



Flame Annealed Micro-Carbon Fiber Electrode Modified with Mild Oxidized Water-Dispersible Graphene Oxide for Electrochemical Sensing of Dopamine in the presence of Uric Acid

Vali Alizadeh^{1*}, Mojtaba Hosseinfard²

¹ Assistant Professor, Department of Petroleum, Faculty of Engineering, University of Garmsar, Garmsar, Iran.

² Associate Professor, Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

*Corresponding Author's Email: valializadeh.chem@gmail.com (Vali Alizadeh)

Paper History:

Received: 2025-07-28

Revised: 2025-09-06

Accepted: 2026-02-04

Keywords:

Flame Annealing Activation,
Carbon Fiber Microelectrode,
Dopamine,
Uric Acid,
CV,
DPV

Abstract In this research, a micro carbon fiber electrode (MCFE) was activated using a simple flame annealing method and subsequently modified with mildly oxidized graphene oxide (M-GO) to develop an inexpensive and sensitive electrochemical sensor for dopamine (DA) detection. Observations indicate that flame annealing increases surface roughness, enhances electrochemical activity, and improves the electrode's affinity for M-GO adsorption, resulting in a more sensitive DA sensor. The electrochemical properties and morphology of the modified electrode were characterized using electrochemical techniques, including cyclic voltammetry (CV), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), differential pulse voltammetry (DPV), and scanning electron microscopy (SEM). Electrochemical investigations revealed that the M-GO-modified flame-annealed micro carbon fiber electrode (FA-MCFE/M-GO) exhibits high sensitivity, a wide linear range, and a detection limit of 20 nM for DA determination. Another notable feature of this sensor is its ability to eliminate the interfering effects of uric acid (UA) during dopamine detection, which represents one of the primary challenges in the electrochemical analysis of DA in biological samples. The results demonstrate that using M-GO as a surface modifier for the carbon fiber microelectrode provides an effective and cost-efficient strategy for fabricating high-performance electrochemical sensors. This sensor shows substantial potential for diagnostic and clinical applications in measuring DA in the presence of interfering substances.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.536005.1334>

URL: https://www.jamt.ir/article_241165.html

1. INTRODUCTION

Dopamine (DA), a vital neurotransmitter in the central nervous system, plays a key role in numerous physiological functions, including motor control, motivation, and reward mechanisms. Abnormal dopamine levels are associated with neurological disorders such as Parkinson's disease, schizophrenia, and addiction (Lungelo, M. et al., 2025). Consequently, the development of sensitive, rapid, and cost-effective methods for dopamine detection has attracted significant attention in clinical diagnostics and neurochemical research.

Electrochemical sensing has emerged as a powerful approach to dopamine detection due to its high sensitivity, operational simplicity, and ability to provide real-time measurements. Among the wide range of electrode materials, carbon-based microelectrodes have gained particular interest due to their biocompatibility, high electrical conductivity, and favorable surface chemistry (Fikri, S. et al., 2020). In particular, micro carbon fiber electrodes (MCFEs) are widely used for their small size, mechanical stability, and suitability for in vivo analysis (Jiatao, C. et al., 2024).

This study reports the fabrication of an electrochemical sensor based on a flame-annealed carbon fiber microelectrode (FA-MCFE) modified with

synthesized mildly oxidized graphene oxide (M-GO) for the selective and sensitive detection of DA. Flame annealing, a rapid and low-cost thermal treatment, was employed to activate the micro carbon fiber surface. This method significantly enhances the electrochemical activity by increasing surface area and introducing oxygen-containing functional groups. Unlike electrochemical activation, which typically involves repetitive potential cycling in acidic or alkaline electrolytes and requires precise control of electrochemical conditions over extended periods (Strand, A.M., & Venton, B.J., 2008), flame annealing can be completed within seconds using only a simple flame source. Furthermore, laser activation, while effective in creating highly conductive and structured carbon surfaces, demands expensive laser systems, precise alignment, and safety precautions, making it less accessible and more time-consuming for routine applications (Rosenwald, S.E. et al., 2000).

In contrast, flame annealing provides an ultra-fast, reproducible, and equipment-free route to activate carbon fiber electrodes. This simplicity not only reduces fabrication time and cost, but also makes the method suitable for scalable production and point-of-care sensor development.

To further improve sensing performance, the flame-annealed electrode (FA-MCFE) was modified with

Please cite this article as: Alizadeh, V., & Hosseinfard, M. (2025) Flame Annealed Micro-Carbon Fiber Electrode (FA-MCFE) Modified with Mild Oxidized Water-Dispersible Graphene Oxide (M-GO) for Electrochemical Sensing of Dopamine in the presence of Uric Acid, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 14, No. 3, 78-89. [in Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2026.536005.1334>.



synthesized mildly oxidized graphene oxide (M-GO). GO is a highly functionalized two-dimensional nanomaterial with excellent electrochemical properties, such as high surface area, good dispersibility, and efficient electron-transfer characteristics (Dreye, D. R. et. Al., 2010). The modification of the flame-annealed micro carbon fiber electrode with GO produced a synergistic enhancement in electrochemical response, enabling high sensitivity and stability for dopamine detection.

Beyond sensitivity, selectivity is a critical aspect of real-sample analysis due to the presence of electroactive interferences such as uric acid (UA), which often coexist with dopamine in biological fluids (Madhurantakam, S. et. al., 2020). In this work, the fabricated FA-MCFE/M-GO sensor demonstrated the capability to resolve the oxidation peaks of dopamine and uric acid effectively, minimizing interference, and enabling accurate quantification of dopamine in complex matrices.

Overall, the proposed sensor fabrication approach combines speed, simplicity, cost-effectiveness, and strong analytical performance, making it a promising platform for future applications in biomedical diagnostics and neurochemical monitoring.

2. MATERIALS AND METHODS

Mild oxidation strategy to prepare water-dispersible graphene oxide (M-GO) was applied using a modified version of the Staudenmaier technique, with natural graphite powder (You, X. et. al., 2017). The process began by combining 75 g of graphite powder with 1750 mL of a mixed acid solution (H_2SO_4 and HNO_3 in a 7.5:1 volume ratio). This mixture was stirred at room temperature ($25^\circ C$) for 30 minutes. The next step involved the gradual addition of 1075 mL of $NaClO_3$ solution (5 mol/L) over a 5-hour period, while maintaining constant stirring at 200 rpm and room

temperature. After an additional 5 hours of stirring, the mixture underwent washing with distilled water. Finally, the resulting slurry was freeze-dried and underwent thermal reduction in a muffle furnace, with the material being heated to $450^\circ C$ for 120 seconds in air to produce the final M-GO product for MCFE modification.

For construction of the FA-MCFE/M-GO sensor, initially a single CF was connected to a copper wire using silver epoxy and insulated with hot glue, leaving 3 mm of fiber exposed to obtain a micro carbon fiber electrode (MCFE). The prepared MCFE was then flame-annealed for 4 seconds in the blue region of the lighting flame. Finally, the annealed electrode (FA-MCFE) was modified by dip-coating in a water-dispersible M-GO dispersion for 10 minutes for DA detection.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characterization of the fabricated sensor

The surface morphological characteristics of MCFE, FA-MCFE, and FA-MCFE/M-GO electrodes were investigated using field emission scanning electron microscopy (FESEM). The initial MCFE exhibited a uniform, smooth surface with a diameter of $21.32 \mu m$. Following flame annealing treatment, the MCFE diameter significantly decreased to $11.75 \mu m$, and the surface developed nanoscale roughness features. Upon modification with M-GO, the FA-MCFE electrode showed a slight increase in diameter, which can be attributed to the successful adsorption of M-GO onto its surface. The surface morphology transformation from smooth to rough, followed by M-GO coating, indicates effective activation and modification of the electrode surface through each preparation step.

