



Controlled Electrophoretic Deposition of Ti_3C_2 MXene on $Ni(OH)_2$ Nanoparticles/NF for Enhanced Hydrogen Evolution Reaction

Nazli Morovati Sharifi¹, Samira Yousefzadeh^{1,2*}

¹ PhD student, Faculty of Physics, Department of Basic Sciences, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

² Associate Professor, Faculty of Physics, Department of Basic Sciences, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

*Corresponding Author's Email: Yousefzadeh@sut.ac.ir (Samira Yousefzadeh)

Paper History:

Received: 2025-12-16

Revised: 2026-05-26

Accepted: 2026-06-14

Keywords:

Nickel Hydroxide Nanoparticles,

Titanium Carbide MXene,

Electrophoretic,

Hydrogen Evolution Reaction

ABSTRACT In this study, nickel hydroxide nanoparticles were deposited on nickel foam (NF) via electrodeposition, and then titanium carbide (Ti_3C_2) MXene was coated using the electrophoretic deposition technique at different voltages (1, 3, and 5 V) and times (10, 20, and 30 min), resulting in the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF electrode. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) revealed the porous nanostructure of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF electrode. Attenuated total reflection infrared spectroscopy (ATR) and X-ray diffraction (XRD) confirmed the chemical composition and crystalline structure of the synthesized electrodes. Electrochemical measurements indicated that the optimal deposition voltage and time for HER were 3 V and 30 min, respectively. This research introduced the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF electrode as a promising alternative to rare and expensive electrocatalysts and demonstrated the effect of voltage and time on the electrophoretic deposition of Ti_3C_2 MXene on the HER activity of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF electrode.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.547527.1347>

URL: https://www.jamt.ir/article_245790.html

1. INTRODUCTION

Nowadays, the demand for energy resources is increasing due to population growth, global warming, and environmental problems resulting from the use of non-renewable energy sources such as fossil fuels (Hassmann & Kühne, 1993; Nikolaidis & Poullikkas, 2017; Singh et al., 2015). For a green and clean future, suitable alternatives must be considered. In recent decades, renewable and clean energy sources, such as hydrogen energy, have attracted considerable attention from researchers (López Ortiz, Meléndez Zaragoza, & Collins-Martínez, 2016; Marbán & Valdés-Solís, 2007; Veziroğlu & Şahin, 2008). Among various methods, hydrogen can be produced through the hydrogen evolution reaction (HER) during electrolysis and water-splitting processes. To achieve highly efficient hydrogen production, the excess reaction energy (overpotential) must be reduced using appropriate electrocatalysts (Sayyar & Yousefzadeh, 2025).

Platinum and its compounds are recognized as efficient catalysts for HER but suffer from scarcity and high cost. Therefore, researchers have focused on cheaper and more abundant alternatives (D. Y. Li et al., 2021; Shi & Zhang, 2016; Voiry et al., 2018; Zhong et al., 2021; Zhou et al., 2016). Transition metal hydroxides have attracted attention due to their significant ability to chemically adsorb water molecules and break H–O–H bonds in alkaline environments, thereby facilitating the hydrogen evolution reaction (Danilovic et al., 2012; Xu, Jiang, Zhang, Hu, & Li, 2019). Nickel hydroxide ($Ni(OH)_2$) is one of the transition metal hydroxides used in this study to prepare

an electrocatalyst for HER (Danilovic et al., 2012). On the other hand, the combination of other active materials with nickel hydroxide can significantly enhance the adsorption and recombination of H_{ad} during the hydrogen evolution reaction. Platinum and other conductive materials, such as transition metal compounds, can be employed for this purpose (Deng, Wang, Nie, & Wei, 2017; Liu et al., 2023; Ruqia & Choi, 2018). Transition metal nitride and/or carbide compounds (MXenes), such as Ti_3C_2 , exhibit favorable metallic properties and high conductivity due to the presence of transition metals in their structure, which inherently improves electrocatalytic performance (Durairaj, Annamalai, Dhanalakshmi, & Ghosh, 2024; Tang et al., 2020; Xiao, Yan, Zhang, Yang, & Zhang, 2021). Therefore, it can be expected that a heterojunction of MXene and $Ni(OH)_2$ would enhance HER electrocatalytic performance.

In this study, nickel foam (NF) was used as a flexible, conductive, and porous substrate with a high surface-to-volume ratio. Nickel hydroxide nanoparticles were deposited via electrodeposition, and then titanium carbide MXene was coated using the electrophoretic deposition technique at different voltages and deposition times, resulting in the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF electrode. The physical and chemical characteristics, as well as the electrochemical properties related to HER activity, of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF electrode were investigated.

2. MATERIALS AND METHODS

First, a piece of nickel foam ($0.5 \times 2 \text{ cm}^2$) was cleaned in a hydrochloric acid solution. To deposit



nickel hydroxide on the cleaned nickel foam, a 0.1 M nickel nitrate hexahydrate solution was used as the electrolyte, and the deposition process was carried out using an electroanalyzer (SAMA 500) in a three-electrode electrochemical cell consisting of a platinum electrode (counter electrode), an Ag/AgCl electrode (reference electrode), and a nickel foam substrate (working electrode). Cyclic voltammetry (CV) analysis was performed over a potential range of -0.2 to 1.2 V versus the reversible hydrogen electrode (RHE) at a scan rate of 0.005 V/s for three cycles.

To prepare the titanium carbide MXene suspension, 0.06 g of bulk titanium carbide powder was added to 20 mL of DI water and ultrasonicated in a bath sonicator for 90 min. Subsequently, the suspension was exposed to ultrasonic waves using a probe sonicator (300 W) for 25 min, resulting in a titanium carbide MXene suspension with a concentration of 3 mg/mL.

For the deposition of Ti_3C_2 MXene on the $Ni(OH)_2/NF$ electrode, the platinum electrode and the $Ni(OH)_2/NF$ electrode were placed in the Ti_3C_2 MXene suspension at a distance of 1 cm from each other and connected to the negative and positive terminals of the power supply, respectively. By applying voltages of 1, 3, and 5 V for durations of 10, 20, and 30 min, the negatively charged Ti_3C_2 MXene suspension was deposited onto the $Ni(OH)_2/NF$ electrode. In the electrophoretic deposition technique, the applied voltage between the $Ni(OH)_2/NF$ electrode and the platinum electrode accelerated the Ti_3C_2 MXene particles in the direction opposite to the electric field, resulting in their deposition onto the $Ni(OH)_2/NF$ electrode.

The morphology of the prepared electrodes was investigated using a field emission scanning electron microscope (FESEM) (FEI-QUANTA-200). In addition, elemental mapping analysis was performed to identify the elements present in the fabricated electrodes. Furthermore, attenuated total reflection infrared spectroscopy (ATR) was conducted using an Invenio-S to determine the chemical composition of the materials. The crystalline structure of the prepared electrodes was studied by X-ray diffraction (XRD) (Bruker, D8-Advance).

The performance of the synthesized electrodes in the hydrogen evolution reaction was evaluated through electrochemical measurements using an electroanalyzer (SAMA 500) in a three-electrode cell consisting of a platinum electrode as the counter electrode, a Hg/HgCl electrode as the reference electrode, and the fabricated electrodes as the working electrodes. A 1 M KOH solution was used as the electrolyte, and all measurements were conducted at room temperature. Linear sweep voltammetry (LSV) analysis was performed over a potential range of 0.1 to -0.4 V vs. RHE at a scan rate of 0.005 V/s. Moreover, the LSV technique was used to investigate the stability of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode after 500 cycles of cyclic voltammetry.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Based on the results, the nickel foam was porous, and the surface of its branches was relatively smooth and uncoated. Due to its corrosion resistance, metallic properties, electrical conductivity, suitable mechanical

properties, and porous structure with a high surface-to-volume ratio, it served as an appropriate substrate for the deposition of electrocatalysts in alkaline media ([Gong, Wang, Chen, Hwang, & Dai, 2016](#)). The SEM images of the $Ni(OH)_2/NF$ electrode showed that the surface of the nickel foam, compared to its initial state, was covered with nanoclusters of $Ni(OH)_2$ nanoparticles, which created porosity on the branches of the NF and increased the surface-to-volume ratio ([Gu et al., 2020](#)).

