



The effect of Nitrogen-doped on the optical behavior of graphene quantum dots

Maryam Nazari¹, Hamid Reza Baharvandi^{2*}, Naser Ehsani²

¹ PhD Student, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

² Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

*Corresponding Author's Email: h.r.baharvand@gmail.com (Hamid Reza Baharvandi)

Paper History:

Received: 2025-10-06

Revised: 2025-11-07

Accepted: 2025-12-27

Keywords:

Graphene Quantum Dots,
Nitrogen Doping,
Ammonium Hydroxide,
UV-Vis Absorption,
Photoluminescence

Abstract Graphene quantum dots are a class of carbon nanoparticles with tunable quantum properties, making them suitable for optical, non-electrical, biosensing, and energy applications, particularly in solar cells. In this study, these nanomaterials were functionalized using a simple, rapid, and convenient method with ammonium hydroxide as a nitrogen source. Nitrogen agents were added to graphene quantum dots at concentrations of 0, 2, 4, and 6 mol/L. To characterize the products, Raman spectroscopy, FTIR analysis, photoluminescence (PL), and UV-vis absorption measurements were performed. Surface morphology and interlayer spacing were examined using high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM). FTIR results confirmed the presence of C-C and C-O bonds in the graphene quantum dots and indicated the formation of C-N and N-H bonds associated with nitrogen incorporation. Raman spectroscopy showed a relatively high ID/IG ratio in the functionalized samples, approximately 20% higher than in the pristine sample, reflecting the creation of structural defects. The increase in UV-vis absorption intensity also suggests the presence of nitride-like species on the surfaces of the graphene quantum dots. Photoluminescence studies in the excitation wavelength range of 320–420 nm revealed a strong emission peak around 500 nm, accompanied by enhanced fluorescence. These improved optical properties indicate that nitride-functionalized graphene quantum dots are promising nanoscale carriers for solar cells, optoelectronic devices, grating-sensor-based systems, and energy technologies, with the potential to enhance both efficiency and stability.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.549469.1341>

URL: https://www.jamt.ir/article_238538.html

1. INTRODUCTION

In recent years, graphene quantum dots (GQDs) have emerged as a novel member of the carbon family, introducing significant advancements in materials science. GQDs have attracted attention due to their high surface-to-volume ratio, low toxicity, excellent water solubility, good electrical conductivity, favorable chemical properties, biocompatibility, and remarkable optical characteristics. These properties have led to their application in various fields, including electrochemical cells, supercapacitors, sensors, displays, and biomedical and pharmaceutical applications ([Bacon, Bradley, & Nann, 2014](#))[Ref1](#).

One approach to enhancing the properties of GQDs is through doping, which involves introducing desired elements into the structure or on the surface of the quantum dots, thereby creating favorable modifications in their properties ([Tian, Tang, Teng, & Lau, 2018](#))[Ref2](#). Elements such as boron, nitrogen, sulfur, and phosphorus have been incorporated into GQDs to improve their optical, electronic, and chemical characteristics ([Lee et al., 2022](#) [Ref3](#); [Wu & Zhao, 2015](#); [Xu et al., 2017](#) [Ref4](#)). Functionalization can be achieved through chemical, electrochemical, physical, optical, biological methods, or a combination thereof.

2. MATERIALS AND METHODS

GQDs were synthesized using L-glutamic acid as the carbon source via pyrolysis at 220°C for 60 seconds, following the method of ([Tian et al., 2018](#))[Ref2](#). Ammonium hydroxide was employed as a nitrogen source for functionalization. In this procedure, GQDs were mixed with ammonium hydroxide at concentrations of 0, 2, 4, and 6 mol/L in a 1:1 weight ratio and stirred for 10 minutes at ambient temperature using a magnetic stirrer, resulting in nitrogen-functionalized GQDs. High-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) was used to examine the surface morphology, structure, and lattice parameters of the nitrogen-doped GQDs. Raman spectroscopy was performed to analyze structural changes in pristine and nitrogen-functionalized GQDs. Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy was conducted to identify functional groups and confirm successful nitrogen incorporation. Ultraviolet-visible (UV-vis) absorption and photoluminescence (PL) spectroscopy were employed to characterize optical properties and evaluate the effect of nitrogen content on GQD performance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The examination of functional groups in the FTIR range of 500–14,000 cm⁻¹ shows that in the 0N sample, the C=C and C=O bonds (carbon and oxidation groups)

Please cite this article as: Nazari, M., Baharvandi, H. R., & Ehsani, N. (2025) The effect of Nitrogen-doped on the optical behavior of graphene quantum dots. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 14, No. 3, 66-77. [in Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.549469.1341>

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

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



at 3000, 1500, and 1680 cm^{-1} , respectively, confirm the formation of graphene quantum dots. In the 4N sample, the presence of stretching C–N and bending N–H vibrational modes at 1246 and 2896 cm^{-1} , respectively, confirms the presence of nitrogen functional groups in graphene quantum dots, and C–N in the region of 1250–1000 cm^{-1} indicates the success of nitrogen functionalization. The groups containing oxygen and nitrogen also suggest high aqueous solubility and stability of the products in solution.

The results of Raman spectroscopy in the 1200–1800 cm^{-1} region show that in the 0N sample, the D and G peaks appear at 1350 and 1580 cm^{-1} , respectively. In this analysis, the D peak is attributed to defects in the structure, and the G peak indicates graphitic sp^2 bonding states. In the 6N sample, more defects and irregularities are introduced due to the presence of nitride agents in the graphene quantum dot structure, and the formation of N–C or N–N bonds causes the D and G peaks to shift to higher wavenumbers. Therefore, the disruption of the edges of the carbon atoms due to the presence of nitrogen in the network, and the changes resulting from the interaction between nitrogen atoms and the carbon structure, cause the peaks to appear in different regions. This is observed in Figure 4, where the 6N sample shows greater intensity than the 0N sample. The increase in the spectral background and the slight changes in the G-band shape indicate a change in the electronic order and the sp^2 (graphitic) structure of the system.

Structural studies and morphology images by HRTEM show uniform morphology and distribution of nitride-functionalized graphene quantum dot particles. The particle distribution is nearly uniform in size, with more than 100 particles measuring 5 nm identified after analysis.

In the absorption spectroscopic evaluation of the 0N sample, the sample exhibits an absorption peak in the range of 230–240 nm, corresponding to the $\pi \rightarrow \pi^*$ transition of the C=C double bonds in the graphene quantum dot structure. In the functionalized sample, a weaker peak appears around 300 nm, attributed to the $n \rightarrow \pi^*$ transition associated with nitrogen-containing groups. The significant increase in the absorption intensity of this sample confirms the presence of the nitride agent and the modification of the electronic structure of the GQD.

The intrinsic fluorescence emission of the 0N sample exhibits a peak of moderate intensity, attributed to the presence of defect centers and functional groups, such as –OH and –COOH. In the 6N sample, with increasing nitrogen content and the presence of nitrogen-containing functional groups, the emission peak shifts to longer wavelengths. Nitrogen functional groups also increase the emission intensity. The presence of nitrogen in the graphene π -graphene quantum dot layer introduces new defects that enhance the fluorescence emission.

4. CONCLUSION

- The chemical functionalization of graphene quantum dots using an ammonium hydroxide source was successful.
- Both pristine graphene quantum dots and the functionalized samples exhibit the characteristic D and G bands in Raman spectroscopy.

- FTIR analyses indicate the presence of C=C and C=O bonds in graphene quantum dots, along with C–N and N–H functionalities associated with nitrogen groups.
- HRTEM reveals the spherical morphology of nitrogen-functionalized graphene quantum dot particles, with the highest frequency corresponding to particles approximately 5 nm in diameter.
- The presence of nitrogen groups on the surfaces of graphene quantum dots provides the basis for the creation of additional light-absorption centers, leading to an increase in absorption intensity.
- Investigation of photoluminescence properties shows that nitrogen groups enhance emission intensity and stabilize the fluorescence, with Sample 4N, the optimized sample, exhibiting the best optical properties.