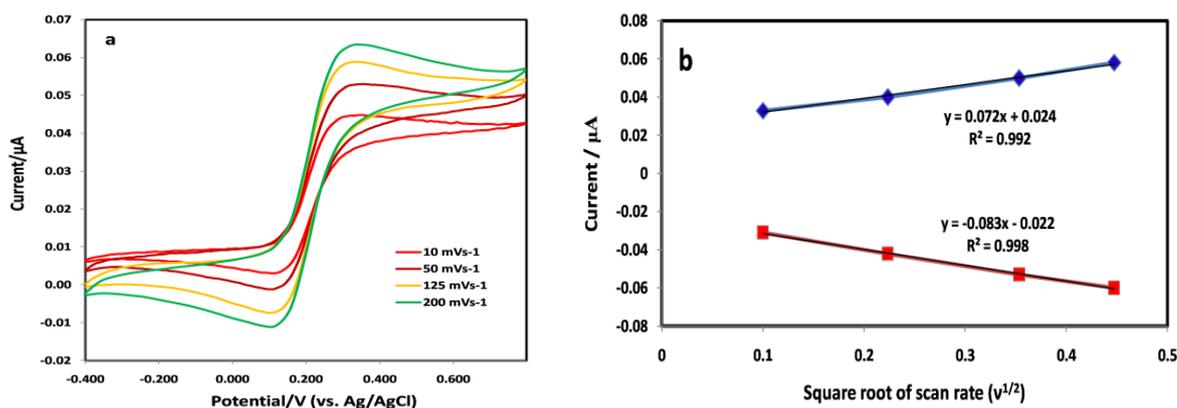


Figure 1. CVs of FA-MCFE/M-GO electrode in 5.0 mM $K_4Fe(CN)_6/K_3Fe(CN)_6$ at scan rate of 0.01, 0.05, 0.125, and 0.2 V (a) and the corresponding peak currents (i_{pa} and i_{pc}) versus the square root of scan rate ($v^{1/2}$) (b).

3.2. Electrochemical performance of the prepared sensor

The cyclic voltammetry (CV) analysis of the FA-MCFE/M-GO electrode was conducted at varying scan rates (0.01, 0.05, 0.125, and 0.2 V/s) using 5.0 mM $K_4Fe(CN)_6/K_3Fe(CN)_6$ as the redox probe. The voltammograms exhibited minimal separation between

the anodic (E_{pa}) and cathodic (E_{pc}) peak potentials across all scan rates, indicating rapid electron transfer kinetics. The magnitudes of both anodic (i_{pa}) and cathodic (i_{pc}) peak currents demonstrated a linear increase with increasing scan rates, while maintaining an i_{pa}/i_{pc} ratio approximately equal to 1. These electrochemical characteristics, namely the negligible

change in peak separation (ΔE_p), the linear relationship between peak currents and scan rates, and the unity ratio of peak currents, collectively confirm that the FA-MCFE/M-GO electrode exhibits fast electron transfer kinetics (Figure 1).

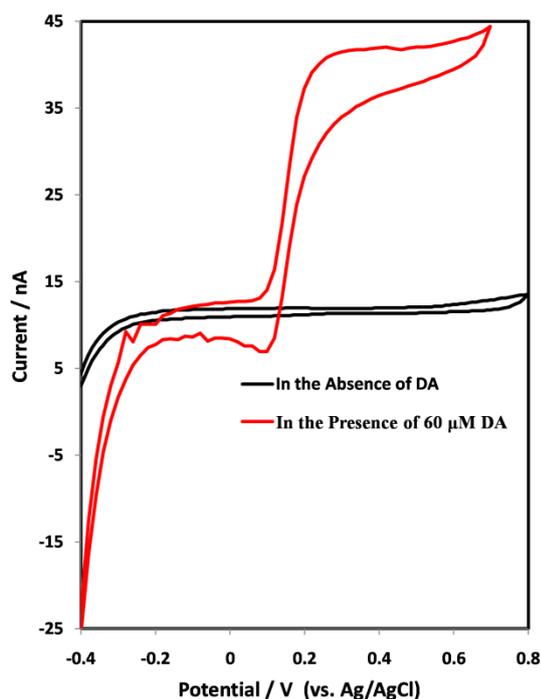


Figure 2. CVs of FA-MCFE/M-GO at pH 7.0 at scan rate 50 mVs^{-1} in the absence (-) and presence (-) of $75 \mu\text{M}$ DA.

Because the FA-MCFE/M-GO electrode exhibits highly favorable electron transfer kinetics, it can be employed as an electrochemical sensor for DA detection. To evaluate its electrocatalytic activity toward DA detection, CV curves were recorded in the absence and presence of DA at pH 7, at a scan rate of 50 mVs^{-1} (Figure 2). As observed, upon the addition of $75 \mu\text{M}$ DA, a pronounced increase in the anodic peak current was recorded.

4. CONCLUSION

In this work, a highly sensitive and selective electrochemical sensor for DA detection based on the FA-MCFE/M-GO electrode was successfully developed. The fabricated DA sensor exhibited a linear response in the range of $1.0\text{--}21.5 \mu\text{M}$ under optimal conditions, with a detection limit of 20 nM . This study introduces a novel sensor for DA detection that is simple, cost-effective, rapid, and sensitive, and it successfully demonstrated its applicability for measuring DA in human serum samples.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The support of this work by research grants from the University of Garmsar Research Council is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Lungelo, M., Chandan, S., Pooja, K., Sarit, K.G., Harishchandra, S. & Kaushik, M. (2025). Electrochemical sensing of dopamine using nanostructured silver chromate: Development of an IoT-integrated sensor. *Analytical Biochemistry*, 698, 115726. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2024.115726>
- Seven, F., Golcez, T., & Sen, M. (2020). Nanoporous carbon-fiber microelectrodes for sensitive detection of H_2O_2 and dopamine. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 864, 114104. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114104>
- Jiatao, C., Fuyun, X., Xiuting, D., & Dongdong, Z. (2024). Universal Covalent Grafting Strategy of an Aptamer on a Carbon Fiber Microelectrode for Selective Determination of Dopamine In Vivo. *Analytical Chemistry*, 96 (25), 10322-10331. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c01167>
- Strand, A.B., & Venton, B.J. (2008). Flame Etching Enhances the Sensitivity of Carbon-Fiber Microelectrodes. *Analytical Chemistry*, 80 (10), 3708-3715. <https://doi.org/10.1021/ac8001275>
- Rosenwald, S.E., Nowall, W.B., Dontha, N., & Kuhr, W.G. (2000). Laser Interface Pattern Ablation of a Carbon Fiber Microelectrode: Biosensor Signal Enhancement after Enzyme Attachment. *Analytical chemistry*, 72 (20), 4914-4920. <https://doi.org/10.1021/ac000442t>
- Dreye, D. R., Park, S., Bielawski, C.W. & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*. 39 (1), 228–240.
- Madhurantakam, S., Karnam, J.B., Brabazon, D., Takai, M., Ahad, I.U., Balaguru Rayappan, J.B., & Krishnan, U.M. (2020). "Nano": An Emerging Avenue in Electrochemical Detection of Neurotransmitters. *ACS Chemical Neuroscience*. 11 (24), 4024-4047. <https://doi.org/10.1021/acscchemneuro.0c00355>
- You, X., Yang, S., Li, J., Deng, Y., Dai, L., Peng, X., Huang, H., Sun, J., Wang, G., He, P., Ding, G., & Xie, X. (2017). Green and Mild Oxidation: An Efficient Strategy toward Water-Dispersible Graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9 (3), 2856-2866. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13703>



مقاله کامل پژوهشی

میکروالکتروود فیبر کربنی فعال شده با شعله و اصلاح شده با گرافن اکسید سنتز شده در شرایط ملایم برای اندازه گیری الکتروشیمیایی دوپامین در حضور یوریک اسید

ولی علی زاده^{۱*}، مجتبی حسینی فرد^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی و مهندسی گرمسار، گرمسار، سمنان، ایران.