On the other hand, the SEM images of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode indicated that the presence of Ti_3C_2 MXene formed cluster-like structures on the $Ni(OH)_2$ layer, further increasing the surface area and significantly contributing to effective contact between the electrode and the electrolyte during the electrocatalytic hydrogen evolution reaction ([Hu, Tian, Lin, & Wang, 2019](#)). To confirm the deposition of the Ti_3C_2 MXene layer on the $Ni(OH)_2/NF$ electrode, elemental mapping analysis was utilized. Based on the results for the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode, the carbon and titanium elements originated from Ti_3C_2 MXene, while nickel originated from both $Ni(OH)_2$ and the nickel foam substrate. The presence of Ni, O, Ti, and C in the elemental mapping analysis of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode provided further evidence of the successful deposition of Ti_3C_2 MXene on the $Ni(OH)_2/NF$ electrode.

According to the ATR spectrum of the $Ni(OH)_2/NF$ electrode, the peaks at wavenumbers of 436 and 638 cm^{-1} were attributed to the vibrations of Ni-O-H and Ni-O bonds. Additionally, the peak at a wavenumber of 1292 cm^{-1} corresponded to C-H and C-O functional groups. The peaks at 1508 and 1650 cm^{-1} were associated with N-O and C=C bonds, respectively, while the peaks at 3566 and 3620 cm^{-1} were related to O-H functional groups. These functional groups confirmed the presence of $Ni(OH)_2$ on the nickel foam ([Lokhande & Chavan, 2019](#)). Regarding the ATR spectrum of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode, the peaks at 582, 681, and 814 cm^{-1} arose from vibrations associated with Ni-O-H, Ni-O, Ti-O, and Ti-C chemical bonds. These results confirmed the chemical composition of Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ on the nickel foam ([Kadja et al., 2023](#)).

The XRD analysis of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrodes showed peaks at $2\theta = 44^\circ$ and 52° , corresponding to the Miller indices (111) and (002), respectively, originating from the nickel foam substrate with a face-centered cubic (FCC) structure ([Ahmed et al., 2022](#); [Mohammed & Chun, 2019](#)). In addition, the peaks at $2\theta = 18.36^\circ$ and 59.2° were related to the (001) and (110) planes of $Ni(OH)_2$. The peaks at $2\theta = 6.9^\circ$ and 26.9° were attributed to the characteristic (200) and (600) planes of Ti_3C_2 MXene in the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode, respectively ([Guo, Zhao, Liu, & Ma, 2019](#)).

The electrocatalytic activity of the electrodes was investigated by linear sweep voltammetry analysis at a scan rate of 0.005 V/s. Figures 1 and 2 show the polarization curves of the Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ electrode at different deposition voltages and times. The experiments indicated that increasing the deposition time and voltage during the electrophoretic deposition process resulted in a greater amount of Ti_3C_2 MXene

being deposited on the Ni(OH)₂/NF electrode. However, under certain conditions, the deposited Ti₃C₂ MXene formed clusters that could detach from the surface. Therefore, determining the optimal deposition time and voltage for the electrophoretic deposition of Ti₃C₂ MXene was essential.

Figure 1 illustrates the effect of deposition voltage on the electrochemical properties of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode in HER. The overpotentials at a current density of -10 mA/cm² for the synthesized Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode prepared at voltages of 1, 3, and 5 V with a deposition time of 20 min were approximately -0.262, -0.241, and -0.272 V vs. RHE, respectively. The results indicated that the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode prepared at 3 V exhibited the lowest overpotential among the samples. Moreover, to determine the optimal deposition time, the Ni(OH)₂/NF electrode was coated at a voltage of 3 V for deposition times of 10, 20, and 30 min (Figure 2). The overpotentials of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode at a current density of -10 mA/cm² for deposition times of 10, 20, and 30 min were approximately -0.262, -0.241, and -0.239 V vs. RHE, respectively. Based on these results, the optimal deposition conditions were determined to be 30 min at 3 V. Owing to its metallic properties and high electrical conductivity, Ti₃C₂ MXene facilitated electron and ion transfer, thereby improving electrocatalytic performance. Furthermore, its porous structure, high surface-to-volume ratio, and high electrical conductivity made the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode a promising candidate for the hydrogen evolution reaction.

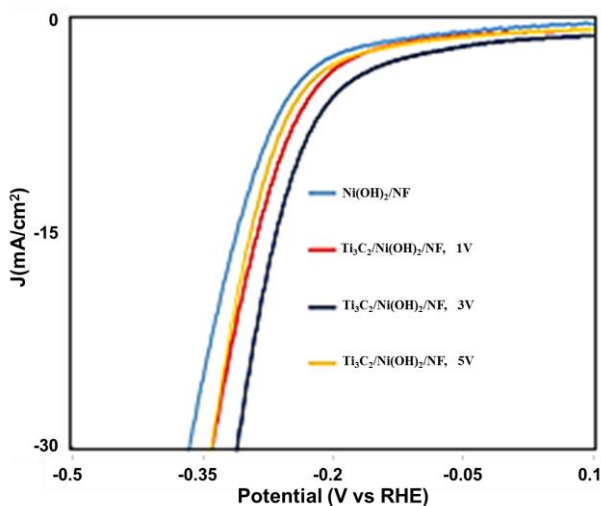


Figure 1. Polarization curve of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode at different deposition voltages of 1, 3 and 5 V.

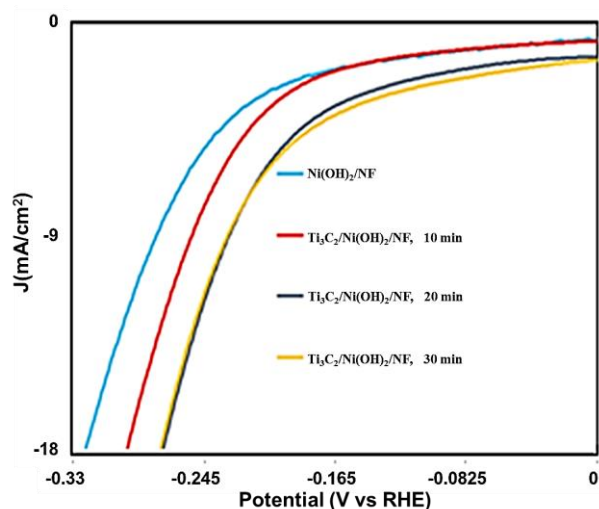


Figure 2. Polarization curve of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode at different deposition times of 10, 20, and 30 min.

Figure 3 shows the polarization curves of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode before and after 500 cycles. The overpotentials obtained before and after 500 cycles were -0.254 and -0.215 V vs. RHE, respectively. The results indicated good stability of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode. The observed improvement after 500 cycles was attributed to enhanced electrode/electrolyte contact and improved penetration of water molecules to the surface of the electrocatalytic materials within the porous electrode structure.

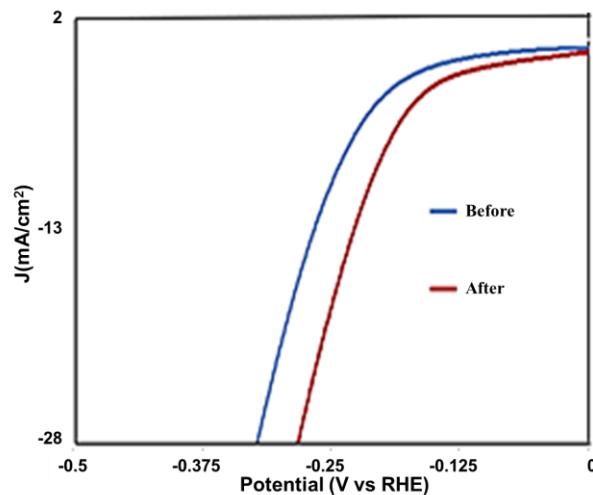


Figure 3. Stability of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode, deposited at deposition voltage of 3V and time of 30 min, before and after 500 cycles.