ACKNOWLEDGEMENT

This article is an excerpt from the PhD thesis in Materials Science at Malek Ashtar University of Technology. The authors acknowledge the financial support provided by the university.

REFERENCES

- 1- Bacon, M., Bradley, S. J., & Nann, T. (2014). Graphene quantum dots. *Particle & Particle Systems Characterization*, 31(4), 415-428. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201300252>
- 2- Tian, P., Tang, L., Teng, K., & Lau, S. (2018). Graphene quantum dots from chemistry to applications. *Materials today chemistry*, 10, 221-258. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.09.007>
- 3- Lee, S. Y., Kwon, M., Raja, I. S., Molkenova, A., Han, D.-W., & Kim, K. S. (2022). Graphene-based nanomaterials for biomedical imaging. In *Multifaceted Biomedical Applications of Graphene* (pp. 125-148): Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4923-3_7
- 4- Wu, X., & Zhao, J. X. (2015). Fabrication of highly fluorescent graphene quantum dots using L-glutamic acid for in vitro/in vivo imaging and sensing. *Proceedings of the North Dakota Academy of Science*, 69, 27A-27A. <https://link.gale.com/apps/doc/A434223475/AONE?u=anon~9dac5e5f&sid=googleScholar&xid=20f6ca4c>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

تأثیر میزان عامل نیتروژن بر رفتار نوری نقاط کوانتومی گرافن

مریم نظری^۱، حمیدرضا بهاروندی^{۲*}، ناصر احسانی^۲^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران^۲ استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

کلیدواژه‌ها:

نقاط کوانتومی گرافن،

عامل نیتروژن،

آمونیم هیدروکساید،

جذب مرئی فرابنفش،

فتولومینسانس

چکیده نقاط کوانتومی گرافن نوعی نانوذرات کربنی هستند که به دلیل برخورداری از خواص کوانتومی قابل تنظیم، گزینه مناسبی برای کاربردهای نوری، اپتوالکترونیکی، حسگرهای زیستی و انرژی به ویژه سلول‌های خورشیدی محسوب می‌شوند. در این پژوهش این نانوماده ارزشمند با استفاده از روشی راحت، سریع و آسان از آمونیم هیدروکساید به عنوان منبع نیتروژن، عامل دار شده است. بدین منظور ابتدا میزان عامل نیتروژن در مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ مول بر لیتر به نقاط کوانتومی گرافن اضافه شد. سپس برای ارزیابی ویژگی‌های محصول، طیف‌سنجی رامان، آنالیز FTIR، فتولومینسانس PL و جذب UV-vis انجام گرفت. همچنین ریخت‌شناسی سطح و فاصله صفحات توسط میکروسکوپ الکترونی با قدرت تفکیک بالا HRTEM بررسی شد. در نتایج FTIR، C=O و C=C وجود نقاط کوانتومی گرافن و C-N و N-H، حضور عامل‌های نیتروژن را تأیید می‌کنند. نتایج طیف‌سنجی رامان، بالا بودن مقدار ID/IG در نمونه عامل‌دار شده در مقایسه با نمونه پایه، به میزان حدود ۲۰٪ را به دلیل ایجاد نقایص ساختاری تأیید می‌کند. همچنین افزایش میزان شدت جذب، حضور عوامل نیترویدی روی سطوح گرافن کوانتوم‌دات را نشان می‌دهد. بررسی‌های فتولومینسانس در محدوده طول‌موج‌های برانگیختگی ۳۲۰-۴۲۰ nm نیز با تقویت تابش فلورسانس، ظهور یک پیک قوی در حدود ۵۰۰ nm را نشان می‌دهد. خواص نوری بهبود یافته نشان می‌دهد نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیترویدی از پتانسیل بالایی به عنوان نانو حامل‌های فعال نوری در سلول‌های خورشیدی، سامانه‌های فتوالکترونیکی، تجهیزات بر پایه حسگرهای نوری و فناوری‌های انرژی نو، برخوردارند و می‌توانند موجب افزایش بازده و پایداری عملکرد آنها شوند.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.549469.1341>URL: https://www.jamt.ir/article_238538.html

۱- مقدمه

بالا، سمیت پایین، حلالیت عالی در آب، رسانایی الکتریکی خوب، خواص شیمیایی و زیست‌سازگاری مناسب، خواص نوری عالی و غیره (Bacon et al., 2014; Chen et al., 2018; X. Li et al., 2015; Tian et al., 2018; Zheng & Wu, 2017). اتم‌های کربن با قرار گرفتن در شبکه شش‌ضلعی (شانه‌عسل مانند) دارای پیوند کووالانسی با سه اتم دیگر کربن هستند و مشخصات SP^2 هیبرید شده را می‌دهند که منجر به حضور الکترون‌های غیرمستقر در اوربیتال عمودی π می‌شود. این اتفاق

در آغاز قرن ۲۱ میلادی نقاط کوانتومی گرافن‌ها^۱ به عنوان عضو جدیدی از خانواده کربن‌ها توسط گایم^۲ و نووسلوف^۳ کشف شدند و آغازگر تحولی نوین در دنیای علم و مواد شدند (Tian et al., 2018). نقاط کوانتومی گرافن‌ها ساختار صفر بُعدی دارند و از یک لایه اتمی کربن به هم پیوسته تشکیل شده‌اند که زیرمجموعه مواد گرافنی قرار می‌گیرند و به دلیل ابعاد نانومتری، از ویژگی‌های خاصی برخوردارند. از جمله: نسبت سطح به حجم

3. Novoslov

1. Graphene Quantum Dot (GQD)
2. Gayam

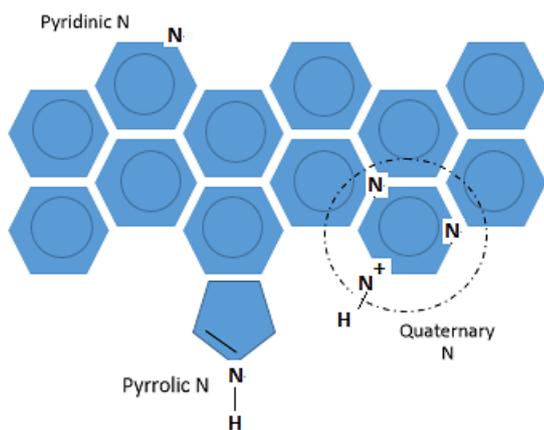
اتمی نیتروژن و کربن به ترتیب ۷ و ۶). همچنین الکترون‌گاتیوی نیتروژن با مقدار ۳/۰۴ بیشتر از الکترون‌گاتیوی کربن با مقدار ۲/۵۵ است (الکترون‌گاتیویته تمایل یک عنصر به جذب الکترون در داخل یک پیوند شیمیایی است). بدین ترتیب عامل نیتروژن به راحتی به عنصر کربن در شبکه نقاط کوانتومی گرافن متصل شده و یا به صورت جانشین در ساختار قرار می‌گیرد؛ بنابراین ویژگی‌های الکترونی نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده به واسطه ذرات نیتروژن ذاتاً تغییر می‌کند. نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیتروژن به دلیل برخورداری از سطح وسیع، لبه‌های بسیار و ساختار بلوری مناسب، هدایت الکتریکی مناسبی دارند و عامل نیتروژن در آنها موجب بهبود فعالیت‌های الکتروشیمیایی می‌شود. کاربرد عمده این دسته از مواد، در سنسورها، سلول‌های سوختی، باتری‌ها و فتوکاتالیست‌ها خلاصه می‌شود ([Kaur et al., 2018](#); [Tian et al., 2018](#)). منابع متفاوت نیتروژن عبارت‌اند از: نمک‌ها، ترکیبات نیتروژن‌دار معدنی و آلی معدنی (نیترات و نیتريت‌ها، NaNO_2 , NaNO_3)، آمونیاک NH_3 ، مواد نیتروژن‌دار آلی (تیانین، پلی‌امید، پلی‌آکریلیک‌اسید نیتروژن‌دار، ایزوپریل نیتروژن) و گاز نیتروژن فعال‌شده. همچنین ترکیبات اورگانیک نیز به عنوان منبع اولیه نیتروژن گزارش شده است ([Kaur et al., 2018](#)). نقاط کوانتومی گرافن (گرافن کوانتوم‌دات) از طریق روش‌های شیمیایی، الکتروشیمیایی، فیزیکی، نوری، بیولوژیکی و زیستی و یا روش‌های ترکیبی (تلفیقی از روش‌های عنوان‌شده) عامل‌دار می‌شود. در این میان روش شیمیایی به منظور عامل‌دار کردن سطح زیادی از حجم ماده، کاربرد دارد و معمولاً از طریق واکنش‌های شیمیایی، عامل موردنظر به راحتی روی سطح نقاط کوانتومی گرافن قرار می‌گیرد. همچنین تجهیزات این روش ساده، ارزان و در دسترس است ([Sadeh Hassani & Samiee, 2021](#); [Tian et al., 2018](#)).