^۲دانشیار، گروه انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

کلیدواژه‌ها:

فعال سازی با شعله، میکروالکتروود فیبر کربنی، دوپامین، یوریک اسید، ولتامتری چرخه‌ای، ولتامتری پالس تفاضلی

چکیده در این تحقیق، میکروالکتروود فیبر کربنی (MCFE) با روش ساده حرارت دادن در شعله (FA) فعال سازی شد و سپس سطح آن با اکسید گرافن سنتز شده در شرایط ملایم (M-GO) اصلاح شد تا یک حسگر الکتروشیمیایی ارزان و حساس برای تشخیص دوپامین (DA) ایجاد شود. مشاهدات نشان می‌دهد که حرارت دادن در شعله، باعث ایجاد ناهمواری روی سطح میکروالکتروود فیبر کربنی می‌شود و فعالیت الکتروشیمیایی و میل ترکیبی آن را برای جذب M-GO روی سطحش بهبود می‌دهد تا یک حسگر حساس نسبت به دوپامین به دست آید. خاصیت الکتروشیمیایی و ریزساختار الکتروود اصلاح شده، با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی (CV, EIS, DPV) و SEM مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعات الکتروشیمیایی نشان داد که الکتروود فعال شده و اصلاح شده با اکسید گرافن (FA-MCFE/M-GO) دارای حساسیت بالا، محدوده خطی وسیع و حد تشخیص ۲۰ نانومتر برای اندازه گیری دوپامین است. یکی دیگر از قابلیت‌های مهم این حسگر، توانایی آن در حذف اثرات تداخلی اسید یوریک (UA) در طول تشخیص دوپامین است که یکی از چالش‌های اصلی در تشخیص الکتروشیمیایی دوپامین در نمونه‌های زیستی است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از M-GO به عنوان یک اصلاح کننده سطح میکروالکتروود فیبر کربن، روشی مؤثر و مقرون به صرفه برای ساخت حسگرهای الکتروشیمیایی با کارایی بالا فراهم می‌کند. این حسگر پتانسیل قابل توجهی را برای کاربردهای تشخیصی و بالینی و حذف مواد مزاحم در اندازه گیری دوپامین از خود نشان می‌دهد.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.536005.1334>

URL: https://www.jamt.ir/article_241165.html

۱- مقدمه

و پژوهش‌های شیمی اعصاب^۱، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Valikchalia et al., 2022). حسگرهای الکتروشیمیایی به دلیل حساسیت بالا، سادگی عملکرد و توانایی اندازه گیری در زمان واقعی، به عنوان یک رویکرد قدرتمند برای شناسایی دوپامین مطرح شده‌اند. در میان مواد مختلف مورد استفاده برای ساخت الکتروود، الکترودهای میکرو فیبر کربنی به دلایل زیر استفاده می‌شوند:

دوپامین (DA) در دستگاه عصبی مرکزی به عنوان انتقال دهنده عصبی حیاتی است که نقش کلیدی در عملکردهای فیزیولوژیکی متعدد از جمله کنترل حرکتی، انگیزش و سازوکارهای هیجانی ایفاء می‌کند. سطوح غیرطبیعی در غلظت دوپامین، با اختلالات عصبی همچون بیماری پارکینسون، اسکیزوفرنی و اعتیاد در ارتباط است (Mgenge et al., 2025). از این رو، توسعه روش‌های حساس، سریع و کم هزینه برای شناسایی دوپامین در حوزه تشخیص‌های بالینی

1. Neurochemistry

عهده دار مکاتبات: ولی علی زاده

نشانی: گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی و مهندسی گرمسار، گرمسار، ایران

پیام نگار: valializadeh.chem@gmail.com

الزامات ایمنی دارد که باعث پیچیدگی و زمان‌بر بودن آن می‌شود (Rosenwaldet. al., 2000).

برخلاف این روش‌ها، روش فعال‌سازی با شعله یک روش بسیار سریع، تکرارپذیر و بدون نیاز به تجهیزات خاص برای فعال‌سازی الکترودهای فیبر کربن است. این سادگی نه تنها زمان و هزینه ساخت را کاهش می‌دهد؛ بلکه آن را برای تولید در مقیاس بالا و کاربردهای تشخیصی درمحل، بسیار مناسب می‌سازد. افزون‌براین، مشاهدات نشان می‌دهد که میکروالکترودهای فیبر کربنی فعال‌شده با شعله، نسبت سیگنال به نویز بالاتر و جریان‌های بیشتری را نسبت به میکروفیبر کربن (میکروحسگرهای فیبرکربنی) معمولی یا الکترودهایی که به روش الکتروشیمیایی فعال‌سازی شده‌اند، دارد. بنابراین، افزایش حساسیت این نوع الکترودها ناشی از کوچک بودن اندازه الکترودها نیست. سطوح فعال‌شده با شعله دارای ویژگی‌های ساختاری در مقیاس نانومتر هستند که در سایر الکترودها مشاهده نمی‌شود و حساسیت بیشتری نسبت به ترکیبات الکتروفعال از جمله ترکیبات انتقال‌دهنده عصبی، نشان می‌دهند (Strand&Venton., 2008).

به‌منظور بهبود بیشتر عملکرد حسگر، سطح این الکترودها فعال‌سازی شده با شعله با استفاده از M-GO اصلاح شد. اکسید گرافن یک ماده دوبعدی با عملکرد بالا و با ویژگی‌های الکتروشیمیایی عالی است مانند: سطح ویژه بالا، گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار و سینتیک انتقال الکترون مؤثر (Dreyet. al., 2010). تلفیق فعال‌سازی با شعله و اصلاح سطح با M-GO منجر به تقویت هم‌افزایی پاسخ الکتروشیمیایی شده و حساسیت و پایداری بالایی را برای شناسایی دوپامین فراهم می‌کند.

علاوه بر حساسیت، گزینش‌پذیری عامل کلیدی دیگری در آنالیز نمونه‌های واقعی است؛ به‌ویژه در حضور گونه‌های مزاحم الکتروفعال مانند یوریک‌اسید (UA) که معمولاً همراه با دوپامین در مایعات زیستی وجود دارد. در این تحقیق، حسگر ساخته‌شده FA-MCFE/M-GO توانایی تفکیک مؤثر سیگنال‌های اکسایش الکتروشیمیایی دوپامین و یوریک‌اسید را نشان داد که این موضوع باعث کاهش تداخل و امکان اندازه‌گیری دقیق دوپامین در ماتریس‌های پیچیده می‌شود (Madhurantakamet. al., 2020).

(۱) زیست‌سازگاری (کربن بی‌خطر بوده و بافت زیستی را تحریک نمی‌کند)

(۲) رسانایی بالا و سینتیک انتقال سریع الکترون (این نوع الکترودها امکان انتقال سریع الکترون را که در اندازه‌گیری‌های سریع مثل ولتامتری چرخه‌ای اهمیت دارد، فراهم می‌کند)

(۳) امکان اصلاح سطح (سطح این نوع الکترودها را می‌توان به روش‌های مختلف اصلاح کرد تا حساسیت و گزینش‌پذیری آنها بهبود یابد)

(۴) به‌طور خاص، میکروالکترودهای فیبر کربن (MCFE) دارای اندازه کوچک با جریان خازنی کم (باعث نویز کمتر، پاسخ بهتر و حساسیت بالا در سیگنال‌های الکتروشیمیایی می‌شود و امکان اندازه‌گیری موضعی و حتی قابلیت استفاده در شرایط درون‌تنی^۱ را فراهم می‌کند)

(۵) پایداری مکانیکی و شیمیایی بالا (کربن مقاومت خوبی در برابر خوردگی و شرایط محیطی مختلف دارد که باعث می‌شود در محیط‌های پیچیده زیستی و شیمیایی پایدار بماند) (Sevenet. al., 2020&Chenetal., 2024).