Based on the results, the Ti₃C₂ MXene in the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode facilitated electron transport through the Ni(OH)₂ nanoparticles due to its high electrical conductivity. In addition, the porous structure of the Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode improved electrode/electrolyte contact, provided more active sites, and enhanced HER electrocatalytic activity (Liu et al., 2023). Moreover, the investigation of the applied voltage and deposition time during the electrophoretic deposition of Ti₃C₂ MXene showed that the highest HER efficiency was achieved at 3 V and 30

min. These results demonstrated the important role of the applied voltage and deposition time in the electrophoretic deposition of electrocatalytic materials for achieving a suitable and efficient surface for water splitting and the hydrogen evolution reaction.

4. CONCLUSIONS

In summary, the Ni(OH)₂/NF electrode was prepared by electrodeposition of Ni(OH)₂ nanoparticles onto the NF substrate, followed by the deposition of Ti₃C₂ MXene on the Ni(OH)₂/NF electrode at different voltages and deposition times. The results demonstrated the effect of deposition time and voltage on HER efficiency, which was attributed to the efficient electron transport pathway between Ti₃C₂ MXene and Ni(OH)₂, as well as the increased number of active sites. The synthesized Ti₃C₂ MXene/Ni(OH)₂/NF electrode prepared at a deposition voltage of 3 V and a deposition time of 30 min exhibited an overpotential of 0.239 V vs. RHE and demonstrated good stability.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Research and Technology Council of Sahand University of Technology.

REFERENCES

- Ahmed, M., Lakhani, M. N., Shar, A. H., Zehra, I., Hanan, A., Ali, I., Wang, J. (2022). Electrochemical performance of grown layer of Ni(OH)₂ on nickel foam and treatment with phosphide and selenide for efficient water splitting. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(1), 100281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100281>
- Danilovic, N., Subbaraman, R., Strmcnik, D., Chang, K.-C., Paulikas, A. P., Stamenkovic, V. R., & Markovic, N. M. (2012). Enhancing the alkaline hydrogen evolution reaction activity through the bifunctionality of Ni(OH)₂/metal catalysts. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(50), 12495-12498. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.201204842>
- Deng, Z., Wang, J., Nie, Y., & Wei, Z. (2017). Tuning the interface of Ni@Ni(OH)₂/Pd/rGO catalyst to enhance hydrogen evolution activity and stability. *Journal of Power Sources*, 352, 26-33. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.111>
- Durairaj, S., Annamalai, P., Dhanalakshmi, R., & Ghosh, D. (2024). Advances and outlook of Ti₃C₂-based catalysts for electrocatalytic hydrogen production: A comprehensive overview. *Energy & Fuels*, 38(21), 20258-20284. doi:[10.1021/acs.energyfuels.4c03966](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03966)
- Gong, M., Wang, D.-Y., Chen, C.-C., Hwang, B.-J., & Dai, H. (2016). A mini review on nickel-based electrocatalysts for alkaline hydrogen evolution reaction. *Nano Research*, 9(1), 28-46. doi:[10.1007/s12274-015-0965-x](https://doi.org/10.1007/s12274-015-0965-x)
- Gu, Y., Wang, Y., Shi, J., Yang, M., Rui, Y., An, W., & Men, Y. (2020). Well-dispersed Pt nanodots interfaced with Ni(OH)₂ on anodized nickel foam for efficient hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), 27067-27077. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.047>
- Guo, J., Zhao, Y., Liu, A., & Ma, T. (2019). Electrostatic self-assembly of 2D delaminated MXene (Ti₃C₂) onto Ni foam with superior electrochemical performance for supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 305, 164-174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.025>
- Hassmann, K., & Kühne, H. M. (1993). Primary energy sources for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18(8), 635-640. doi:[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90115-Q](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90115-Q)
- Hu, X., Tian, X., Lin, Y.-W., & Wang, Z. (2019). Nickel foam and stainless steel mesh as electrocatalysts for hydrogen evolution reaction, oxygen evolution reaction and overall water splitting in alkaline media. *RSC Advances*, 9(54), 31563-31571. doi:[10.1039/C9RA07258F](https://doi.org/10.1039/C9RA07258F)
- Kadja, G. T. M., Natalya, S. A. C., Balqis, F., Azhari, N. J., Nurdini, N., Sumboja, A., Irkham. (2023). Gold nanoparticles-supported Ti₃C₂ MXene nanosheets for enhanced electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 36, 101059. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2023.101059>
- Li, D. Y., Liao, L. L., Zhou, H. Q., Zhao, Y., Cai, F. M., Zeng, J. S., Yu, F. (2021). Highly active non-noble electrocatalyst from Co₂P/Ni₂P nanohybrids for pH-universal hydrogen evolution reaction. *Materials Today Physics*, 16, 100314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100314>
- Liu, X., Wang, L., Ji, S., Linkov, V., Fu, Q., Li, Z., & Wang, H. (2023). Modulating surface electron density of Ni(OH)₂ nanosheets with longitudinal Ti₃C₂T_x MXene nanosheets by Schottky effect toward enhanced hydrogen evolution reaction. *Dalton Transactions*, 52(28), 9721-9730. doi:[10.1039/D3DT01428B](https://doi.org/10.1039/D3DT01428B)
- Lokhande, P. E., & Chavan, U. S. (2019). Nanostructured Ni(OH)₂/rGO composite chemically deposited on Ni foam for high performance of supercapacitor applications. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(1), 52-56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.10.003>
- López Ortiz, A., Meléndez Zaragoza, M. J., & Collins-Martínez, V. (2016). Hydrogen production research in Mexico: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(48), 23363-23379. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.004>
- Marbán, G., & Valdés-Solis, T. (2007). Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(12), 1625-1637. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.12.017>
- Mohammed, M. M. M., & Chun, D.-M. (2019). Deposition of Ni(OH)₂ on nickel substrate using vacuum kinetic spray and its application to high-performance supercapacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(18), 17481-17490. doi:[10.1007/s10854-019-02098-y](https://doi.org/10.1007/s10854-019-02098-y)
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Ruqia, B., & Choi, S.-I. (2018). Pt and Pt-Ni(OH)₂ electrodes for the hydrogen evolution reaction in alkaline electrolytes and their nanoscaled electrocatalysts. *ChemSusChem*, 11(16), 2643-2653. doi:<https://doi.org/10.1002/cssc.201800781>
- Sayyar, S., & Yousefzadeh, S. (2025). Hydrothermally synthesized binder-free nickel oxide (NiO) with different morphologies on nickel foam in hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 162, 150498. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150498>
- Shi, Y., & Zhang, B. (2016). Recent advances in transition metal phosphide nanomaterials: synthesis and applications in hydrogen evolution reaction. *Chemical Society Reviews*, 45(6), 1529-1541. doi:[10.1039/C5CS00434A](https://doi.org/10.1039/C5CS00434A)
- Singh, S., Jain, S., Ps, V., Tiwari, A. K., Nouni, M. R., Pandey, J. K., & Goel, S. (2015). Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 623-633. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>
- Tang, R., Xiong, S., Gong, D., Deng, Y., Wang, Y., Su, L., Liao, C. (2020). Ti₃C₂ 2D MXene: Recent progress and perspectives in photocatalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(51), 56663-56680. doi:[10.1021/acsami.0c12905](https://doi.org/10.1021/acsami.0c12905)
- Veziroglu, T. N., & Şahi'n, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49(7), 1820-1831. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.015>
- Voiry, D., Chhowalla, M., Gogotsi, Y., Kotov, N. A., Li, Y., Penner, R. M., Weiss, P. S. (2018). Best Practices for Reporting

- Electrocatalytic Performance of Nanomaterials. *ACS Nano*, 12(10), 9635-9638. doi:[10.1021/acsnano.8b07700](https://doi.org/10.1021/acsnano.8b07700)
25. Xiao, W., Yan, D., Zhang, Y., Yang, X., & Zhang, T. (2021). Heterostructured MoSe₂/oxygen-terminated Ti₃C₂ MXene architectures for efficient electrocatalytic hydrogen evolution. *Energy & Fuels*, 35(5), 4609-4615. doi:[10.1021/acs.energyfuels.1c00123](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00123)
 26. Xu, Q., Jiang, H., Zhang, H., Hu, Y., & Li, C. (2019). Heterogeneous interface engineered atomic configuration on ultrathin Ni(OH)₂/Ni₃S₂ nanoforests for efficient water splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 242, 60-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.09.064>
 27. Zhong, W., Xiao, B., Lin, Z., Wang, Z., Huang, L., Shen, S., Gu, L. (2021). RhSe₂: A superior 3D electrocatalyst with multiple active facets for hydrogen evolution reaction in both acid and alkaline solutions. *Advanced Materials*, 33(9), 2007894. doi:<https://doi.org/10.1002/adma.202007894>
 28. Zhou, W., Jia, J., Lu, J., Yang, L., Hou, D., Li, G., & Chen, S. (2016). Recent developments of carbon-based electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *Nano Energy*, 28, 29-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.08.027>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