نوع پیوند نیتروژن و موقعیت قرارگیری نیتروژن در ساختار شبه‌لانه‌زنبوری نقاط کوانتومی گرافن از عوامل مهم و تأثیرگذار بر خواص سطحی و شیمیایی محصول است. این مسئله بر خصوصیات نوری، الکتریکی و شیمیایی، تأثیر مستقیم دارد. پیوندهای میان کربن و عامل نیتروژن در سه نوع پیرولیک^۱، پیرنیک^۲ و کوآترنری^۳ وجود دارد.

منجر به ظهور خواص نوری و الکتریکی ویژه‌ای در نقاط کوانتومی گرافن می‌شود؛ هرچند نوع لبه نقاط کوانتومی گرافن (زیگزاگ‌مانند و یا دسته‌صندلی) بر خواص نوری آن تأثیر بسزایی دارد ([Tian et al., 2018](#)).

اندازه ذرات نقاط کوانتومی گرافن و نوع لبه بر خواص شیمیایی و فیزیکی ماده مؤثر است. هرچه ذرات ریزتر باشند، گاف انرژی بیشتر می‌شود و خواص فتولومینسانس و هدایت الکتریکی نقاط کوانتومی گرافن تغییر می‌کند. مجموعه این خواص موجب شده که به سرعت در زمینه سلول‌های خورشیدی ([Khan & Kim, 2019](#))، ابرخازن‌ها ([X. Li et al., 2015](#))، حسگرها ([S. Zhang et al., 2016](#))، نمایشگرها ([Durodola et al., 2022](#))، صنعت پزشکی ([Ranjbar Navaziet al., 2017](#))، فتولتائیک ([Badici et al., 2014](#)) و دارویی ([Chung et al., 2021](#); [Moniri Javadhesari et al., 2022](#)) کاربرد یابد و توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کند. این ماده به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند هیدروکسیل‌ها و کربوکسیل‌ها از پتانسیل بسیاری جهت بهبود و ارتقای خواص برخوردار است. روش‌های اصلاح خواص نقاط کوانتومی گرافن از طریق کنترل شکل و اندازه، اصلاح سطح و عامل‌دار ساختن سطح ماده رخ می‌دهد ([Tian et al., 2018](#)). یکی از روش‌های بهبود خواص نقاط کوانتومی گرافن‌ها، وارد کردن عناصر موردنظر (عامل‌دار کردن) در ساختار و یا سطح نقاط کوانتومی گرافن است و بدین ترتیب می‌توان خواص و ویژگی‌های مطلوب را در ماده ایجاد کرد ([Tian et al., 2018](#)). گزارشات نشان می‌دهد عناصر مختلفی از جمله بور ([Lee et al., 2022](#))، نیتروژن^{۱۳}، فسفر ([Xu et al., 2017](#))، گوگرد ([Afsharipour et al., 2022](#)) و غیره در ساختار نقاط کوانتومی گرافن به منظور بهبود خواص وارد شده است. همچنین تحقیقات صورت‌گرفته نشان می‌دهد ورود این عناصر به صورت تنها، دوتایی و یا ترکیبی از آنها با موفقیت انجام شده است ([Chen et al., 2018](#); [Tian et al., 2018](#)).

اولین بار در سال ۲۰۱۰ میلادی نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیتروژن تولید و مورد بررسی قرار گرفت ([Kaur et al., 2018](#)). مجاورت نیتروژن با کربن در جدول تناوبی، مشابهت عدد اتمی این دو عنصر را به یکدیگر بیشتر کرده است (عدد



شکل ۱. وضعیت پیوندهای نیتروژن در نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده توسط نیتروژن

گلوتامیک‌اسید به دلیل دارا بودن گروه آمینو، گروه‌های فعالی روی سطح دارد که زمینه را جهت بهسازی و اصلاح سطح مناسب می‌سازد؛ بنابراین پیش‌بینی می‌شود نقاط کوانتومی گرافن سنتز شده شرایط مناسبی به منظور عامل‌دار شدن توسط نیتروژن دارا باشند (Wu & Zhao, 2015). این گزارش معتقد است که تاکنون تحقیق مشابهی در خصوص بررسی خواص نقاط کوانتومی گرافن سنتز شده از منبع گلوتامیک‌اسید و عامل‌دار شده نیتریدی از منبع آمونیوم‌هیدروکساید صورت نگرفته است. در این تحقیق پس از سنتز نقاط کوانتومی گرافن به روش کربونیزاسیون، تأثیر مقادیر مختلف عامل نیتروژنی (۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ مول بر لیتر) مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاکه فتولومینسانس توسط دو پارامتر گروه‌های عاملی و اندازه کوانتومی تغییر می‌کند، بنابراین بررسی پارامتر غلظت عامل نیتروژنی، تغییرات در ساختار گرافن کوانتوم‌دات را به دنبال داشته و در ادامه، به بررسی خواص نشری آنها می‌پردازیم.

۲- مواد و روش تحقیق

نقاط کوانتومی گرافن از منبع اولیه کربنی گلوتامیک‌اسید^۱ (ساخت شرکت مرک آلمان) با استفاده از روش پیرولیز و براساس مقاله لو^۱ و همکارانش سنتز شد (Luo et al., 2018). در ادامه، به منظور عامل‌دار کردن از طریق نیتروژن از آمونیوم‌هیدروکساید^۲ با فرمول شیمیایی NH₄OH (ساخت شرکت مرک آلمان با جرم مولی ۳۵/۰۴ g/mol) به عنوان منبع تأمین‌کننده نیتروژن استفاده شد. در این روش، نقاط کوانتومی گرافن با نسبت وزنی ۱:۱ با مقادیر مختلفی از

