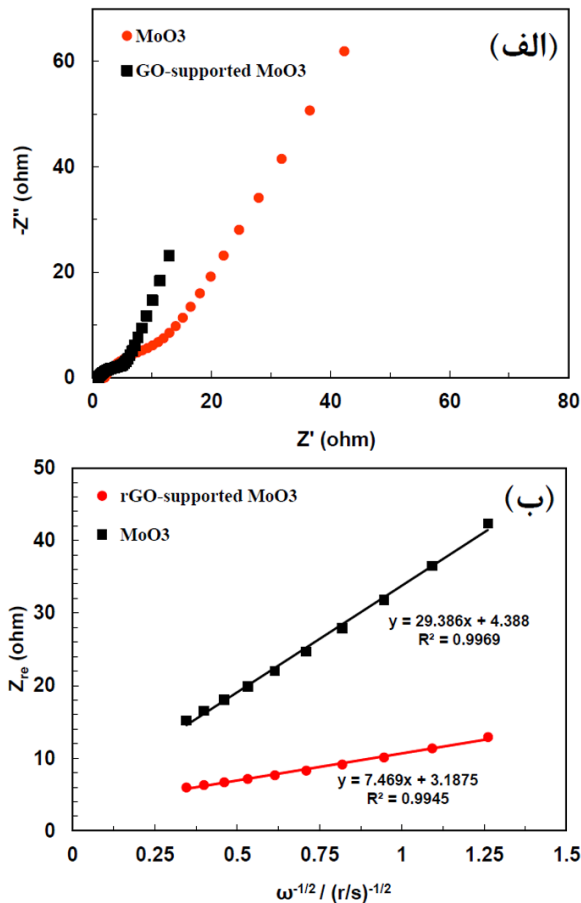
اندازه‌گیری‌های شارژ-تخلیه‌ی جریان ثابت (GCD) به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر رفتار شبه‌خازنی الکترودهای خالص و هیبریدی در نرخ‌های شارژ و تخلیه‌ی ۱ تا ۱۰ A g<sup>-1</sup> انجام شدند. منحنی‌های GCD مربوط به الکترودهای خالص و هیبریدی به‌ترتیب در شکل‌های ۶ (الف) و ۶ (ب) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که هر دو الکتروود دارای ناحیه‌ی ولتاژ پایا در منحنی‌های شارژ و تخلیه هستند که مطابق با پیک‌های اکسایش و کاهش در منحنی‌های CV آن‌ها است و نشان‌دهنده‌ی رفتار شبه‌خازنی هر دو الکتروود است. همچنین، ظرفیت ویژه‌ی الکترودهای ابرخازنی تهیه‌شده با استفاده از زمان تخلیه‌ی ( $\Delta t$ ) (مطابق منحنی‌های تخلیه در آزمون شارژ-تخلیه) الکتروشیمیایی مطابق معادله‌ی ۲ به دست آمدند.

$$C = (i \times \Delta t) / (m \times \Delta V) \quad (2)$$

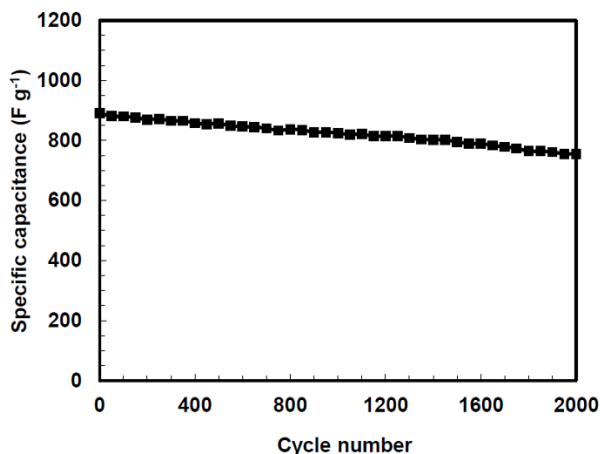
در این رابطه، (C) ظرفیت ویژه‌ی خازن بر حسب فاراد بر گرم، (i) جریان تخلیه بر حسب آمپر، (m) وزن ماده‌ی فعال بر حسب میلی‌گرم و ( $\Delta V$ ) بازه‌ی پتانسیل بر حسب ولت است. همان‌طور که در شکل ۶ (ج) مشاهده می‌شود، الکتروود هیبریدی rGO/MoO<sub>3</sub> دارای ظرفیت‌های ویژه‌ی بالای ۱۰۲۱، ۹۷۹، ۸۹۲ و ۸۳۳ F g<sup>-1</sup> به‌ترتیب در نرخ‌های تخلیه‌ی ۱، ۲، ۵ و ۱۰ A g<sup>-1</sup> است که بیشتر از الکتروود خالص MoO<sub>3</sub> هستند (۵۶۳، ۵۲۶، ۴۶۷ و ۴۳۳ F g<sup>-1</sup>). کاهش ظرفیت با افزایش چگالی جریان، به‌دلیل کاهش زمان نفوذ یون‌های الکترولیت در نرخ‌های جریان بالا است که به استفاده‌ی ناقص الکتروشیمیایی از ماده‌ی فعال منجر می‌شود. علاوه بر این، حتی با افزایش ۱۰ برابری در چگالی جریان تخلیه، الکتروود هیبریدی ابقای ظرفیت خازنی خوبی را معادل ۸۱/۶ درصد نشان داد، که بیشتر از الکتروود خالص است (۷۶/۹ درصد). ظرفیت ویژه‌ی بیشتر و قابلیت جریان‌دهی بهتر الکتروود هیبریدی را می‌توان به اثر هم‌افزایی بین چهارچوب rGO و ماده‌ی فعال MoO<sub>3</sub> نسبت داد، که شامل رسانایی الکتریکی بیشتر و نرخ نفوذ بالاتر یون‌های الکترولیت به‌دلیل ساختار متخلخل باز الکتروود هیبریدی با سطح تماس الکتروود/الکترولیت بالاتر است. این ویژگی‌ها انتقال آسان الکترون/یون در ساختار الکتروود و دسترسی بهتر مواد الکتروودی به الکترولیت را فراهم می‌کنند که به عملکرد شبه‌خازنی بهتری منجر می‌شود.