لایه‌نشانی الکتروفوریتیک کنترل‌شده‌ی مکسین Ti_3C_2 بر روی $Ni(OH)_2/NF$ برای بهبود واکنش تولید هیدروژن

نازلی مروتی شریفی^۱، سمیرا یوسف‌زاده^{۲*}^۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران^۲ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده در این پژوهش، ابتدا نانوذرات هیدروکسید نیکل از طریق روش الکتروپازیشن بر روی فوم نیکل (NF) لایه‌نشانی شدند. سپس، مکسین کربید تیتانیوم (Ti_3C_2) با استفاده از تکنیک الکتروفوریتیک در ولتاژهای مختلف (۱، ۳ و ۵ ولت) و زمان‌های متفاوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) بر روی آن پوشش داده شد و در نهایت الکتروکاتالیزور Ti_3C_2/NF نانویی متخلخل الکتروکاتالیزور Ti_3C_2/NF ساخته شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FESEM) نشان‌دهنده‌ی ساختار پراش پرتو ایکس (XRD) ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری الکتروکاتالیزور ساخته شده را تأیید کردند. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی نشان داد که بهینه‌ی شرایط لایه‌نشانی الکتروفوریتیک Ti_3C_2 ، ولتاژ ۳ ولت و زمان ۳۰ دقیقه است که بهترین عملکرد را در واکنش تولید هیدروژن (HER) از خود نشان می‌دهد. این پژوهش الکتروکاتالیزور Ti_3C_2/NF را به‌عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای الکتروکاتالیست‌های گران‌قیمت و کمیاب مبتنی بر فلزات نجیب معرفی می‌کند و تأثیر ولتاژ و زمان لایه‌نشانی الکتروفوریتیک مکسین Ti_3C_2 بر فعالیت HER این الکتروکاتالیزور را به‌خوبی نشان می‌دهد.

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

پذیرش قطعی: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

کلیدواژه‌ها:

نانوذرات هیدروکسید نیکل،

مکسین کربید تیتانیوم،

الکتروفوریتیک،

واکنش تولید هیدروژن

<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.547527.1347>URL: https://www.jamt.ir/article_245790.html

۱- مقدمه

از میان روش‌های مختلف تولید هیدروژن، واکنش تولید هیدروژن^۱ (HER) در فرایند الکتروکاتالیز و شکافت آب یکی از مهم‌ترین راه‌ها به شمار می‌رود. برای دستیابی به تولید هیدروژن با بازدهی بالا لازم است انرژی اضافی واکنش (پتانسیل مازاد)^۲ با استفاده از الکتروکاتالیست‌های مناسب کاهش یابد (Sayyar & Yousefzadeh, 2025).

پلاتین و ترکیبات آن کارآمدترین کاتالیست‌ها در HER شناخته می‌شوند، اما کمیابی و هزینه‌ی بالای آن‌ها مانع بزرگی است. به همین دلیل، پژوهشگران به دنبال جایگزین‌های ارزان‌تر و فراوان‌تر هستند (Li et al., 2021; Shi & Zhang, 2016;)

در حال حاضر، با افزایش جمعیت، گرمایش جهانی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از منابع انرژی غیرقابل تجدید مانند سوخت‌های فسیلی، نیاز به منابع انرژی روزبه‌روز در حال افزایش است (Hassmann & Kühne, 1993; Nikolaidis & Singh et al., 2015; Poullikkas, 2017). برای دستیابی به آینده‌ای سبز و پاک باید جایگزین‌های مناسبی در نظر گرفته شوند. در دهه‌های اخیر، منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک مانند انرژی هیدروژن توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است (López Ortiz et al., 2016; Marbán & Valdés-Solís, 2007;)

1. Hydrogen evolution reaction
2. Overpotential

*عهده‌دار مکاتبات: سمیرا یوسف‌زاده

نشانی: ایران، آذربایجان شرقی، سهند، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده‌ی علوم پایه

پیام‌نگار: Yousefzadeh@sut.ac.ir

حاصل شد (Liu et al., 2023). علاوه بر تأثیر ولتاژ اعمال شده در الکتروفوریتیک، عامل دیگری مانند زمان لایه‌نشانی نیز نقش مهمی در نتایج ایفا می‌کند (Ruqia & Choi, 2018; Barajas et al., 2018). براساس اطلاعات ما، تاکنون هیچ مطالعه‌ای به بررسی هم‌زمان اثر ولتاژ و زمان اعمال شده بر بازدهی HER الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF لایه‌نشانی شده به روش الکتروفوریتیک نپرداخته است.

در این پژوهش از فوم نیکل (NF) به‌عنوان بستری انعطاف‌پذیر، رسانا و متخلخل با نسبت سطح به حجم بالا استفاده شد. ابتدا نانوذرات هیدروکسید نیکل از طریق الکتروپازیشن لایه‌نشانی شدند و سپس مکسین کربید تیتانیوم (Ti_3C_2) با روش الکتروفوریتیک در ولتاژها و زمان‌های مختلف پوشش داده شد تا الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF حاصل شود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و خواص الکتروشیمیایی این الکتروکاتالیست HER بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

پودر مکسین Ti_3C_2 و فوم نیکل از شرکت ردوکس کالا و نیترات نیکل هگزا هیدرات ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) و اسید هیدروکلریک (HCl) از شرکت مرک تهیه شد.

۲-۲- آماده‌سازی الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2$ /NF

ابتدا قطعاتی از فوم نیکل به ابعاد 2×0.5 سانتی‌متر مربع برش داده شد. برای تمیز کردن، فوم نیکل به مدت ۳ دقیقه در محلول اسید هیدروکلریک و آب دی‌یونیزه با نسبت حجمی ۱:۳ غوطه‌ور شد. سپس، فوم نیکل به مدت ۱۰ دقیقه در آب دی‌یونیزه اولتراسونیک شد. این مرحله با اتانول و استون نیز تکرار شد و در نهایت فوم نیکل در دمای اتاق خشک شد.

برای نشان دادن نیترات نیکل روی فوم نیکل تمیز شده از محلول ۰/۱ مولار نیترات نیکل هگزا هیدرات به‌عنوان الکتروکاتالیست استفاده شد. فرایند لایه‌نشانی با دستگاه الکتروآنالایزر (SAMA 500) در یک سلول الکتروشیمیایی سه‌الکترودی انجام شد که شامل الکتروکاتالیست پلاتین (الکتروکاتالیست کمکی)، الکتروکاتالیست مرجع $Ag/AgCl$ و فوم نیکل به‌عنوان الکتروکاتالیست کار بود. آنالیز ولتامتری چرخه‌ای (CV) در بازه‌ی پتانسیل ۰/۲- تا ۱/۲ ولت نسبت به الکتروکاتالیست هیدروژن برگشت‌پذیر (RHE) با سرعت روبش ۰/۰۰۵ ولت بر

(Voiry et al., 2018; Zhong et al., 2021; Zhou et al., 2016). هیدروکسیدهای فلزات واسطه، به دلیل توانایی بالای خود در جذب شیمیایی مولکول‌های آب و شکستن پیوندهای HO-H در محیط‌های قلیایی که باعث تسهیل واکنش تولید هیدروژن می‌شود، مورد توجه قرار گرفته‌اند (Danilovic et al., 2012; Xu et al., 2019). هیدروکسید نیکل ($Ni(OH)_2$) یکی از این هیدروکسیدهای فلز واسطه است که در این پژوهش برای ساخت الکتروکاتالیست HER به کار گرفته شد. در ۲۰۱۲، اصلاح سطح الکتروکاتالیست فلزی مختلف مانند نیکل با هیدروکسید نیکل برای واکنش تولید هیدروژن در محیط قلیایی استفاده شد. نتایج نشان داد که نانوحوشه‌های $Ni(OH)_2$ باعث بهبود چهاربرابری واکنش تولید هیدروژن شدند. این پژوهش کاتالیستی مناسب و مقرون‌به‌صرفه برای واکنش تولید هیدروژن معرفی کرد (Danilovic et al., 2012). از سوی دیگر، ترکیب مواد فعال دیگر با هیدروکسید نیکل به‌طور قابل توجهی جذب و باز ترکیب اتم‌های هیدروژن جذب شده (H_{ad}) را در واکنش تولید هیدروژن افزایش می‌دهد. موادی مانند پلاتین یا مواد رسانای دیگر از جمله ترکیبات فلزات واسطه قابل استفاده هستند (Deng et al., 2017; Liu et al., 2023; Ruqia & Choi, 2018).