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در پیوند پیرولیک، نیتروژن در حلقه پنج‌تایی از پیوند (پیرولیک) قرار دارد، بدین‌ترتیب که یک اتم نیتروژن در ساختار حلقه پنج‌عضوی قرار می‌گیرد و در آن هر اتم نیتروژن با دو اتم کربن پیوند دارد؛ درحالی‌که در پیوند پیرندیک، نیتروژن در ساختار حلقه شش‌تایی (پیرین) قرار می‌گیرد؛ یعنی در سطح حلقه قرار گرفته و هر اتم نیتروژن با دو اتم کربن پیوند برقرار می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در ساختار حلقه دیگری قرار ندارد. این نوع نیتروژن، یک جفت الکترون آزاد دارد که به صورت زوج lone pair روی نیتروژن قرار می‌گیرد. این پیوندها در ساختارهای کاتالیزوری و سایت‌های فعال در واکنش‌های سطحی تأثیر بسزایی دارند. در پیوندهای نیتروژنی کواترنری، اتم نیتروژن با چهار اتم کربن پیوند دارد. در حقیقت به صورت اتم جانشین در ساختار نقاط کوانتومی گرافن، جایگزین اتم کربن می‌شود و دو پیوند یگانه یا چندگانه با کربن دارد و در ساختار شبکه تثبیت می‌شود. این نوع پیوند در افزایش رسانایی، مقاومت به اکسیداسیون، بهبود خواص نوری و الکتریکی، همچنین افزایش میزان حجم فعالیت‌های سطحی مؤثر است (Kaur et al., 2018). تحقیقات نشان می‌دهد عامل نیتروژن در نقاط کوانتومی گرافن، موجب افزایش رسانایی (به واسطه خاصیت الکترون‌دوستی موجب بهبود هدایت الکتریکی و کاهش مقاومت سطحی می‌شود)، بهبود خواص سطحی و پایداری آن (باتوجه به اصلاح ساختار صورت گرفته می‌تواند مقاومت به اکسیداسیون را افزایش دهد)، بهبود خواص نوری و الکتریکی، همچنین بهبود خواص کاتالیزوری در واکنش‌های شیمیایی می‌شود (Kaur et al., 2017; Xu et al., 2018). نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیتریدی در سنسورها، سلول‌های سوختی، باتری‌ها، کاتالیزورها، فتوکاتالیست‌ها، LEDها، تصاویر زیستی و رهایش دارو کاربرد دارند.

optics و طول‌موج لیزر ۵۳۲ نانومتر انجام شد. آزمایش طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرسرخ^۲ با استفاده از دستگاه مدل FTIR 27 Bruker Tensor Spectrophotometer به‌منظور شناسایی و بررسی گروه‌های عاملی نقاط کوانتومی گرافن و همچنین حالت عامل‌دار شده آن انجام شد.

به‌منظور مشخصه‌یابی و بررسی تأثیر میزان غلظت عامل نیتروژن در تمام نمونه‌ها، از جذب مرئی فرابنفش^۳ با مدل Camspec M350 spectrophotometer و نشر فتولومینسانس^۴ با استفاده از دستگاه Ava-light-DH-S استفاده شد.

جدول ۱. جدول شناسه‌گذاری نمونه‌ها

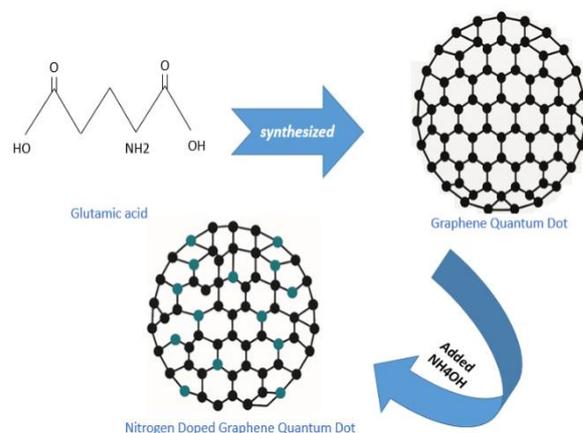
میزان آمونیوم‌هیدروکساید (mol/lit)	شناسه نمونه
۰	0N
۲	2N
۴	4N
۶	6N

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز طیف‌سنجی فرسرخ تبدیل فوریه FTIR

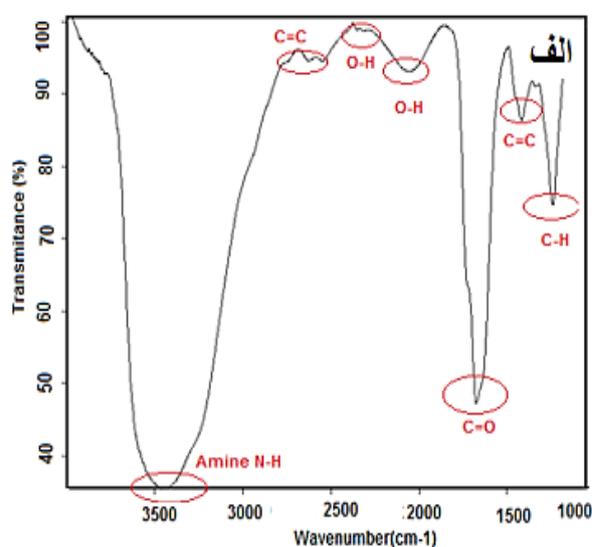
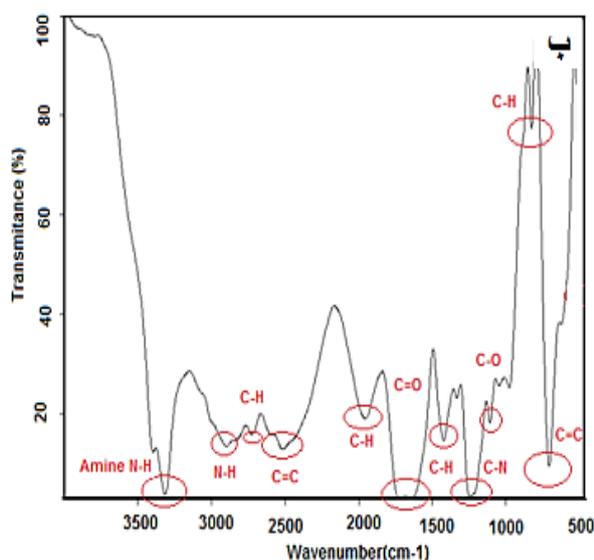
جهت بررسی تغییرات ساختاری نقاط کوانتومی گرافن و حالت عامل‌دار شده نیتروژن، مشخصات آنها با استفاده از FTIR مورد آنالیز قرار گرفت. طیف تبدیل فوریه فرسرخ نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی گروه‌های عاملی در گستره $500-4000 \text{ cm}^{-1}$ نشان می‌دهد که پیوندهای C=C و

آمونیوم‌هیدروکساید مخلوط شد (۰، ۰/۲، ۴ و ۶ مول بر لیتر) و با همزن مغناطیسی به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط همزده شد. محصول نهایی به صورت نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیتروژن به دست آمد. در شکل ۲ طرحواره انجام کار نشان داده شده است. همچنین نمونه‌های ساخته شده براساس مقادیر مختلفی از آمونیوم‌هیدروکساید به کار رفته، شناسه‌گذاری شده و اطلاعات آنها در جدول ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۲. طرحواره سنتز و عامل‌دار کردن نقاط کوانتومی گرافن

جهت بررسی ریخت‌شناسی سطح نقاط کوانتومی گرافن، بررسی ساختار و پارامتر اندازه شبکه از میکروسکوپ انتقالی الکترونی با وضوح بالا^۱ با مشخصات 200Kv Schottky field emitter استفاده شد. طیف‌سنجی رامان به‌منظور بررسی نقاط کوانتومی گرافن و عامل نیتروژن در آن توسط دستگاه Ocean

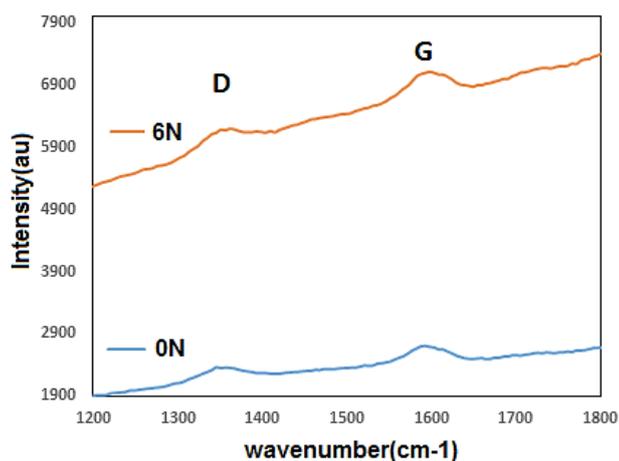


شکل ۳. نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز الف) نمونه 0N و ب) 4N