در این مطالعه، ما ساخت یک حسگر الکتروشیمیایی مبتنی بر میکروالکترودهای فیبر کربن را که با شعله، فعال‌سازی شده (FA-MCFE) و به‌دنبال آن با گرافن اکسید سنتز شده در شرایط ملایم (M-GO)، اصلاح شده است، را گزارش می‌کنیم که برای اندازه‌گیری گزینشی و حساس دوپامین به‌کار برده شده است. روش فعال‌سازی با شعله (که یک فرایند ساده، سریع و کم‌هزینه برای فعال‌سازی حرارتی است) منجر به بهبود قابل توجهی در فعالیت الکتروشیمیایی سطح کربن می‌شود. در مقایسه با روش‌های فعال‌سازی الکتروشیمیایی که نیازمند چرخه‌های پتانسیل متوالی در محیط‌های اسیدی یا قلیایی، ضرورت کنترل دقیق شرایط و زمان‌بر هستند (Strand & Venton., 2008)، روش شعله‌ای تنها در چند ثانیه و با استفاده از منبع حرارتی ساده قابل‌انجام است. ازسوی دیگر، فعال‌سازی لیزری با وجود کارایی در ایجاد سطوح رسانا و ساختارمند، نیاز به سیستم‌های لیزری گران‌قیمت، تنظیم دقیق و

به مدت ۱۵ دقیقه دیگر هم‌زده شود. سپس مخلوط با استفاده از محلول آبی هیدروکلریک اسید جهت برداشتن یون‌های فلزی شسته شد و سپس ماده جامد گرافن‌اکساید به‌جامانده، در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب به مدت یک ساعت در حمام فراصوت قرار گرفت تا یک محلول دیسپرس شده آبی به دست آید. برای احیای شیمیایی گرافن‌اکساید به دست آمده، ۲۰ میلی‌لیتر از محلول دیسپرس شده آن با ۱۰ میکرولیتر هیدرازین مونوهیدرات (۹۸ درصد) و ۷۰ میکرولیتر محلول آمونیاک (۲۸ درصد وزنی در آب) مخلوط شد. مخلوط مدتی هم‌زده شد و در حمام روغن با دمای ۹۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. بعد از فرایند احیای شیمیایی، یک مخلوط دیسپرس شده همگن به دست آمد (M-GO)، که برای اصلاح سطح الکتروود میکرو فیبر کربنی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. تصویر گرافن‌اکساید دیسپرس شده در محیط آبی بعد از احیاء شدن توسط محلول هیدرازین.

در مرحله بعد، یک رشته از میکرو فیبر کربن به قطر ۲۰ میکرومتر با استفاده از چسب هادی نقره اپوکسی به سیم مسی متصل شد و محل اتصال و بخشی از سیم مسی با استفاده از چسب حرارتی، عایق‌بندی شد تا در انجام آزمایش‌های الکتروشیمیایی فقط میکرو فیبر کربنی با محلول مورد آنالیز، در تماس باشد. اندازه بخش فعال میکروالکتروود ساخته شده، در زیر میکروسکوپ به طول ۲ میلی‌متر با چاقوی جراحی بریده شد. به محض اینکه، الکتروود میکرو فیبر کربنی ساخته شد، سطح این الکتروود با قرار گرفتن در داخل شعله فندک به مدت ۴ ثانیه، از نظر الکتروشیمیایی فعال شد. در نهایت، سطح الکتروود میکرو فیبر کربنی فعال شده با حرارت (FA-MCFE)، از طریق غوطه‌ورسازی به مدت ۱۰ دقیقه در داخل محلول دیسپرس شده‌ی گرافن‌اکساید سنتز شده در مرحله اول (M-

در مجموع، این روش ساخت حسگر، با ترکیب سرعت، سادگی، مقرون‌به‌صرفه بودن و آنالیز با عملکرد بالا، یک زیرساخت نویدبخش را برای کاربردهای آبی در تشخیص‌های زیست‌پزشکی و پایش شیمی اعصاب ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش تحقیق

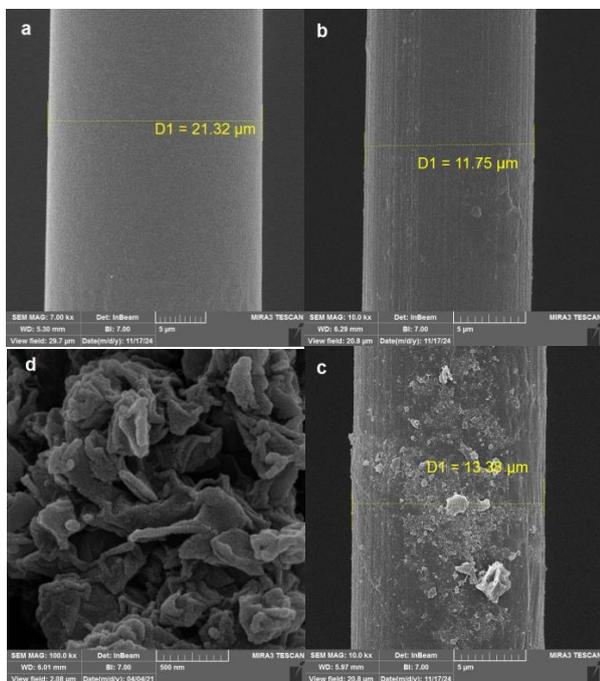
۲-۱- مواد

دوپامین، یوریک اسید، میکرو فیبر کربن، پودر گرافیت، سولفوریک اسید، اتانول، پتاسیم هگزا سیانوفرات (II)، پتاسیم هگزا سیانوفرات (III)، پتاسیم پرمنگنات، آب اکسیژنه و هیدرازین مونوهیدرات از شرکت مرک خریداری شد. از آب دوبار تقطیر برای تهیه محلول‌ها و شستشو استفاده شد. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی با استفاده از پتانسیواستات-گالوانواستات Radstate 100 (ساخت شرکت کیان شار دانش) مجهز به نرم‌افزار PS Trace 4.8 و با سیستم سه‌الکترودی شامل الکتروود FA-MCFE/M-GO به عنوان الکتروود کار، الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود کمکی و الکتروود Ag/AgCl به عنوان الکتروود مرجع انجام شد. ریخت‌شناسی سطح الکتروود کار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (FE-SEM مدل Tescan Mira 3 به دست آمد).

۲-۲- تهیه الکتروود میکرو فیبر کربن فعال شده با شعله و اصلاح شده با گرافن‌اکساید سنتز شده در شرایط ملایم (FA-MCFE/M-GO)

برای تهیه این الکتروود، در مرحله اول، گرافن‌اکساید در شرایط اکسایش محدود (ملایم) پودر گرافیت، طبق مطالعه‌ای که قبلاً با استفاده از روش اصلاح شده هامر گزارش شده است، سنتز شد (Youetal., 2017; Xuetal., 2011). به‌طور خلاصه، پودر گرافیت (۰/۵ گرم) و پتاسیم پرمنگنات (۰/۵ گرم) به ۱۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ تحت شرایط هم‌زدن و در دمای اتاق اضافه شد. سپس ظرف واکنش به حمام آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس انتقال و به مدت ۳ ساعت در این شرایط قرار داده شد. مخلوط به داخل ۱۵۰ میلی‌لیتر آب اضافه شد و با افزودن ۱۰ میلی‌لیتر آب اکسیژنه (۳۰٪) اجازه داده شد که

قابل توجهی در ریخت‌شناسی سطح الکتروود ایجاد می‌کند. اصلاح سطح الکتروود با گرافن اکساید با دو هدف اصلی انجام شد: ۱. افزایش فعالیت الکتروکاتالیزی در اندازه‌گیری دوپامین. ۲. بهره‌گیری از گروه‌های کربوکسیلات موجود در صفحات



شکل ۲. تصویر FE-SEM الکتروود میکروفیبر کربنی قبل از فعال‌سازی در شعله (a)، بعد از فعال‌سازی در شعله (b)، بعد از اصلاح شدن با گرافن اکساید (c,d) الکتروود b بعد از اصلاح شدن با گرافن اکساید (FA-MCFE/M-GO).