ترکیبات نیتريد یا کربید فلزات واسطه (MXene) مانند Ti_3C_2 ، به دلیل داشتن فلز واسطه در ساختار خود، خواص فلزی و رسانایی الکتریکی مطلوبی از خود نشان می‌دهند که به‌طور ذاتی عملکرد الکتروکاتالیستی را بهبود می‌بخشد (Durairaj et al., 2024; Tang et al., 2020; Xiao et al., 2021). مواد MXene با حذف لایه‌ی A از ساختار لایه‌ای فازهای $M_{n+1}AX_n$ (فاز MAX) (که در آن $n=1, 2, 3$ ، M, A و X به ترتیب فلز واسطه، عناصر گروه IIIA یا IVA و کربن یا نیتروژن هستند) به دست می‌آیند (Feng et al., 2017; Tang et al., 2020). انتظار می‌رود که اتصال ناهمگون بین MXene و $Ni(OH)_2$ عملکرد الکتروکاتالیستی HER را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد.

در ۲۰۲۳، لیو و همکاران با روش الکتروفوریتیک نانوصفحات $Ti_3C_2T_x$ MXene را روی نانوصفحات $Ni(OH)_2/NF$ در ولتاژهای مختلف نشان دادند و بهترین الکتروکاتالیست HER با پتانسیل مازاد ۶۶ میلی‌ولت در چگالی جریان ۱۰- میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در ولتاژ الکتروفوریتیک ۳ ولت

دستگاه، آنالیز نقشه‌ی رنگی عنصری (Elemental color mapping) برای شناسایی عناصر موجود در الکترودهای ساخته‌شده انجام شد. برای تعیین ترکیب شیمیایی مواد، طیف‌سنجی فرورسرخ بازتاب کامل تضعیف‌شده (ATR) با دستگاه Invenio-S به کار گرفته شد. ساختار بلوری الکترودهای تهیه‌شده نیز با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD) (Bruker D8-Advance) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-۶- اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی

عملکرد الکترودهای ساخته‌شده در واکنش تولید هیدروژن (HER) با استفاده از دستگاه الکتروآنالیزر (SAMA 500) در یک سلول سه‌الکترودی ارزیابی شد. این سلول شامل الکترودهای پلاتین به‌عنوان الکترودهای کمکی، الکترودهای Hg/HgCl₂ به‌عنوان الکترودهای مرجع و الکترودهای ساخته‌شده به‌عنوان الکترودهای کار بود. الکترولیت مورد استفاده محلول ۱ مولار KOH و تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شد.

آنالیز ولتامتری روبشی خطی (LSV) در بازه‌ی پتانسیل ۰/۱- تا ۰/۴- ولت نسبت به الکترودهای هیدروژن برگشت‌پذیر (RHE) با سرعت روبش ۰/۰۵ ولت بر ثانیه انجام شد. همچنین، برای بررسی پایداری الکترودهای Ti_3C_2 MXene/Ni(OH)₂/NF پس از ۵۰۰ سیکل ولتامتری چرخه‌ای دوباره از تکنیک LSV استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر SEM سطح فوم نیکل خالص و الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$ را نشان می‌دهد. براساس تصاویر شکل ۱ (الف) و (ب)، فوم نیکل ساختاری متخلخل دارد و سطح هریک از شاخه‌های آن نسبتاً صاف و بدون پوشش است. فوم نیکل به دلیل مقاومت به خوردگی، خواص فلزی، رسانایی الکتریکی مناسب، خواص مکانیکی مطلوب و ساختار متخلخل با نسبت سطح به حجم بالا بستری بسیار مناسب برای نشان دادن الکتروکاتالیست‌ها در محیط قلیایی به شمار می‌رود (Gong et al., 2016).

تصاویر SEM الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$ (شکل ۲ (ج و د)) نشان می‌دهد که سطح فوم نیکل در مقایسه با فوم نیکل بدون پوشش با نانوخوشه‌هایی از نانوذرات $Ni(OH)_2$ پوشیده شده است. این نانوخوشه‌ها باعث ایجاد تخلخل بیشتر روی شاخه‌های فوم نیکل و افزایش قابل توجه نسبت سطح به حجم

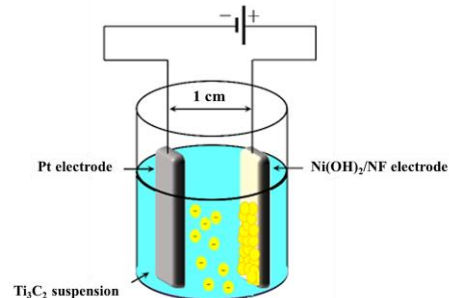
ثانیه به مدت ۳ سیکل انجام شد.

۲-۳- آماده‌سازی سوسپانسیون مکسین Ti_3C_2

برای تهیه‌ی سوسپانسیون مکسین کربید تیتانیوم، ۰/۰۶ گرم پودر کربید تیتانیوم بالک به ۲۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه اضافه و به مدت ۹۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار گرفت. سپس، سوسپانسیون به مدت ۲۵ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک پروبی (با توان ۳۰۰ وات) قرار گرفت تا سوسپانسیون مکسین کربید تیتانیوم با غلظت ۳ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر حاصل شود.

۲-۴- آماده‌سازی الکترودهای Ti_3C_2 MXene/Ni(OH)₂/NF

برای نشان دادن مکسین Ti_3C_2 روی الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$ ، الکترودهای پلاتین و الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$ با فاصله‌ی یک سانتی‌متر در داخل سوسپانسیون مکسین Ti_3C_2 قرار گرفتند و به ترتیب به قطب منفی و مثبت منبع تغذیه متصل شدند. با اعمال ولتاژهای ۱، ۳، ۵ و ۱۰ ولت به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه، ذرات مکسین Ti_3C_2 دارای بار منفی به سمت الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$ (قطب مثبت) حرکت کردند و روی آن لایه‌نشانی شدند. گفتنی است که سطح مکسین Ti_3C_2 به دلیل وجود گروه‌های عاملی -OH، -O و -F دارای بار منفی است (Asen et al., 2022; Li et al., 2018). در روش الکتروفوریتیک، ولتاژ اعمال‌شده باعث شتاب‌گیری ذرات مکسین Ti_3C_2 در جهت مخالف میدان الکتریکی و لایه‌نشانی آن‌ها روی الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$ می‌شود (شکل ۱). پس از لایه‌نشانی، الکترودهای پوشش‌داده‌شده برای انجام مشخصه‌یابی و آزمون‌های الکتروشیمیایی در دمای اتاق خشک شدند.



شکل ۱. شماتیک فرایند رسوب الکتروفوریتیک مکسین

Ti_3C_2 روی الکترودهای $Ni(OH)_2/NF$

۲-۵- شناسایی و آنالیز مواد

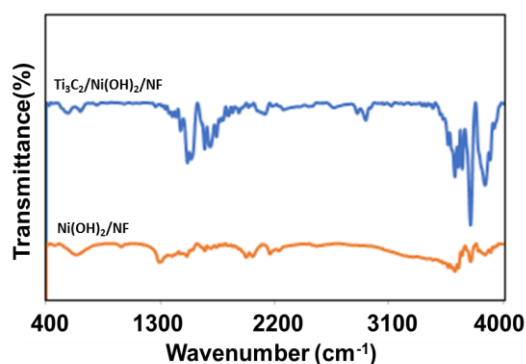
ریخت‌شناسی الکترودهای تهیه‌شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) (FEI-QUANTA-200) بررسی شد. همچنین، با استفاده از این

می‌شوند (Gu et al., 2020).