3. UV-vis Spectroscopy
4. Photoluminescence

1. High Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM)
2. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ارتعاشی E2g دامنه آروماتیک گرافن کوانتوم‌دات بوده و به بلورینگی ماده مربوط است. همان‌طور که اشاره شد باند D در ارتباط با عیوب تولیدشده روی سطح گرافن کوانتوم‌دات است که در تطابق با بی‌نظمی‌ها بوده، باعث تخریب SP² شده و معمولاً توسط اتصال توابع و عوامل اکسیژن شکل می‌گیرد. در نمونه 0N پیک D و G به ترتیب در مقادیر ۱۳۵۰ و ۱۵۸۰ cm⁻¹ ظاهر می‌شوند. در این آنالیز پیک D به دلیل ایجاد نقص در ساختار ایجاد می‌شود و پیک G نشان‌دهنده حالت‌های الکترون‌دوستی و پیوندهای C-C است. در نمونه 6N، نقص‌ها و بی‌نظمی‌ها با حضور عوامل نیتروژن در ساختار نقاط کوانتومی گرافن، افزایش یافته است. همچنین تشکیل پیوندهای N-C و یا N-N، موجب جابجایی پیک در باندهای D و G به مقادیر بیشتر شده است. بنابراین اختلال در لبه‌های اتم‌های کربن نیز به دلیل حضور ذرات نیتروژن در شبکه و همچنین تغییرات ناشی از برهم‌کنش بین اتم‌های نیتروژن و ساختار کربن موجب شده است تا پیک‌ها در مناطق متفاوتی ظاهر شوند. این مسئله در شکل 6N با مقدار شدت بیشتری نسبت به نمونه 0N مشاهده می‌شود. افزایش زمینه طیف و تغییرات جزئی در شکل باند G حاکی از تغییر در نظم الکترونی و ساختار SP² سیستم است. این نتایج در تطابق با گزارشات وو^۱ (Wu & Zhao, 2015) و لو^۲ (Luo et al., 2018) می‌باشند.



شکل ۴. مقایسه نتایج طیف‌سنجی رامان در دو نمونه 0N و 6N در بررسی دیگری از نتایج طیف‌سنجی رامان، با استفاده از شدت I_D/I_G و براساس رابطه Cancado اندازه ذرات نیز محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

$$I_D/I_G = C_{532} \times 1/La \quad (1)$$

C=O (گروه‌های کربنی و اکسیداسیون) به ترتیب در ۳۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۶۸۰ cm⁻¹ تشکیل نقاط کوانتومی گرافن را تأیید می‌کند (Wu & Zhao, 2015). ظهور پیوند کششی-ارتعاشی آمین N-H در ۳۳۶۰ cm⁻¹ نشان‌دهنده حضور گروه‌های آمین در گرافن کوانتوم‌دات است.

در بررسی حالت عامل‌دارشده نیتروژنی، نوارهای اصلی در ۷۰۶ و ۳۳۰۰ cm⁻¹ دیده می‌شوند که به ترتیب مربوط به پیوند کششی C=C و آمین کششی است. حضور پیوندهای ارتعاش C-N کششی و N-H خمشی به ترتیب در ۱۲۴۶ و ۲۸۹۶ cm⁻¹ حضور عامل‌های نیتروژن را در نقاط کوانتومی گرافن تأیید می‌کند (Luo et al., 2018; Wang et al., 2016) و C-N در ناحیه ۱۲۵۰-۱۰۰۰ cm⁻¹ نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن فرایند عامل‌دار شدن توسط نیتروژن است. پیک پهن با مساحت ۱۶۰۰-۱۴۰۰ cm⁻¹ مربوط به پیوند کششی C=O است. در این میان پیک قوی مشاهده شده در ۷۰۸ cm⁻¹ مربوط به ترکیب C=C در نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دارشده نیتروژنی می‌باشد. شدت پیوندهای C=C آروماتیک و C=O کربوکسیل، دلیل حضور گروه‌های اکسیژن سطحی است که مقدار آن در مقایسه با نتایج نقاط کوانتومی گرافن، کاهش یافته است و این مسئله به دلیل جایگزینی عامل نیتروژن، منطقی است. همچنین C=C در ۲۵۱۵ cm⁻¹ نیز مشاهده می‌شود. آمین کششی-ارتعاشی در هر دو منحنی در ۳۳۱۲ cm⁻¹ نشان‌دهنده حضور گروه‌های آمین در نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دارشده است. گروه‌های شامل اکسیژن و نیتروژن نیز نشان‌دهنده حلالیت آبی بالا و پایداری در محلول محصولات به دست آمده می‌باشد.

۳-۲- طیف‌سنجی رامان

به منظور بررسی تغییرات ساختاری نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دارشده توسط نیتروژن از آنالیز طیف‌سنجی رامان در ناحیه ۱۸۰۰-۱۲۰۰ cm⁻¹ استفاده شد. چنانچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نتایج طیف‌سنجی رامان در دو حالت پایه (0N) و عامل‌دارشده (نمونه 6N)، با هم مقایسه شده است. باند D مربوط به نقایص ساختاری و لبه‌ای و تخریب شبکه SP² توسط پیوندهای SP³ از شبکه کربن می‌باشد؛ درحالی‌که باند G مربوط به ارتعاش کششی پیوندهای SP² اتم‌های کربن در نقاط کوانتومی گرافن است. در حقیقت باند G برای حالت‌های

که در آن

La: اندازه متوسط دانه بلوری (nm)

I_D/I_G : نسبت شدت پیک D به G (با استفاده از شکل ۴

محاسبه می‌شود)

$C(\lambda_L)$: یک پارامتر وابسته به طول موج است که باتوجه به

دستگاه مورد استفاده در طیف‌سنجی، 532nm در نظر گرفته

می‌شود.