برای درک بهتر مقاومت انتقال بار و رفتار نفوذی الکترودها، از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محدوده‌ی

مشاهده می‌شود، الکتروود هیبریدی دارای پایداری چرخه‌ای خوب با ابقای ظرفیت ۸۴/۷ درصد پس از ۲۰۰۰ چرخه است. پایداری الکتروشیمیایی خوب الکتروود هیبریدی را می‌توان به ساختار سه‌بعدی منحصربه‌فرد آن نسبت داد، که انبساط و انقباض  $\text{MoO}_3$  را بر اثر جاسازی/جداسازی مداوم یون‌های الکتروولیت کاهش داده است.



شکل ۷. (الف) طیف نایکوئیست الکتروودهای خالص و هیبریدی؛ (ب) رابطه‌ی بین  $Z_{re}$  و  $\omega^{-1/2}$  در فرکانس‌های پایین برای الکتروودهای خالص و هیبریدی



شکل ۸. نمودار پایداری چرخه‌ای الکتروود هیبریدی rGO/MoO<sub>3</sub> در چگالی جریان ۵ A g<sup>-1</sup>

نظر شکل مشابه هستند که شامل دو قسمت است: یک نیم‌دایره‌ی فشرده در ناحیه‌ی فرکانس بالا که نشان‌دهنده‌ی مقاومت انتقال بار است و یک خط شیب‌دار در ناحیه‌ی فرکانس پایین، که به رفتار نفوذی الکتروودها مربوط می‌شود (Faraji & Mohammadzadeh Aydisheh, 2018). همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، قطر نیم‌دایره برای الکتروود هیبریدی کوچک‌تر است که بیانگر مقاومت انتقال بار کمتر آن در مقایسه با الکتروود خالص است. فرایند انتقال بار بهتر الکتروود هیبریدی را می‌توان به بستر سه‌بعدی rGO با ساختار متخلخل و رسانایی بالا نسبت داد که به مسیرهای انتقال الکترون کوتاه‌تر به سمت ماده‌ی فعال  $\text{MoO}_3$  منجر می‌شود. علاوه بر این، الکتروود هیبریدی یک خط مستقیم نفوذی کوتاه‌تر و با شیب تندتر را در محدوده‌ی فرکانس پایین نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی نرخ نفوذ بالاتر یون‌های الکتروولیت به داخل ساختار متخلخل الکتروود هیبریدی است (Gao et al., 1993). ضریب انتشار یون‌های الکتروولیت ( $D_{OH^-}$ ) در داخل الکتروودهای خالص و هیبریدی را می‌توان از خط واربرگ با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۲۲]:

$$D_{OH^-} = 0.5 \left( \frac{RT}{An^2F^2\sigma_w C} \right)^2 \quad (3)$$

در این رابطه،  $R$  ثابت گازها است ( $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )،  $T$  دما (در این کار ۲۹۸ K)،  $A$  مساحت سطح در معرض الکتروود،  $n$  تعداد الکترون‌ها در هر مولکول در حین فرایند جاسازی،  $F$  ثابت فارادی است ( $96500 \text{ C mol}^{-1}$ )،  $C$  غلظت یون‌های هیدروکسید در الکتروولیت و  $\sigma_w$  فاکتور واربرگ است که با قسمت حقیقی امپدانس ( $Z_{re}$ ) در ناحیه‌ی خط واربرگ دارای رابطه زیر است:

$$Z_{re} = R_D + R_L + \sigma_w \omega^{-1/2} \quad (4)$$

نمودارهای خطی بین  $Z_{re}$  و ریشه‌ی مربع فرکانس‌های زاویه‌ای ( $\omega^{-1/2}$ ) در ناحیه‌ی فرکانس پایین برای هر دو الکتروود در شکل ۷(ب) نشان داده شده است. ضریب نفوذ یون هیدروکسید در داخل الکتروودهای خالص و هیبریدی از شیب خط فیت‌شده ( $\sigma$ ) در شکل ۷(ب) و بر اساس رابطه‌ی (۳) به ترتیب برابر  $1.03 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  و  $1.59 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  محاسبه شد.

علاوه بر این، پایداری چرخه‌ای طولانی‌مدت معیاری مهم برای کاربردهای عملی یک الکتروود ابرخازنی است. بنابراین، عملکرد چرخه‌ای الکتروود هیبریدی از طریق اندازه‌گیری‌های مکرر GCD در چگالی جریان  $5 \text{ A g}^{-1}$  برای ۲۰۰۰ چرخه ارزیابی شد که نتایج در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که

## ۴- نتیجه‌گیری

در مجموع، الکتروُد هیبریدی بدون چسب rGO/MoO<sub>3</sub> استفاده از روشی دومرحله‌ای ساخته شد که شامل رسوب هیدروترمال نانورقه‌های اکسید گرافن احیاشده و، به دنبال آن، رسوب الکتروشیمیایی ذرات اکسید مولیبدن بود. اثر شبکه‌ی رسانای سه‌بعدی rGO بر خواص ریخت‌شناختی و شبه‌خازنی الکتروُد اکسید مولیبدن به‌طور کامل و جامع بررسی شد. در مقایسه با الکتروُد خالص، الکتروُد هیبریدی ظرفیت ویژه‌ی بالاتر  $1021 \text{ F g}^{-1}$  در چگالی جریان  $1 \text{ A g}^{-1}$ ، قابلیت نرخ جریان‌دهی بهتر  $(81/6)$  درصد حفظ ظرفیت خازنی حتی با افزایش  $10$  برابر در چگالی جریان تخلیه و پایداری چرخه‌ای برتر  $(84/7)$  درصد حفظ ظرفیت خازنی پس از  $2000$  چرخه در  $5 \text{ A g}^{-1}$  را نشان داد. بهبود عملکرد الکتروشیمیایی الکتروُد هیبریدی می‌تواند به دلیل ساختار منحصربه‌فرد آن باشد که به تسهیل انتقال الکترون و یون در ساختار الکتروُد برای استفاده‌ی راحت‌تر الکتروشیمیایی از مواد فعال منجر می‌شود. چنین ساختار سلسله‌مراتبی سه‌بعدی منحصربه‌فردی از الکتروُد هیبریدی، که توسط این راهبرد دومرحله‌ای پیشنهادی تهیه شد، ممکن است فرصت‌های جدیدی برای ساخت الکتروُد‌های کامپوزیتی مواد شبه‌خازنی / مواد کربنی بدون باینر برای کاربردهای ابرخازن با کارایی بالا فراهم کند.

## ۵- سپاسگزاری

از آقای مهندس سید مصطفی میرشاه‌ولد در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه ملایر سپاسگزاری می‌شود.