گرافن برای افزایش گزینش‌پذیری. در pH فیزیولوژیک، گروه‌های کربوکسیلات گرافن اکساید می‌توانند در اثر دافعه الکترواستاتیکی، مولکول‌های مداخله‌گر مانند یوریک اسید که در این pH دارای بار الکتریکی منفی هستند، دفع کنند. این ویژگی منجر به افزایش قابل توجه گزینش‌پذیری الکتروود نسبت به دوپامین می‌شود. در این پژوهش، به منظور اصلاح سطح الکتروود و افزایش خاصیت الکتروکاتالیزی آن، از گرافن اکساید سنتز شده تحت شرایط ملایم، استفاده شد. گرچه گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در ساختار گرافن اکساید برای کاربردهای الکتروشیمیایی، مفید هستند؛ اما اکسیداسیون شدید گرافیت می‌تواند منجر به تخریب گسترده شبکه sp^2 کربن و ساختار آروماتیک شود. این تخریب ساختاری به طور قابل توجهی رسانایی الکتریکی و در نتیجه خواص الکتروکاتالیزی گرافن اکساید را کاهش می‌دهد.

(GO)، اصلاح شد و به عنوان سنسور دوپامین مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

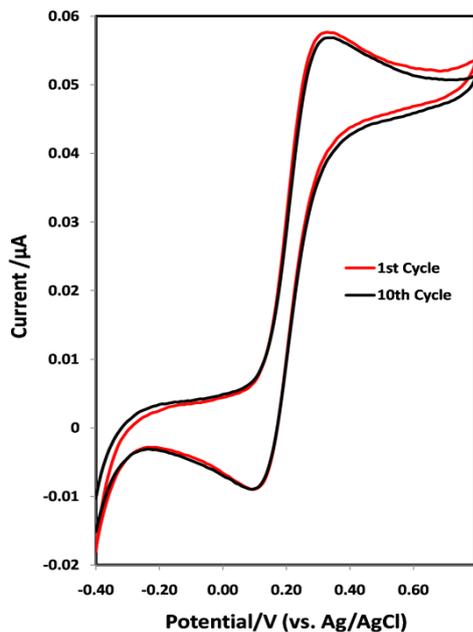
۳-۱- مشخصه‌یابی الکتروود FA-MCFE/M-GO

شکل ۲ تصاویر FE-SEM مربوط به الکتروودهای میکروفیبر کربنی فعال‌نشده (a)، فعال‌شده‌ی حرارتی (b) و اصلاح‌شده با گرافن اکساید (c,d) را نشان می‌دهد. الکتروود میکروفیبر کربنی قبل از فعال‌سازی، دارای سطح کاملاً صاف و یکنواخت با قطر $21/32$ میکرومتر است (۲a). همان‌طوری که در شکل مشخص است، در اثر فعال‌سازی با شعله، ریخت‌شناسی سطح الکتروود، دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌شود؛ به طوری که ناهمواری‌هایی به شکل شیارهای طولی در راستای محور الکتروود گسترش می‌یابد. به نظر می‌رسد که ماده بایندر تحت تأثیر حرارت شعله، تجزیه شده و سطح فعال الکتروود نمایان می‌شود که این امر منجر به کاهش چشمگیر قطر الکتروود به $11/75$ میکرومتر می‌شود (۲b). پس از اصلاح سطح الکتروود با گرافن اکساید، همان‌طوری که در شکل‌های ۲c,d مشاهده می‌شود، نانوصفحات گرافن اکساید روی سطح فعال الکتروود قرار گرفته و یک پوششی را روی آن ایجاد می‌کنند. این پوشش نانو ساختار می‌تواند منجر به افزایش مساحت سطح مؤثر و بهبود خواص الکتروشیمیایی الکتروود شود.

همان‌طوری که در تصویر FE-SEM هم نشان داده شده است، سطح الکتروود میکروفیبر کربنی فعال‌نشده، کاملاً صاف بوده و به نظر می‌رسد که توسط بایندر پوشیده شده است و فعالیت سطحی محدود دارد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که ویژگی‌های ساختاری این الکتروود منجر به پاسخ‌های الکتروشیمیایی نامطلوب در این الکتروود می‌شود (Strand&Venton., 2008; Takmakovet. al., 2010). در پژوهش حاضر، به منظور افزایش فعالیت سطحی و بهبود گزینش‌پذیری الکتروود در تشخیص دوپامین، از روش فعال‌سازی با شعله و به دنبال آن، اصلاح سطح با گرافن اکساید سنتز شده تحت شرایط ملایم، استفاده شد. عملیات فعال‌سازی با شعله به عنوان روشی ساده، سریع و مقرون به صرفه، تغییرات

الکترون) انجام شد (شکل ۳a). ولتاموگرام‌های چرخه‌ای در سرعت‌های روبش مختلف، کمترین جدایش بین پتانسیل پیک‌های کاتدی (E_{pc}) و آندی (E_{pa}) را از خود نشان دادند. مقدار هر دو جریان کاتدی (i_{pc}) و آندی (i_{pa}) با افزایش سرعت روبش، به‌طور خطی افزایش می‌یابند (شکل ۳b)؛ درحالی‌که نسبت این دو جریان تقریباً برابر با ۱ است ($i_{pa}/i_{pc}=1$). این ماهیت الکتروشیمیایی تأیید می‌کند که الکتروکود FA-MCFE/M-GO، سینتیک انتقال الکترون سریعی را از خود نشان می‌دهد.

علاوه‌براین، پایداری پاسخ الکتروشیمیایی (تکرارپذیری) الکتروکود FA-MCFE/M-GO با استفاده از چرخه‌های متوالی ولتامتری چرخه‌ای، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الکتروکود تهیه‌شده پایدار بود؛ زیرا پس از ۱۰ چرخه در محلول زوج ردوکس $K_4[Fe(CN)_6]/K_3[Fe(CN)_6]$ منحنی‌های ولتامتری چرخه‌ای تقریباً یکسانی را نشان داد (شکل ۴).

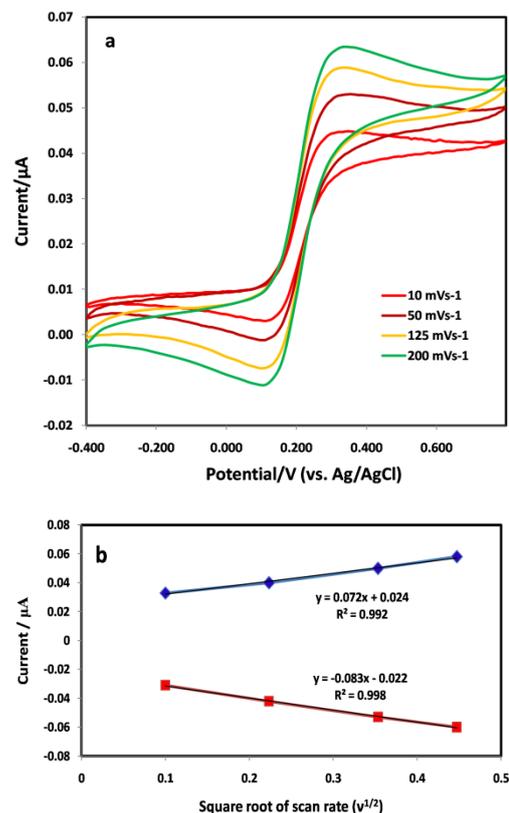


شکل ۴. روبش اول و روبش دهم ولتاموگرام‌های چرخه‌ای الکتروکود FA-MCFE/M-GO در محلول ۰/۵ میلی‌مولار $K_4[Fe(CN)_6]/K_3[Fe(CN)_6]$ در سرعت روبش ۱۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه.