جدول ۲. نتایج محاسبات رابطه Cancado

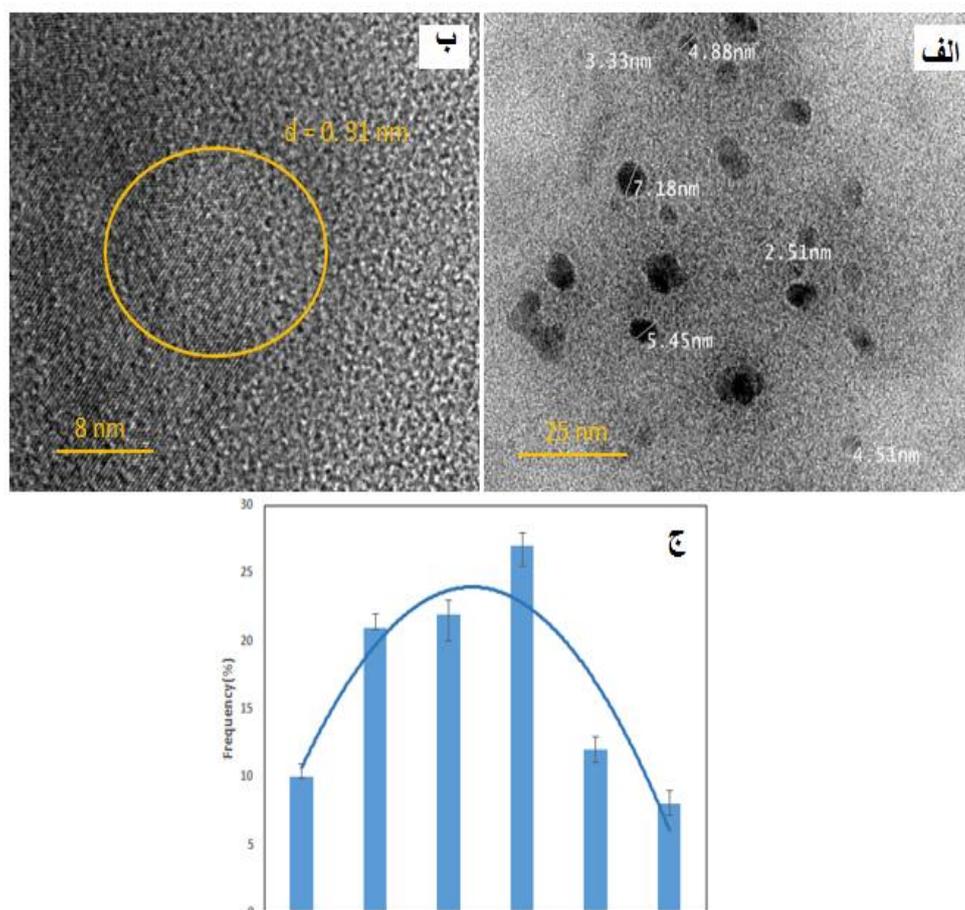
شناسه نمونه	I_D/I_G	La براساس معادله Cancado (nm)	La براساس HRTEM (nm)
0N	۰/۷۱۴	۷/۱۴	۷
6N	۰/۸۶	۵/۹۳	۸

از مقایسه نتایج، مشاهده می‌شود که بالا بودن میزان I_D/I_G در نمونه 6N در مقایسه با نمونه 0N به میزان حدوداً ۲۰ درصد، تأییدی بر وجود مقادیر نسبتاً زیاد نقص ایجاد شده در ساختار توسط عوامل نیتريدی است. همچنین عامل دار کردن نقاط کوانتومی گرافن با عامل نیتريدی، به کاهش ذرات در مقایسه با

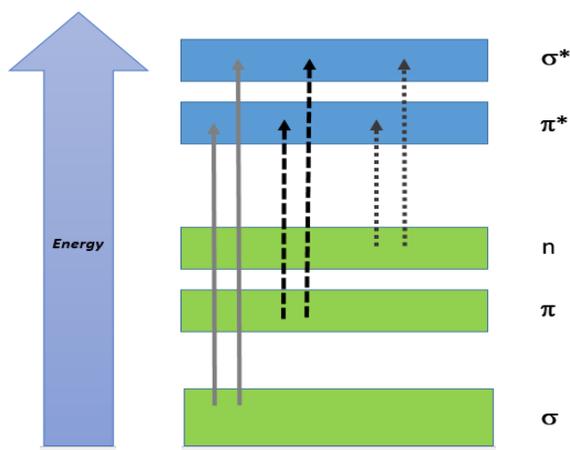
نقاط کوانتومی گرافن منجر شده است؛ زیرا به‌طور کلی عوامل شیمیایی می‌توانند موجب تغییر در تقارن و ساختار شوند و غالباً افزایش اثرات کوانتومی را به دنبال دارند؛ به عبارتی تغییرات در انتقال الکترونی و اثر کانال کوانتومی می‌تواند موجب تغییر در پیک‌های رامان و در نتیجه، تغییر در اندازه ذرات نقاط کوانتومی گرافن شود. به این ترتیب افزایش نسبت I_D/I_G می‌تواند نشان‌دهنده کاهش اندازه ذرات باشد (T. Zhang et al., 2021). وجود اختلاف اندک بین محاسبات تئوری رابطه Cancado و میزان عملی آن در آنالیز تصاویر نیز، می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری اپراتور باشد.

۳-۳- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نشر میدانی

بررسی‌های ساختاری و تصاویر ریخت‌شناسی نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیتريدی توسط HRTEM در شکل ۵ قابل مشاهده است. چنانچه مشاهده می‌شود تصویر الف، ریخت‌شناسی یکنواخت و توزیع ذرات نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده نیتريدی را تأیید می‌کند. همچنین توزیع ذرات از



شکل ۵. تصاویر نمونه 4N (الف) توزیع ذرات گرافن کوانتوم‌دار عامل‌دار شده، (ب) فاصله بین صفحات و (ج) نمودار فراوانی اندازه ذرات



شکل ۶. حالت‌های الکترونی و ترازهای مولکولی

در توضیح شکل ۶ می‌توان گفت انتقال انرژی σ به σ^* نسبت به دیگر حالت‌ها، انرژی بزرگ‌تری دارد و به‌طور معمول، دارای یک جذب متناظر با طول موج 150 nm در ناحیه خلاء UV است. به‌طور مشابه می‌توان گفت مقدار زیادی از انتقال n به σ^* نیز به‌راحتی توسط طیف‌سنجی UV-Vis آنالیز نمی‌شود؛ زیرا طول‌موج‌های کوتاه و جذب ضعیفی دارند، درحالی‌که انتقال π به π^* و n به π^* به‌طور معمول و با میزان شدت و طول‌موج مناسب در طیف UV-Vis نزدیک به ناحیه مرئی مشاهده می‌شوند. علاوه‌براین، انتقال d به d در ترکیبات فلزی و انتقال و همچنین ارسال شارژ بین انواع مختلف یون، مولکول و تحولات درونی مولکول‌ها نیز می‌تواند با استفاده از UV-Vis آنالیز شود (Kaur et al., 2018; Hasan et al., 2019).

طیف UV-Vis نمونه‌های نقاط کوانتومی گرافن‌های عامل‌دار شده نیتروژنی در حضور مقادیر مختلف نیتروژن، در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل الف، نمونه‌ها دارای یک پیک جذب در محدوده $230\text{--}240\text{ nm}$ هستند که مربوط به انتقال الکترونی π به π^* در پیوندهای دوگانه $C=C$ در ساختار نقاط کوانتومی گرافن است؛ درحالی‌که در نمونه عامل‌دار شده، یک پیک ضعیف‌تر در حدود 300 nm وجود دارد و به انتقال n به π^* از گروه‌های حاوی نیتروژن، نسبت داده می‌شود. همچنین افزایش قابل توجه شدت جذب در این نمونه، حضور عامل نیتروژنی و اصلاح ساختار الکترونی گرافن کوانتوم‌دات را تأیید می‌کند. سایر محققان نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (Khan & Kim, 2019; X. Li et al., 2015; Pillar-Little & Kim., 2017).