## مراجع

- Jiang, Y., Chen, L., Zhang, H., Zhang, Q., Chen, W., & Zhu, J. (2016). Two-dimensional Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> thin sheets assembled by 3D interconnected nanoflake array framework structures with enhanced supercapacitor performance derived from coordination complexes. *Chemical Engineering Journal*, 292, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.009>
- Kazazi, M. (2018). Effect of electrodeposition current density on the morphological and pseudocapacitance characteristics of porous nano-spherical MnO<sub>2</sub> electrode. *Ceramics International*, 44(9), 10863-10870. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.138>
- Kazazi, M., & Ganji Ghelyji, A. (2024). Electrochemical Deposition of Nanostructured Nickel Molybdate on Nickel Foam as a Supercapacitor Electrode. *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, 13(2), 10-21. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2024.447202.1296>
- Moyseowicz, A., & Grylewicz, G. (2019). Hydrothermal-assisted synthesis of a porous polyaniline/reduced graphene oxide composite as a high-performance electrode material for supercapacitors. *Composites Part B: Engineering*, 159, 4-12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.069>
- Noerchim, L., Wang, J. Z., Wexler, D., Chao, Z., & Liu, H. K. (2013). Rapid synthesis of free-standing MoO<sub>3</sub>/Graphene films by the microwave hydrothermal method as cathode for bendable lithium batteries. *Journal of Power Sources*, 228, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.113>
- Oyedotun, K. O., & Mamba, B. B. (2024). New trends in supercapacitors applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113154>
- Patil, A. M., Lokhande, V. C., Patil, U. M., Shinde, P. A., & Lokhande, C. D. (2017). High performance all-solid-state asymmetric supercapacitor device based on 3D Nanospheres of b-MnO<sub>2</sub> and Nanoflowers of O-SnS. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 787-802. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03136>
- Rashid Khan, H., & Latif Ahmad, F., (2025). Supercapacitors: Overcoming current limitations and charting the course for next-generation energy storage. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 141, 46-66. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.07.014>
- Shahrokhian, S., Rahimi, S., & Mohammadi, R. (2018). Nickel-cobalt layered double hydroxide ultrathin nanosheets coated on reduced graphene oxide nanosheets/nickel foam for high performance asymmetric supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4), 2256-2267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.019>
- Sharma, S., & Chand, P. (2023). Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review. *Results in Chemistry*, 5, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100885>
- Shatabda, B., Diptiman, D., & Shyamal, K. S. (2015). Role of trap states on storage capacity in a graphene/MoO<sub>3</sub> 2D electrode material. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48, 145303. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/14/145303>
- Subramaniyan, S., Govindasamy, M., Sakkarapani, S., & KuO, C. Y. (2025). Exploration of CeO<sub>2</sub> decorated on MoO<sub>3</sub> as a potential electrode for high performance hybrid supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 1013, 178518. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178518>
- Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, 359-367. <https://doi.org/10.1038/35104644>
- Thakur, A. V., & Lokhande, B. J. (2017). Electrolytic anion affected charge storage mechanisms of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> flexible thin film electrode in KCl and KOH: a comparative study by cyclic voltammetry and galvanostatic charge-discharge. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 11755-11761. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6980-9>
- Thakur, A. V., & Lokhande, B. J. (2018). C10H8N2-PPy hybrid flexible electrodes: SILAR synthesis and electrochemical study. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 1630-1635. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8074-0>
- Wang, L., Zhang, X., Ma, Y., Yang, M., & Qi, Y. (2016). Rapid microwave-assisted hydrothermal synthesis of one-dimensional MoO<sub>3</sub> nanobelts. *Materials Letters*, 164, 623-626. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.076>
- Askari, M. B., Salarizadeh, P., & Ramezanzadeh, M. H. (2024). MoO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>/rGO as electrode material for supercapacitor and catalyst for methanol and ethanol electrooxidation. *Scientific Reports*, 14, 9904. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59018-2>
- Borhani, S., Moradi Alborzi, M., & Kiani, M. A. (2016). Deposition of Graphene Oxide Using Electrophoretic Method and Heat Treatment Temperature Effect on the Character of the Supercapacitor. *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, 5(3), 41-50. [In Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2017.70339>
- Faraji, M., & Mohammadzadeh Aydisheh, H. (2018). Rational synthesis of highly porous PANI-CNTs-PVC film for high performance flexible supercapacitor. *ChemElectroChem*, 5(19), 2882-2892. <https://doi.org/10.1002/celec.201800628>
- Gao, Z., Bobacka, J., & Ivaska, A. (1993). Electrochemical impedance spectroscopy of cobalt (II)-hexacyanoferrate film modified electrodes. *Electrochimica Acta*, 38(2-3), 379-385. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(93\)85154-Q](https://doi.org/10.1016/0013-4686(93)85154-Q)

21. Zhou, K., Zhou, W., Liu, X., Sang, Y., Ji, S., Li, W., Lu, J., Li, L., Niu, W., Liu, H., & Chen, S. (2015). Ultrathin MoO<sub>3</sub> nanocrystals self-assembled on graphene nanosheets via oxygen bonding as supercapacitor electrodes of high capacitance and long cycle life. *Nano Energy*, *12*, 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.01.017>
22. Zhou, L., Yang, L., Yuan, P., Zou, J., Wu, Y., & Yu, C. (2010).  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> Nanobelts: A High-Performance Cathode Material for Lithium Ion Batteries. *The Journal of Physical Chemistry C*, *114*, 21868–21872. <https://doi.org/10.1021/jp108778v>