روی Ni(OH)_2 از آنالیز نقشه‌ی رنگی عنصری استفاده شد. نتایج این آنالیز در شکل ۳ برای الکتروُد Ti_3C_2 و تیتانیوم از Ti_3C_2 و عنصر نیکل از Ni(OH)_2 و فوم نیکل نشئت گرفته‌اند. وجود هم‌زمان عناصر Ni، O، Ti و C در آنالیز نقشه‌ی رنگی عنصری الکتروُد $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ شواهد محکمی دال بر نشانیدن موفق مکسین Ti_3C_2 روی الکتروُد $\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ ارائه می‌دهد.

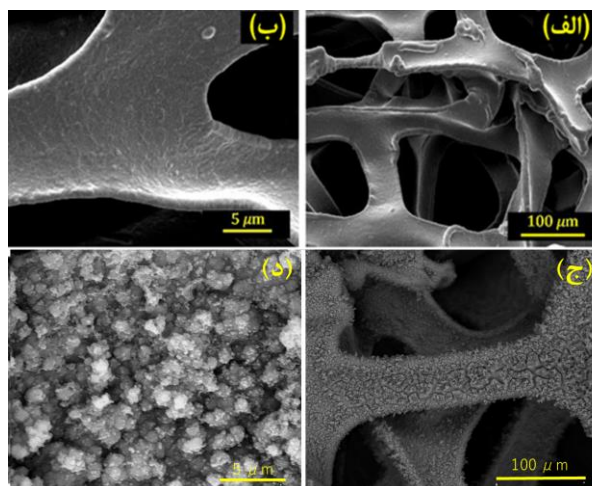
برای بررسی ساختار شیمیایی الکتروُد های تهیه‌شده از آنالیز ATR استفاده شد (شکل ۴). براساس طیف ATR الکتروُد $\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ ، پیک‌های موجود در عدد موج‌های ۴۳۶ و ۶۳۸ بر سانتی‌متر هر دو به ارتعاشات پیوندهای Ni-O-H و Ni-O نسبت داده می‌شوند. همچنین، پیک در عدد موج ۱۲۹۲ بر سانتی‌متر مربوط به گروه‌های عاملی C-H و C-O است. پیک‌های ۱۵۰۸ و ۱۶۵۰ بر سانتی‌متر به ترتیب به پیوندهای N-O و C=C و پیک‌های ۳۵۶۶ و ۳۶۲۰ بر سانتی‌متر به گروه‌های عاملی O-H مرتبط هستند. وجود این گروه‌های عاملی حضور Ni(OH)_2 بر روی فوم نیکل را تأیید می‌کند (Lokhande & Chavan, 2019).

درباره‌ی طیف ATR مربوط به الکتروُد $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ ، پیک‌های مشاهده‌شده در ۵۸۲، ۶۸۱ و ۸۱۴ بر سانتی‌متر ناشی از ارتعاشات مربوط به پیوندهای شیمیایی Ni-O، Ni-O-H، Ti-O و Ti-C هستند. این نتایج ترکیب شیمیایی $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ روی فوم نیکل را تأیید می‌کنند (Kadja et al., 2023).



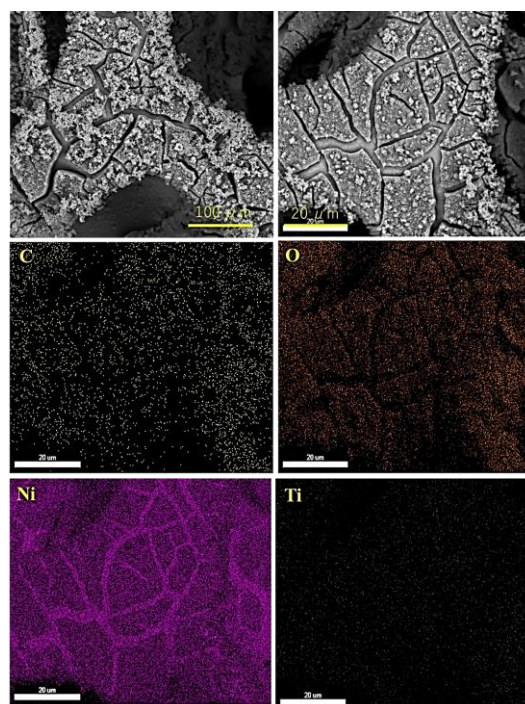
شکل ۴. طیف ATR الکتروُد های Ti_3C_2 و $\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$

$\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ لایه‌نشانی شده در ولتاژ ۳ ولت و زمان ۳۰ ساختار بلوری الکتروُد های تهیه‌شده با استفاده از آنالیز XRD بررسی شد. شکل ۵ نتایج آنالیز XRD الکتروُد Ti_3C_2

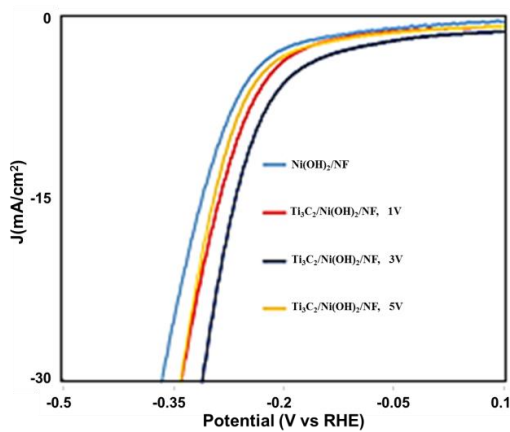


شکل ۲. تصاویر SEM (الف و ب) فوم نیکل (NF) و (ج و د) الکتروُد $\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$

از سوی دیگر، تصاویر SEM الکتروُد $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ در شکل ۳ نشان می‌دهد که حضور مکسین Ti_3C_2 باعث تشکیل سطوح خوشه‌مانند روی لایه‌ی Ni(OH)_2 شده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای سطح مؤثر را افزایش داده است. این امر تماس مؤثر بین الکتروُد و الکترولیت را در فرایند الکتروکاتالیستی واکنش تولید هیدروژن به‌شدت بهبود می‌بخشد (Hu et al., 2019).



شکل ۳. تصاویر SEM و آنالیز نقشه‌ی رنگی عنصری الکتروُد $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ni(OH)}_2/\text{NF}$ که به روش الکتروفوریتیک در ولتاژ ۳ ولت و زمان ۳۰ دقیقه لایه‌نشانی شده است برای تأیید لایه‌نشانی موفقیت‌آمیز لایه‌ی مکسین Ti_3C_2



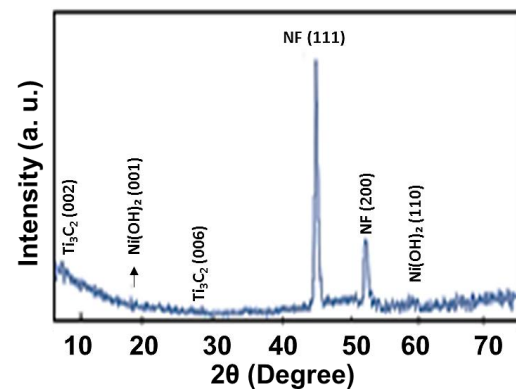
شکل ۶. منحنی پلاریزاسیون الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF در ولتاژهای لایه‌نشانی مختلف ۱، ۳ و ۵ ولت

شکل ۶ تأثیر ولتاژ لایه‌نشانی بر خواص الکتروشیمیایی الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF در واکنش HER را نشان می‌دهد. پتانسیل مازاد در چگالی جریان 10 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع برای الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF در ولتاژهای ۱، ۳ و ۵ ولت و زمان لایه‌نشانی ۲۰ دقیقه تهیه شده بود به ترتیب حدود 0.262 ، 0.241 و 0.272 ولت نسبت به RHE به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF در ولتاژ ۳ ولت کمترین پتانسیل مازاد را در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارد.