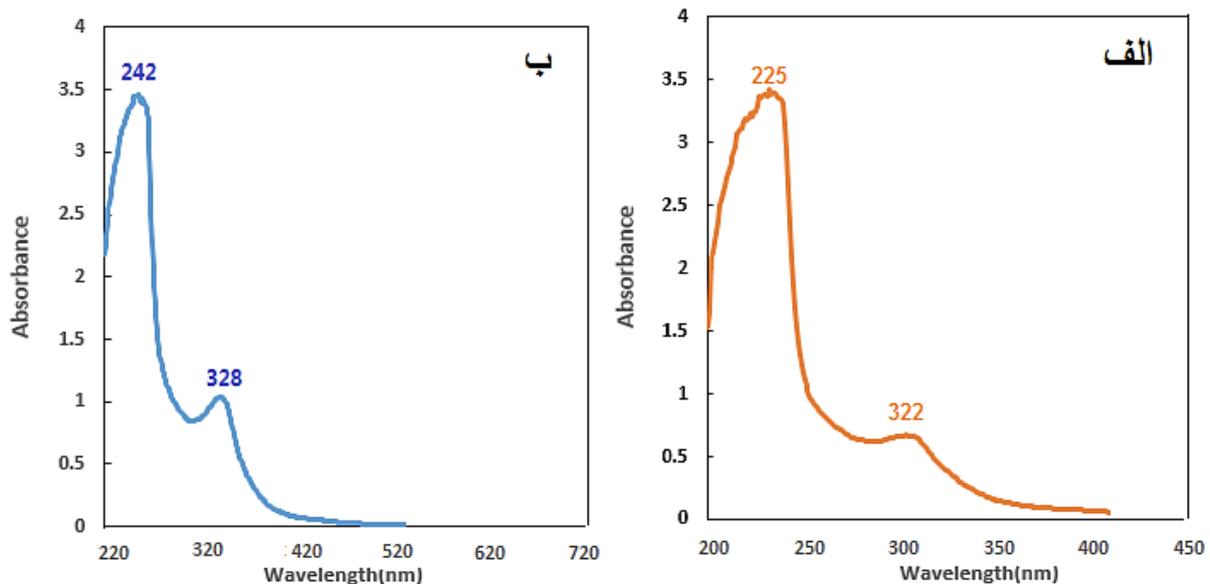
نظر ابعاد تقریباً یکنواخت است که درصد فراوانی آنها پس از اندازه‌گیری بیش از 100 ذره در نمودار ج نشان داده شده است. با بررسی نمودار می‌توان نتیجه گرفت که ریخت‌شناسی ذرات، کروی و یکنواخت بوده و بیشترین فراوانی ذرات با اندازه 5 نانومتر است.

همچنین با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه، فاصله صفحات در شبکه نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دار شده شکل ب نیز به‌مقدار $d=0.31\text{ nm}$ اندازه‌گیری شد. در نمودار توزیع اندازه ذرات، اندازه‌گیری‌ها براساس بررسی قطر بیش از صد ذره گرافن کوانتوم‌دات، گزارش شده است.

۳-۴- بررسی طیف‌سنجی جذبی فرابنفش-مرئی

نانوذرات نقاط کوانتومی گرافن با ابعاد کمتر از 10 نانومتر، نیمه‌رسانا هستند. به‌منظور بررسی خواص نوری این ذرات، آنها را در معرض تابش نور فرابنفش-مرئی قرار داده و طول‌موج‌های متفاوت از آنها ساطع شد. هرچه اندازه ذرات، کوچک‌تر باشند انرژی پیوندی بزرگ‌تری دارند و در معرض نور فرابنفش، الکترون‌های تهییج شده به سطح انرژی بالاتر می‌روند و هنگام از دست دادن انرژی اضافی و بازگشت به مدار خود و دستیابی به سطح انرژی پایدار، میزان اختلاف سطح انرژی طی شده، بزرگ‌تر است؛ بنابراین نور مرئی ساطع شده دارای طول‌موج کمتر و انرژی بیشتر است و به‌رنگ آبی دیده می‌شود و بالعکس در نمونه‌هایی با ذرات درشت‌تر، میزان اختلاف سطح انرژی در بازگشت به مدار اولیه کمتر می‌شود و معمولاً نور ساطع شده از رنگ آبی به سبز و رفته‌رفته با درشت‌تر شدن ذرات به‌رنگ قرمز نیز، دیده می‌شود.

در تشریح فرایند ارزیابی طیف‌سنجی جذبی در محدوده طول‌موج $200\text{--}800\text{ nm}$ می‌توان شرح داد که الکترون خارجی نمونه با جذب تصادفی فوتون، برانگیخته شده و از حالت پایه به مدار بالاتر می‌رود. در حقیقت انتقال الکترون در مدار ظرفیت تغییراتی در میزان انرژی ایجاد می‌کند. الکترون‌های لایه ظرفیت در ساختار شیمیایی مواد در سه دسته الکترون‌های پیوندی π ، الکترون‌های پیوندی σ و الکترون‌های غیرپیوندی n قرار دارند. بنابر تئوری مدار مولکولی، انتقال الکترونی ساختار شیمیایی براساس شکل ۶ صورت می‌گیرد (Kaur et al., 2019; Hasan et al., 2019).



شکل ۷. طیف جذبی مربوط به نمونه‌های الف (0N) و ب (6N)

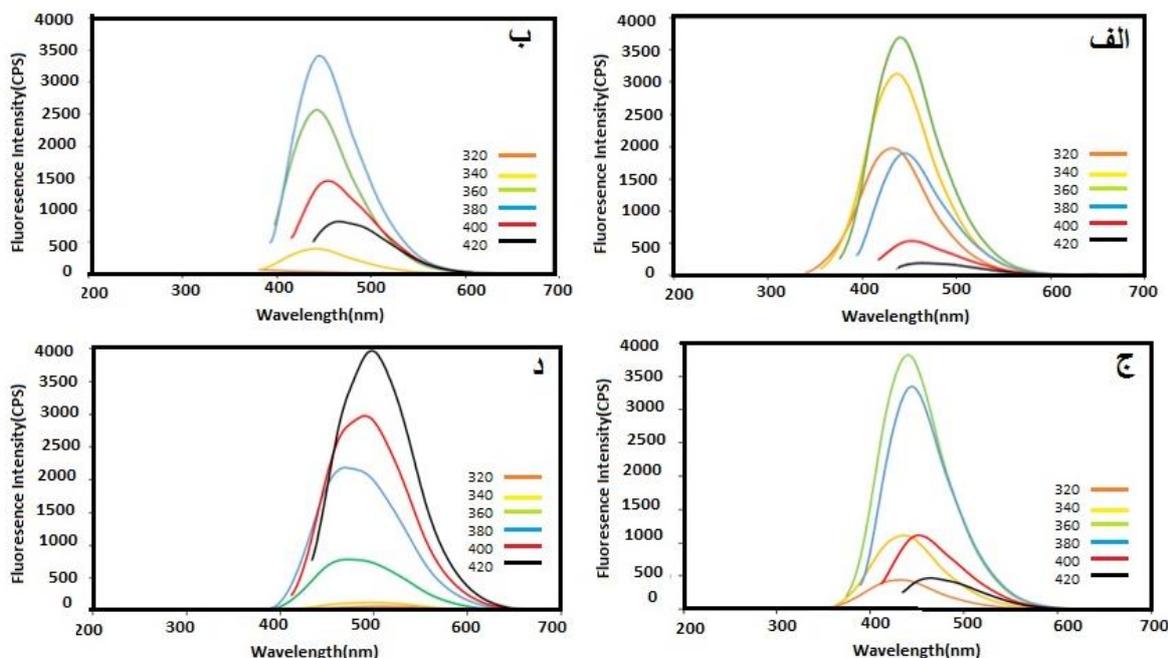
۳-۵- بررسی طیف‌سنجی مادون قرمز

طیف وسیعی از ویژگی‌های نقاط کوانتومی گرافن از جمله نوع لبه، اندازه ذرات، شکل آنها، میزان اکسیداسیون و PH در سنتز ماده و سایر ویژگی‌های سطحی آن، توسط تغییرات رفتار نوری PL، قابل‌ارزیابی است. مبدأ تغییرات PL در نقاط کوانتومی گرافن به نوع نشری که در ماده رخ می‌دهد، بستگی دارد. نشر ذاتی ماده، با اندازه، شکل، نوع لبه و ترکیب جفت حفره الکترونی نقاط کوانتومی گرافن، در ارتباط است؛ در حالی که نشر معیوب، معرف ویژگی عیوب و نواقص جای خالی روی ساختار ماده است. در نشر تابشی فلورسانسی، مواد از حالت برانگیخته به حالت پایه باز می‌گردند؛ در واقع خاصیت ذاتی نشر فلورسانس نقاط کوانتومی گرافن‌ها، به دلیل انتقالات موضعی الکترونی $n-\pi^*$ و $\pi-\pi^*$ می‌باشد (Kaur et al., 2018; Tian et al., 2018).