۳-۲- رفتار الکتروکاتالیتیکی الکتروکود FA-MCFE/M-GO در تشخیص دوپامین

از آنجاکه الکتروکود اصلاح‌شده از نظر پایداری در سیستم ردوکس، عملکرد بهتری داشت (بخش ۱-۳)، این الکتروکود

برای غلبه بر این چالش، سنتز گرافن‌اکساید در شرایط اکسیداسیون کنترل‌شده و ملایم انجام شد. این رویکرد امکان حفظ بخش قابل‌توجهی از ساختار آروماتیک را فراهم می‌کند؛ درحالی‌که گروه‌های عاملی کافی برای برهم‌کنش‌های مطلوب با آنالیت هدف را ایجاد می‌کند. حفظ نسبی ساختار sp^2 در گرافن‌اکساید سنتز شده، مسیرهای هدایت الکترونیکی را در ساختار آن حفظ کرده و موجب بهبود انتقال الکترون در فرایندهای الکتروشیمیایی می‌شود. این ویژگی‌های ساختاری منحصربه‌فرد، در کنار حضور گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، منجر به افزایش کارایی الکتروکود اصلاح‌شده در تشخیص الکتروشیمیایی می‌شود (Ekrami-Kakhkiet. al., 2019; Kharazmi&Alamdariet. al., 2024)



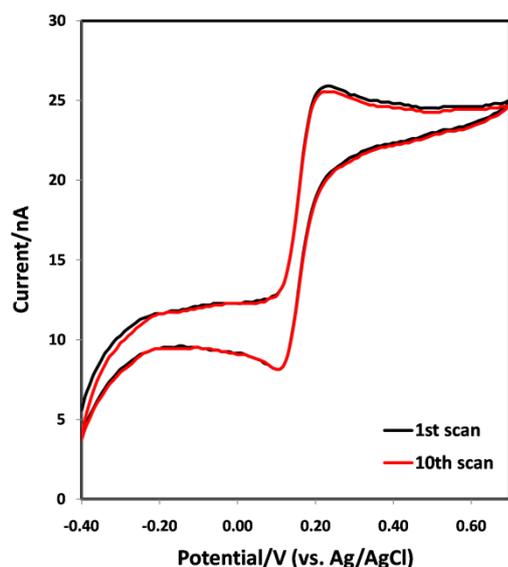
شکل ۳. (a) ولتاموگرام‌های چرخه‌ای الکتروکود FA-MCFE/M-GO در محلول ۰/۵ میلی‌مولار $K_4[Fe(CN)_6]/K_3[Fe(CN)_6]$ در سرعت روبش ۱۰، ۵۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌ولت بر ثانیه و (b) جریان‌های پیک کاتدی (i_{pc}) و آندی (i_{pa}) مربوطه نسبت به جذر سرعت روبش (v).

آنالیزهای ولتامتری چرخه‌ای (CV) الکتروکود FA-MCFE/M-GO در سرعت‌های روبش ۱۰، ۵۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌ولت بر ثانیه در محلول ۰/۵ میلی‌مولار زوج ردوکس $K_4[Fe(CN)_6]/K_3[Fe(CN)_6]$ (به‌عنوان حدواسط انتقال

همچنین، پایداری الکتروکود FA-MCFE/M-GO در تشخیص پاسخ به ۳۲ میکرومولار دوپامین با اعمال ۱۰ روبش ولتاژتری چرخه‌ای ارزیابی شد. مقایسه روبش اول و دهم نشان داد که تغییر قابل توجهی در پیک‌های جریان اکسایش دوپامین مشاهده نشد (شکل ۶). این امر نشان می‌دهد که سطح الکتروکود اصلاح شده در طول آزمایش غیرفعال نشده است، هیچ جذبی روی سطح آن اتفاق نیافته و هیچ واکنش جانبی در طول اندازه‌گیری دوپامین وجود ندارد؛ بنابراین، پایداری و عملکرد الکتروکود، مطلوب است و می‌تواند برای مدت طولانی در اندازه‌گیری دوپامین مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۳- اثر pH

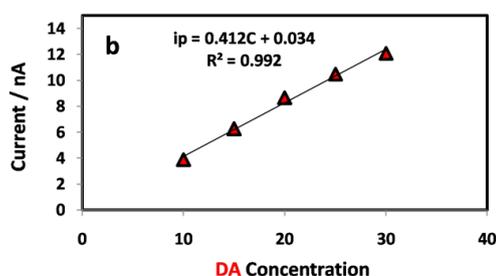
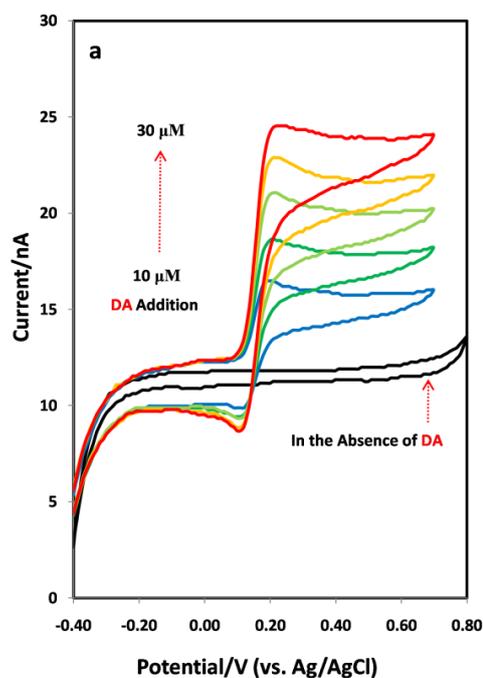
تأثیر تغییرات pH بر شدت جریان پیک آندی دوپامین با استفاده از محلول بافر فسفات با مقادیر pH در محدوده ۴ تا ۹ و با غلظت ثابت ۷۵ میکرومولار دوپامین مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۷a).



شکل ۶. پاسخ ولتاموگرام چرخه‌ای الکتروکود FA-MCFE/M-GO نسبت به دوپامین با غلظت ۳۲ میکرومولار در pH برابر ۷ و در سرعت روبش برابر با ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه.

با مقایسه مقادیر جریان در pH های مختلف، مشاهده می‌شود که بیشترین جریان مربوط به pH برابر ۷ است. بنابراین، بافر فسفات (PBS) در pH برابر ۷ به عنوان الکترولیت پشتیبان مناسب‌تر، برای مراحل آزمایش بعدی انتخاب شد. از طرف دیگر، مشاهده می‌شود که با افزایش pH، پتانسیل پیک‌های آندی (E_{pa}) به سمت مقادیر کمتر مثبت جابه‌جا

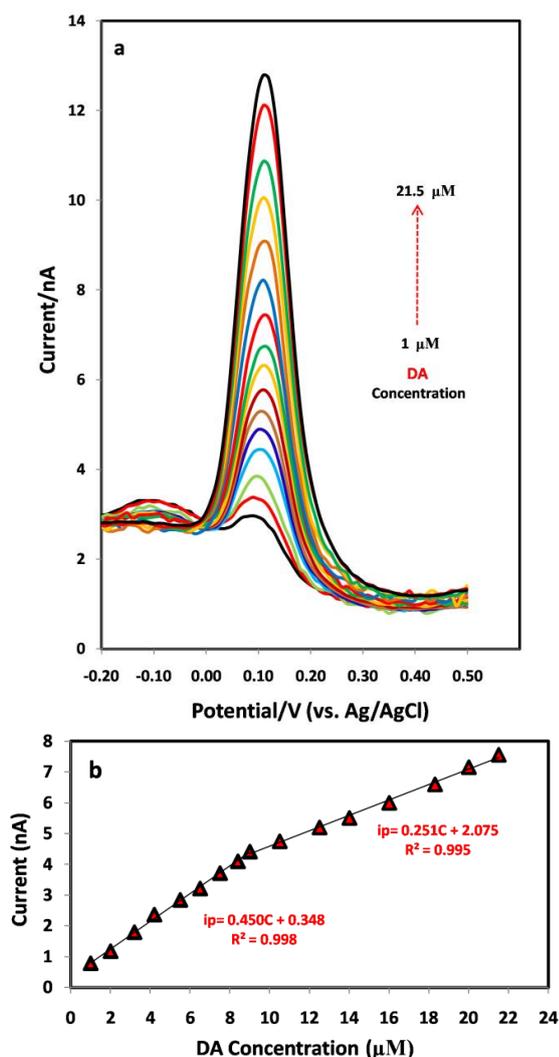
برای آزمایش تشخیص دوپامین انتخاب شد. ولتاموگرام‌های چرخه‌ای دوپامین برای این الکتروکود اصلاح شده در غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میکرومولار دوپامین، در بافر فسفات با pH برابر ۷ و با سرعت روبش ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان پیک آندی متناسب با افزایش غلظت دوپامین، افزایش پیدا می‌کند. این افزایش خطی جریان پیک با افزایش غلظت دوپامین، نشان‌دهنده رفتار الکتروشیمیایی مطلوب الکتروکود اصلاح شده و کنترل شدن فرایند، توسط نفوذ است. از رابطه بین جریان پیک اکسایشی و غلظت دوپامین، خطی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۹۲ به دست آمد؛ بنابراین، الکتروکود FA-MCFE/M-GO تشخیص الکترواکسایشی دوپامین را با سیگنال‌های قوی و کاملاً مشخص امکان‌پذیر کرد.