علاوه بر این، برای تعیین زمان بهینه‌ی لایه‌نشانی، الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2$ /NF در ولتاژ ۳ ولت و زمان‌های لایه‌نشانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه پوشش داده شد (شکل ۷). پتانسیل مازاد الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF در چگالی جریان 10 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع برای زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه به ترتیب حدود 0.262 ، 0.241 و 0.239 ولت نسبت به RHE بود. براساس این نتایج، شرایط بهینه لایه‌نشانی ۳ ولت و ۳۰ دقیقه تعیین شد.

مکسین Ti_3C_2 ، به دلیل خواص فلزی و رسانایی الکتریکی بالای خود، انتقال سریع‌تر الکترون و یون را تسهیل می‌کند و در نتیجه عملکرد الکتروکاتالیستی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، ساختار متخلخل، نسبت سطح به حجم بالا و رسانایی الکتریکی زیاد، الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF را به کاندیدای مناسبی برای واکنش تولید هیدروژن تبدیل می‌کند.

$MXene/Ni(OH)_2/NF$ را نشان می‌دهد. پیک‌های موجود در 2θ برابر با 44 و 52 درجه به ترتیب مربوط به شاخص‌های میلر (111) و (002) هستند که از بستر فوم نیکل با ساختار مکعبی مرکز وجهی (FCC) نشئت می‌گیرند (Ahmed et al., 2022; Mohammed & Chun, 2019). همچنین، پیک‌های موجود در 2θ برابر با $18/36$ و $59/2$ درجه به صفحات (001) و (110) نیکل هیدروکسید $(Ni(OH)_2)$ مربوط می‌شوند. وجود پیک در 2θ برابر با $6/9$ و $26/9$ درجه به صفحات مشخصه‌ی Ti_3C_2 مکسین (600) و (200) در الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF نسبت داده می‌شوند (Guo et al., 2019).



شکل ۵. الگوی پراش XRD الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF که در ولتاژ ۳ ولت و زمان ۳۰ دقیقه لایه‌نشانی شده است

فعالیت الکتروکاتالیستی الکتروکاتالیست با انجام آنالیز ولتامتری روبشی خطی (LSV) با سرعت روبش 0.005 ولت بر ثانیه بررسی شد. شکل‌های ۶ و ۷ منحنی‌های پلاریزاسیون الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2$ /NF را در ولتاژها و زمان‌های مختلف لایه‌نشانی نشان می‌دهند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش زمان و ولتاژ لایه‌نشانی در تکنیک الکتروفوریتیک مقدار بیشتری از مکسین Ti_3C_2 را روی الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2$ /NF جذب می‌کند. با این حال، در شرایط خاصی، مکسین Ti_3C_2 جذب‌شده خوشه‌هایی تشکیل می‌دهند که ممکن است از سطح جدا شوند. بنابراین، تعیین زمان و ولتاژ بهینه لایه‌نشانی در الکتروفوریتیک Ti_3C_2 ضروری است.

الکتروکاتالیستی HER را ارتقا بخشید (Liu et al., 2023). علاوه بر این، بررسی تأثیر ولتاژ و زمان اعمال شده در لایه‌نشانی الکتروفوریتیک مکسین Ti_3C_2 نشان داد که بالاترین بازدهی HER در ولتاژ ۳ ولت و زمان ۳۰ دقیقه حاصل می‌شود. این نتایج نقش مهم ولتاژ و زمان اعمال شده در لایه‌نشانی الکتروفوریتیک مواد الکتروکاتالیستی را در دستیابی به سطحی مناسب و کارآمد برای شکافت آب و واکنش تولید هیدروژن برجسته می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری

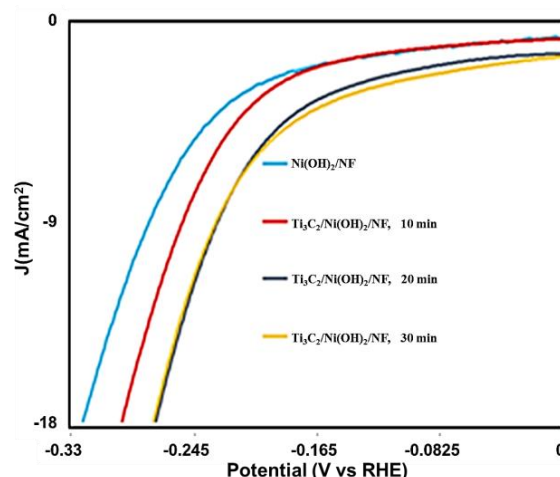
به‌طور خلاصه، الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2/NF$ با روش الکتروپازیشن نانوذرات $Ni(OH)_2$ روی بستر فوم نیکل (NF) تهیه شد و سپس مکسین Ti_3C_2 در ولتاژها و زمان‌های مختلف روی الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2/NF$ لایه‌نشانی شد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر زمان و ولتاژ بر بازدهی HER بود. بهبود نتایج الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2/NF$ نسبت به الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ ناشی از مسیر انتقال الکترون کارآمد بین مکسین Ti_3C_2 و $Ni(OH)_2$ و افزایش تعداد جایگاه‌های فعال است. الکتروکاتالیست ساخته شده Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ ، در شرایط لایه‌نشانی ۳ ولت و ۳۰ دقیقه، پتانسیل مازادی برابر با ۰/۲۳۹ ولت نسبت به RHE با پایداری مناسب از خود نشان داد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت شورای تحقیقات و فناوری دانشگاه صنعتی سهند انجام شد.

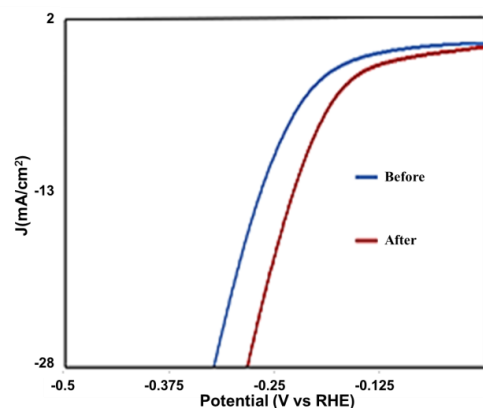
منابع

- Ahmed, M., Lakhan, M. N., Shar, A. H., Zehra, I., Hanan, A., Ali, I., & Wang, J. (2022). Electrochemical performance of grown layer of $Ni(OH)_2$ on nickel foam and treatment with phosphide and selenide for efficient water splitting. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(1), 100281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100281>
- Asen, P., Esfandiari, A., & Mehdipour, H. (2022). Urchin-like hierarchical ruthenium cobalt oxide nanosheets on $Ti_3C_2T_x$ MXene as a binder-free bifunctional electrode for overall water splitting and supercapacitors. *Nanoscale*, 14(4), 1347-1362. doi: [10.1039/D1NR07145A](https://doi.org/10.1039/D1NR07145A)
- Barajas, J., Lozano, L., Grimaldos, J., Güiza, V., & Blanco, S. (2018). Influence of process parameters on the electrophoretic deposition of zirconia nanoparticle coatings. *Journal of Physics: Conference Series*, 1119(1), 012015. doi: [10.1088/1742-6596/1119/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1119/1/012015)
- Danilovic, N., Subbaraman, R., Strmcnik, D., Chang, K.-C., Paulikas, A. P., Stamenkovic, V. R., & Markovic, N. M. (2012). Enhancing the alkaline hydrogen evolution reaction activity through the bifunctionality of $Ni(OH)_2$ /metal catalysts.



شکل ۷. منحنی پلاریزاسیون الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ در زمان‌های لایه‌نشانی مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه

شکل ۸. منحنی‌های پلاریزاسیون الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ را قبل و بعد از ۵۰۰ سیکل می‌دهد. پتانسیل مازاد به دست آمده قبل و بعد از ۵۰۰ سیکل به ترتیب ۰/۲۵۴ و ۰/۲۱۵ ولت نسبت به RHE بود. نتایج نشان داد که الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ پایداری خوبی از خود نشان می‌دهد. بهبود مشاهده شده پس از ۵۰۰ سیکل به تماس بهتر الکتروکاتالیست و نفوذ مولکول‌های آب بیشتر به سطح مواد الکتروکاتالیستی روی الکتروکاتالیست متخلخل نسبت داده می‌شود.



شکل ۸. پایداری الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ (لایه‌نشانی شده در ولتاژ ۳ ولت و زمان ۳۰ دقیقه) قبل و بعد از ۵۰۰ سیکل

بر اساس نتایج به دست آمده، Ti_3C_2 در الکتروکاتالیست $Ni(OH)_2/NF$ به دلیل رسانایی الکتریکی بالای خود، انتقال الکترون‌ها روی نانوذرات $Ni(OH)_2$ را تسهیل کرد. همچنین، ساختار متخلخل الکتروکاتالیست Ti_3C_2 MXene/ $Ni(OH)_2/NF$ تماس الکتروکاتالیست را بهبود بخشید، تعداد جایگاه‌های فعال را افزایش داد و فعالیت

19. Marbán, G., & Valdés-Solís, T. (2007). Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(12), 1625-1637. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.12.017>
20. Mohammed, M. M. M., & Chun, D. M. (2019). Deposition of Ni(OH)₂ on nickel substrate using vacuum kinetic spray and its application to high-performance supercapacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(18), 17481-17490. doi: [10.1007/s10854-019-02098-y](https://doi.org/10.1007/s10854-019-02098-y)
21. Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
22. Ruqia, B., & Choi, S. I. (2018). Pt and Pt-Ni(OH)₂ electrodes for the hydrogen evolution reaction in alkaline electrolytes and their nanoscaled electrocatalysts. *ChemSusChem*, 11(16), 2643-2653. doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.201800781>
23. Sayyar, S., & Yousefzadeh, S. (2025). Hydrothermally synthesized binder-free nickel oxide (NiO) with different morphologies on nickel foam in hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 162, 150498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150498>
24. Shi, Y., & Zhang, B. (2016). Recent advances in transition metal phosphide nanomaterials: synthesis and applications in hydrogen evolution reaction. *Chemical Society Reviews*, 45(6), 1529-1541. doi: [10.1039/C5CS00434A](https://doi.org/10.1039/C5CS00434A)
25. Singh, S., Jain, S., Ps, V., Tiwari, A. K., Nouni, M. R., Pandey, J. K., & Goel, S. (2015). Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 623-633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>
26. Tang, R., Xiong, S., Gong, D., Deng, Y., Wang, Y., Su, L., & Liao, C. (2020). Ti₃C₂ 2D MXene: Recent progress and perspectives in photocatalysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(51), 56663-56680. doi: [10.1021/acsami.0c12905](https://doi.org/10.1021/acsami.0c12905)
27. Veziroğlu, T. N., & Şahi, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49(7), 1820-1831. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.015>
28. Voiry, D., Chhowalla, M., Gogotsi, Y., Kotov, N. A., Li, Y., Penner, R. M., ..., & Weiss, P. S. (2018). Best Practices for Reporting Electrocatalytic Performance of Nanomaterials. *ACS Nano*, 12(10), 9635-9638. doi: [10.1021/acs.nano.8b07700](https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b07700)
29. Xiao, W., Yan, D., Zhang, Y., Yang, X., & Zhang, T. (2021). Heterostructured MoSe₂/oxygen-terminated Ti₃C₂ MXene architectures for efficient electrocatalytic hydrogen evolution. *Energy & Fuels*, 35(5), 4609-4615. doi: [10.1021/acs.energyfuels.1c00123](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00123)
30. Xu, Q., Jiang, H., Zhang, H., Hu, Y., & Li, C. (2019). Heterogeneous interface engineered atomic configuration on ultrathin Ni(OH)₂/Ni₃S₂ nanoforests for efficient water splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 242, 60-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.09.064>
31. Zhong, W., Xiao, B., Lin, Z., Wang, Z., Huang, L., Shen, S., Gu, L. (2021). RhSe₂: A superior 3D electrocatalyst with multiple active facets for hydrogen evolution reaction in both acid and alkaline solutions. *Advanced Materials*, 33(9), 2007894. doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202007894>
32. Zhou, W., Jia, J., Lu, J., Yang, L., Hou, D., Li, G., & Chen, S. (2016). Recent developments of carbon-based electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *Nano Energy*, 28, 29-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.08.027>
5. Deng, Z., Wang, J., Nie, Y., & Wei, Z. (2017). Tuning the interface of Ni@Ni(OH)₂/Pd/rGO catalyst to enhance hydrogen evolution activity and stability. *Journal of Power Sources*, 352, 26-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.111>
6. Durairaj, S., Annamalai, P., Dhanalakshmi, R., & Ghosh, D. (2024). Advances and outlook of Ti₃C₂-based catalysts for electrocatalytic hydrogen production: A comprehensive overview. *Energy & Fuels*, 38(21), 20258-20284. doi: [10.1021/acs.energyfuels.4c03966](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03966)
7. Feng, A., Yu, Y., Wang, Y., Jiang, F., Yu, Y., Mi, L., & Song, L. (2017). Two-dimensional MXene Ti₃C₂ produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Materials & Design*, 114, 161-166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.053>
8. Gong, M., Wang, D. Y., Chen, C. C., Hwang, B. J., & Dai, H. (2016). A mini review on nickel-based electrocatalysts for alkaline hydrogen evolution reaction. *Nano Research*, 9(1), 28-46. doi: [10.1007/s12274-015-0965-x](https://doi.org/10.1007/s12274-015-0965-x)
9. Gu, Y., Wang, Y., Shi, J., Yang, M., Rui, Y., An, W., & Men, Y. (2020). Well-dispersed Pt nanodots interfaced with Ni(OH)₂ on anodized nickel foam for efficient hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), 27067-27077. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.047>
10. Guo, J., Zhao, Y., Liu, A., & Ma, T. (2019). Electrostatic self-assembly of 2D delaminated MXene (Ti₃C₂) onto Ni foam with superior electrochemical performance for supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 305, 164-174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.025>
11. Hassmann, K., & Kühne, H. M. (1993). Primary energy sources for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18(8), 635-640. doi: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90115-Q](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90115-Q)
12. Hu, X., Tian, X., Lin, Y. W., & Wang, Z. (2019). Nickel foam and stainless steel mesh as electrocatalysts for hydrogen evolution reaction, oxygen evolution reaction and overall water splitting in alkaline media. *RSC Advances*, 9(54), 31563-31571. doi: [10.1039/C9RA07258F](https://doi.org/10.1039/C9RA07258F)
13. Kadja, G. T., Natalya, S. A. C., Balqis, F., Azhari, N. J., Nurdini, N., Sumboja, A., ... & Khalil, M. (2023). Gold nanoparticles-supported Ti₃C₂ MXene nanosheets for enhanced electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 36, 101059. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nano.2023.101059>
14. Li, D. Y., Liao, L. L., Zhou, H. Q., Zhao, Y., Cai, F. M., Zeng, J. S., & Yu, F. (2021). Highly active non-noble electrocatalyst from Co₂P/Ni₂P nanohybrids for pH-universal hydrogen evolution reaction. *Materials Today Physics*, 16, 100314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100314>
15. Li, S., Tuo, P., Xie, J., Zhang, X., Xu, J., Bao, J., Xie, Y. (2018). Ultrathin MXene nanosheets with rich fluorine termination groups realizing efficient electrocatalytic hydrogen evolution. *Nano Energy*, 47, 512-518. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.022>
16. Liu, X., Wang, L., Ji, S., Linkov, V., Fu, Q., Li, Z., & Wang, H. (2023). Modulating surface electron density of Ni(OH)₂ nanosheets with longitudinal Ti₃C₂T_x MXene nanosheets by Schottky effect toward enhanced hydrogen evolution reaction. *Dalton Transactions*, 52(28), 9721-9730. doi: [10.1039/D3DT01428B](https://doi.org/10.1039/D3DT01428B)
17. Lokhande, P. E., & Chavan, U. S. (2019). Nanostructured Ni(OH)₂/rGO composite chemically deposited on Ni foam for high performance of supercapacitor applications. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(1), 52-56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.10.003>
18. López Ortiz, A., Meléndez Zaragoza, M. J., & Collins-Martínez, V. (2016). Hydrogen production research in Mexico: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(48), 23363-23379. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.004>