شکل ۵. پاسخ ولتاموگرام چرخه‌ای الکتروکود FA-MCFE/M-GO نسبت به غلظت‌های مختلف دوپامین در pH برابر ۷ و در سرعت روبش برابر با ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه (a) همراه با منحنی کالیبراسیون دوپامین (b).

۳-۴- اندازه‌گیری الکتروشیمیایی دوپامین

ولتامتری پالس تفاضلی (DPV) برای اندازه‌گیری دوپامین در سطح الکتروود FA-MCFE/M-GO مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۸a). تحت شرایط بهینه (pH برابر ۷، دامنه پالس ۱۰۰ میلی‌ولت، زمان پالس ۱۰۰ ثانیه، عرض پالس ۱۰ میلی‌ولت و سرعت روبش پتانسیل برابر با ۲۰ میلی‌ولت بر ثانیه)، رابطه خطی بین غلظت دوپامین و جریان پیک آندی آن در محدوده غلظتی ۱ تا ۹ میکرومولار (محدوده غلظتی پایین) به صورت $i_{pa} = 0.450C + 0.348$ ($R^2 = 0.998$) و در محدوده غلظتی ۹ تا ۲۱/۵ میکرومولار (محدوده غلظتی بالا) به صورت $i_{pa} = 0.251C + 2.075$ ($R^2 = 0.995$) (شکل ۸b) و با حد تشخیص برابر با ۲۰ نانومولار به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد بالای این حسگر است.



شکل ۸. ولتامتری پالس تفاضلی دوپامین با غلظت‌های مختلف (از غلظت ۱ تا ۲۱/۵ میکرومولار) (a) و نمودار جریان پیک آندی نسبت به غلظت آن (b).

می‌شوند. این مشاهده نشان می‌دهد که در فرایند اکسایش الکتروشیمیایی دوپامین روی سطح الکتروود FA-MCFE/M-GO، یون‌های H^+ شرکت می‌کنند. رگرسیون خطی حاصل از نمودار E_{pa} نسبت به pH، معادله خطی $E_{pa} = 0.765 - 0.062$ pH را تولید کرد که در آن شیب خط برابر با ۰/۰۶۲ است که نزدیک به مقدار تئوری ۰/۰۵۹ طبق معادله نرنست است:

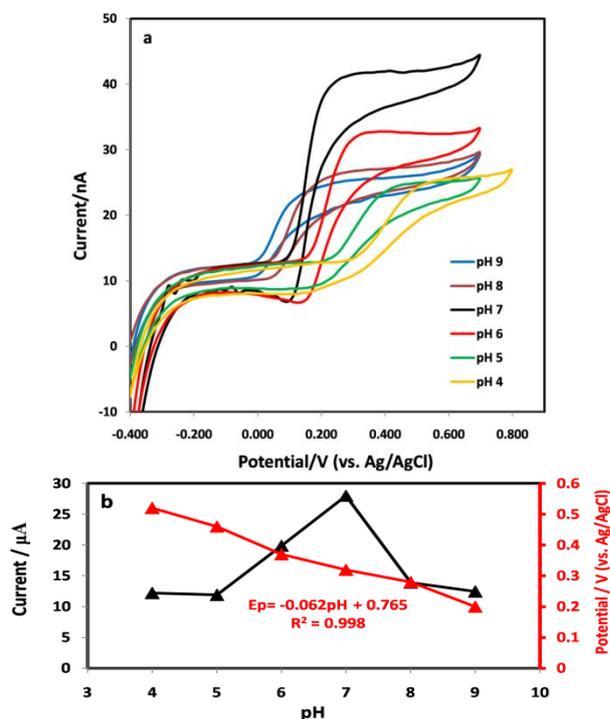
$$E = E^{0'} - \frac{0.059 \text{ mpH}}{n} \quad (1)$$

بنابراین:

$$0.062 = \frac{0.059 \text{ m}}{n} \quad (2)$$

و با بازآرایی معادله داریم: $\frac{m}{n} \cong 1$

و نشانگر این است که اکسایش الکتروشیمیایی دوپامین روی این الکتروود، با مشارکت تعداد برابری از الکترون و پروتون پیش می‌رود (۷b). در معادله فوق، m تعداد پروتون و n تعداد الکترون‌های درگیر در واکنش اکسایش دوپامین را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در اکسایش دوپامین تعداد الکترون مبادله شده برابر ۲ است؛ بنابراین تعداد پروتون درگیر در این واکنش نیز برابر با ۲ می‌باشد.



شکل ۷. (a) اثر pH روی شدت جریان و پتانسیل (b) پیک آندی دوپامین با غلظت ۷۵ میکرومولار و در سرعت روبش پتانسیل برابر با ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه.

جهت ارزیابی کارکرد این سنسور در نمونه‌های واقعی، از این حسگر برای اندازه‌گیری دوپامین در سرم انسان استفاده شد (جدول ۱). نمونه‌های زیستی با برداشتن ۲۰ میکرولیتر از سرم به‌دست‌آمده، و رقیق‌سازی ۱۰۰ برابری آن با استفاده از محلول الکترولیت ۰/۱ مولار بافر فسفات با pH برابر ۷ تهیه شد. سپس سرم رقیق‌شده به سیستم آزمایشی اضافه شد و بعد از اختلاط با غلظت‌های مختلف دوپامین، سیگنال الکتروشیمیایی آن با فن ولتامتری پالس تفاضلی مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طوری که در جدول ۱ نشان داده شده است، این حسگر بازیابی‌هایی از ۹۷/۸ تا ۱۰۶/۲٪ با مقدار $RSD \approx 1\% - 2\%$ را نشان داد که بیانگر این موضوع است که سایر تداخل‌ها نمی‌توانند در اندازه‌گیری دوپامین تأثیرگذار باشند. از این‌رو، این حسگر برای آنالیز دوپامین در سرم انسان بسیار تکرارپذیر و دقیق عمل می‌کند.

جدول ۱. نتایج اندازه‌گیری دوپامین در سرم خون انسان.

سرم انسان	غلظت تزریق‌شده	غلظت به‌دست‌آمده	درصد بازیابی	%RSD
نمونه ۱	۵	۵/۳۱	۱۰۶/۲	۱/۷
نمونه ۲	۱۰	۹/۷۸	۹۷/۸	۲/۱
نمونه ۳	۱۵	۱۴/۸۶	۹۹/۰۷	۱/۶

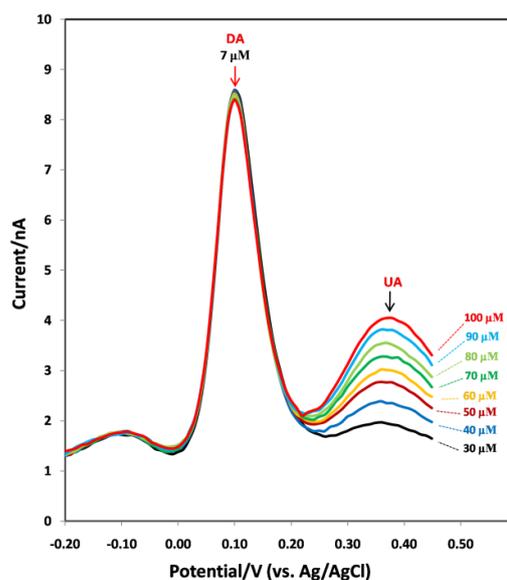
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک حسگر الکتروشیمیایی بسیار حساس و گزینش‌پذیر برای تشخیص دوپامین براساس فعال‌سازی سریع الکتروکاتالیز میکروفیبر کربن با استفاده از شعله و سپس اصلاح سطح آن با استفاده از گرافن‌اکساید سنتز شده در شرایط ملایم، به‌طور موفقیت‌آمیز ساخته شد. تحت شرایط بهینه، این حسگر دارای حساسیت بالا، محدوده خطی وسیع (از ۱ تا ۲۱/۵ میکرومولار)، حد تشخیص ۲۰ نانومتر و عاری از اثر مزاحمت یوریک‌اسید در اندازه‌گیری دوپامین است. مهم‌تر از آن، ما روشی برای توسعه یک حسگر ساده، ارزان، سریع و حساس برای تشخیص دوپامین در نمونه‌های سرم انسان ارائه دادیم.

۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه گرمسار در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

همان‌طور که می‌دانیم، پتانسیل پیک آندی برای دوپامین و یوریک‌اسید نزدیک به هم است. از این‌رو، هنگام اندازه‌گیری الکتروشیمیایی دوپامین، باید تداخل احتمالی یوریک‌اسید در نظر گرفته شود. همان‌طور که می‌دانیم، در pH برابر ۷، دوپامین بارالکتریکی مثبت ($pK_a=8.93$) اما یوریک‌اسید بارالکتریکی منفی ($pK_a=5.27$) نشان می‌دهد (Huanget. al., 2014). بنابراین، هنگامی که FA-MCFE/M-GO به‌عنوان الکتروکاتالیزور استفاده شد، دارای سطحی با توانایی تبادل کاتیونی بود که می‌توانست به‌طور انتخابی دوپامین کاتیونی را جذب کند و از رسیدن یوریک‌اسید به سطح الکتروکاتالیزور از طریق دافعه الکترواستاتیک ممانعت به‌عمل آورد. علاوه‌براین، گرافن‌اکساید موجود در سطح الکتروکاتالیزور اصلاح‌شده، نه‌تنها به‌خاطر داشتن گروه‌های آنیونی که می‌توانست دوپامین را جذب کند؛ بلکه می‌توانست توسط برهم‌کنش $\pi-\pi$ بین گرافن‌اکساید و دوپامین، سرعت انتقال الکترون را افزایش دهد. در واقع، گرافن‌اکساید موجب ایجاد یک اثر هم‌افزایی می‌شود و باعث جدایش بهتر دو پیک آندی دوپامین و یوریک‌اسید می‌شود. شکل ۹ نشان داد که جدایش پتانسیل پیک آندی دوپامین و یوریک‌اسید به‌اندازه‌ای است که می‌توان اختلال ناشی از یوریک‌اسید را در تشخیص دوپامین نادیده گرفت (جدایش پیک برابر با ۲۷۰ میلی‌ولت است). این مشاهدات، گزینش‌پذیری بالای این حسگر نسبت به دوپامین را نشان می‌دهد.



شکل ۹. ولتاموگرام‌های پالس تفاضلی، ۷ میکرومولار دوپامین و یوریک‌اسید در غلظت‌های ۳۰ تا ۱۰۰ میکرومولار در سطح الکتروکاتالیزور

FA-MCFE/M-GO

مراجع

- Chen, J., Xia, F., Ding, X., & Zhang, D. (2024). Universal Covalent Grafting Strategy of an Aptamer on a Carbon Fiber Microelectrode for Selective Determination of Dopamine In Vivo. *Analytical Chemistry*, 96(25), 10322-10331. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c01167>
- Dreye, D. R., Park, S., Bielawski, C.W. & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 228-240. <https://doi.org/10.1039/B917103G>
- Ekrami-Kakhki, M-S., Farzaneh, N., & Abbasi, S. (2019). Improved Electrocatalytic Activity of Pt-SrCoO_{3-δ} Nanoparticles Supported on Reduced Graphene Oxide for Methanol Electrooxidation. *Journal of Advanced Materials and Technology*, 8(3), 49-58. <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.93884>
- Huang, Q., Zhang, H., Hu, S., Li, F., Weng, W., Chen, J., Wang, Q., He, Y., Zhang, W., & Bao, X. (2014). A sensitive and Reliable Dopamine Biosensor Was Developed Based on the Au@Carbon Dots-Chitosan Composite Film. *Biosensors and Bioelectronics*, 52, 277-280. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.09.003>
- Kharazmi, Sh., & Alamdari, S. (2024). Electrical and Mechanical Performance of Chitosan Films Enhanced by Graphene Oxide and Silver Nanocomposites: Synthesis, Characterization, and Comparative Analysis. *Advanced Ceramics Progress*, 10(2), 32-39. <https://doi.org/10.30501/acp.2024.473596.1159>
- Madhurantakam, S., Karnam, J.B., Brabazon, D., Takai, M., Ahad, I.U., Balaguru Rayappan, J.B., & Krishnan, U.M. (2020). "Nano": An Emerging Avenue in Electrochemical Detection of Neurotransmitters. *ACS Chemical Neuroscience*, 11(24), 4024-4047. <https://doi.org/10.1021/acchemneuro.0c00355>
- Mgenge, L., Saha, C., Kumari, P., Ghosh, S. K., Singh, H., & Mallick, K. (2025). Electrochemical sensing of dopamine using nanostructured silver chromate: Development of an IoT-integrated sensor. *Analytical Biochemistry*, 698, 115726. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2024.115726>
- Rosenwald, S.E., Nowall, W.B., Dontha, N., & Kuhr, W.G. (2000). Laser Interface Pattern Ablation of a Carbon Fiber Microelectrode: Biosensor Signal Enhancement after Enzyme Attachment. *Analytical chemistry*, 72(20), 4914-4920. <https://doi.org/10.1021/ac000442t>
- Seven, F., Golcez, T., & Sen, M. (2020). Nanoporous carbon-fiber microelectrodes for sensitive detection of H₂O₂ and dopamine. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 864, 114104. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114104>
- Strand, A.M., & Venton, B.J. (2008). Flame Etching Enhances the Sensitivity of Carbon-Fiber Microelectrodes. *Analytical Chemistry*, 80(10), 3708-3715. <https://doi.org/10.1021/ac8001275>
- Takmakov, P., Zachek, M.K., Keithley, R.B., Walsh, P.L., Donley, C., McCarty, G.S., & Wightman, R.M., (2010). Carbon Microelectrode with a Renewable Surface. *Analytical Chemistry*, 82(5), 2020-2028. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac902753x>
- Valikchalia, F. G., Rahimnejad, M., Ramiarb, A., & Ezojic, M. (2022). Diagnostics Devices for Improving the World: μPADs Integrated with Smartphone for Colorimetric Detection of Dopamine. *International Journal of Engineering*, 35(9), 1723-1727. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.09C.07>
- Xu, Y., Sheng, K., Li, C., & Shi, G. (2011). Highly Conductive Chemically Converted Graphene Prepared from Mildly Oxidized Graphene Oxide. *Journal of Material Chemistry*, 21(20), 7376-7380. <https://doi.org/10.1039/C1JM10768B>
- You, X., Yang, S., Li, J., Deng, Y., Dai, L., Peng, X., Huang, H., Sun, J., Wang, G., He, P., Ding, G., & Xie, X. (2017). Green and Mild Oxidation: An Efficient Strategy toward Water-Dispersible Graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(3), 2856-2866. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13703>