بررسی خاصیت ذاتی نشر فلورسانس نقاط کوانتومی گرافن‌های عامل‌دار شده نیتروژنی در حضور مقادیر مختلف نیتروژن، در شکل ۸ در محدوده طول‌موج‌های تحریک ۲۲۰-۴۲۰ nm نشان داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در نمودار شکل الف (در نمونه 0N) در محدوده ۴۰۰-۵۰۰ nm (در ناحیه طول‌موج آبی تا سبز) پیک انتشار اصلی، در حدود ۴۶۰ nm و حداکثر شدت فلورسانس در ۳۸۰ nm حدود ۳۰۰۰ CPS مشاهده می‌شود؛ یعنی به دلیل وجود مراکز نقص و گروه‌های عاملی مانند OH- و COOH، شدت تابش در محدوده متوسط قرار دارد. نمودار (ب) و (د) که به ترتیب مربوط

به نمونه‌های 2N و 6N می‌باشند در سطوح متوسط قرار دارند و در مقایسه با نمونه 0N، افزایش جزئی را در شدت فلورسانس نشان می‌دهند. نمودار (ب-۸) مربوط به نمونه 4N است که نشان‌دهنده نمونه با میزان بهینه نیتروژن است؛ زیرا بالاترین شدت فلورسانس، حدود ۴۰۰۰ CPS را دارد و دارای یک جابجایی قابل‌توجه به سمت طول‌موج‌های بلندتر (حدود ۴۹۰-۴۸۰ نانومتر) است که در طول‌موج تحریک ۴۰۰ nm به حداکثر می‌رسد. جابجایی به محدوده قرمز رنگ در انتشار فلورسانس می‌تواند ناشی از تغییر در گاف انرژی مؤثر نقاط کوانتومی گرافن‌ها به دلیل عامل‌های نیتروژن باشد؛ زیرا اتم‌های نیتروژن می‌توانند ساختار الکترونیکی نقاط کوانتومی گرافن را تغییر دهند و سطوح انرژی جدیدی ایجاد کنند که منجر به انتشار فوتون‌ها با انرژی کمتر (طول‌موج بلندتر) می‌شود. این در حالی است که پیک‌های نمونه‌های 0N، 2N و 6N، در طول‌موج‌های نسبتاً کوتاه‌تر (حدود ۴۸۰-۴۶۰ nm) قرار دارند.

در نمونه 6N با افزایش چگالی حالات و حضور گروه‌های عاملی نیتروژن، موقعیت پیک به سمت طول‌موج‌های بلندتر ۴۸۰ nm (ناحیه قرمز رنگ) جابجا می‌شود. عامل‌های نیتروژنی موجب افزایش شدت تابش و کاهش نرخ خاموشی غیرتابشی^۱ می‌شوند. به بیان دیگر، حضور نیتروژن در شبکه π نقاط کوانتومی گرافن، نقص‌های جدید و حالات موضعی ایجاد می‌کند که تابش فلورسانس را تقویت می‌نماید.



شکل ۸. طیف نشری فتولومینسانس مربوط به نمونه‌های الف (0N، ب) 2N، ج) 4N و د) 6N

[Li et al., 2015](#); [Ou et al., 2014](#); [Pillar-Little & Kim., 2017](#).

جدول ۳. مقایسه خواص فتولومینسانس در نمونه‌های نقاط

کوانتومی گرافن و حالت عامل‌دارشده نیتزیدی

ویژگی	نمونه نقاط کوانتومی گرافن	نمونه‌های نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دارشده
موقعیت پیک (قله) PL	۴۶۰-۴۲۰ nm	۴۵۰-۵۰۰ nm
شدت تابش PL	متوسط	زیاد
وابستگی به تحریک	بیشتر	کمتر
عملکرد نوری	پایه	بهبود یافته

۴- نتیجه‌گیری

۱. روش شیمیایی عامل‌دار کردن نقاط کوانتومی گرافن از منبع آمونیوم هیدروکساید، موفقیت‌آمیز بود.
۲. هر دو نمونه نقاط کوانتومی گرافن و حالت عامل‌دارشده، مشخصه‌های باندهای D و G را در نتایج رامان نشان می‌دهند.
۳. در نتایج FTIR، پیوندهای C=C و C=O وجود نقاط کوانتومی گرافن و C-N و N-H، حضور عامل‌های نیتروژن را تأیید می‌کنند.
۴. ریخت‌شناسی کریو ذرات نقاط کوانتومی گرافن عامل‌دارشده نیتزیدی توسط HRTEM مشاهده می‌شود و بیشترین فراوانی مربوط به ذرات با قطر ۵nm است.
۵. حضور عوامل نیتروژن روی سطوح نقاط کوانتومی گرافن، زمینه را جهت ایجاد مراکز جذب نور بیشتر در مقایسه با نقاط کوانتومی گرافن فراهم می‌کند و افزایش شدت جذب مشاهده می‌شود.
۶. بررسی خواص فتولومینسانس نشان می‌دهد حضور عوامل نیتروژن، موجب افزایش شدت تابش شده و فلورسانس

حضور نیتروژن می‌تواند با پر کردن نقص‌های ساختاری یا لبه‌های ناهموار در نقاط کوانتومی گرافن، کاهش نقایص را به دنبال داشته و موجب کاهش مسیرهای غیرتابشی شود و میزان نور بیشتری به صورت تابشی (فلورسانس) منتشر کند. همچنین حضور نیتروژن می‌تواند سطوح انرژی جدیدی در گاف انرژی نقاط کوانتومی گرافن‌ها ایجاد کند که برای گذارهای انرژی مطلوب‌تر هستند. عامل نیتروژن اغلب موجب افزایش پایداری فتوشیمیایی نقاط کوانتومی گرافن‌ها می‌شود. در واقع ذرات عامل‌دارشده نقاط کوانتومی گرافن‌ها کمتر در معرض تخریب نوری^۱ قرار می‌گیرند و فلورسانس آنها در مدت‌زمان بیشتری تحت تابش مداوم نور، پایدار می‌ماند ([L. Li et al., 2015](#); [X.](#))

12. Li, X., Rui, M., Song, J., Shen, Z., & Zeng, H. (2015). Carbon and graphene quantum dots for optoelectronic and energy devices: a review. *Advanced Functional Materials*, 25(31), 4929-4947. <https://doi.org/10.1002/adfm.201501250>
13. Luo, Y., Li, M., Sun, L., Xu, Y., Hu, G., Tang, T., ... Wang, L. (2018). High fluorescent sulfur regulating graphene quantum dots with tunable photoluminescence properties. *Journal of colloid and interface science*, 529, 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.06.016>
14. Moniri Javadhesari, S., Koohi, M., & Jabraili, M. (2022). Nanomaterials: Applications in regeneration of damaged tissues. *Advanced Ceramics Progress*, 8(4), 1-14. <https://doi.org/10.30501/acp.2022.356039.1100>
15. Pillar-Little, T., & Kim, D. Y. (2017). Differentiating the impact of nitrogen chemical states on optical properties of nitrogen-doped graphene quantum dots. *RSC Advances*, 7(76), 48263-48267. <https://doi.org/10.1039/C7RA09252K>
16. Qu, D., Zheng, M., Zhang, L., Zhao, H., Xie, Z., Jing, X. Sun, Z. (2014). Formation mechanism and optimization of highly luminescent N-doped graphene quantum dots. *Scientific reports*, 4(1), 5294. <https://doi.org/10.1038/srep05294>
17. Ranjbar Navazi, Z., Nemati, A., Akbari, H., & Davaran, S. (2017). Functionalized InP/ZnS Quantum Dots Synthesis for Applications in Drug Delivery Systems. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 6(2), 55-63. <https://doi.org/10.30501/jamt.2017.70363>
18. Sadegh Hassani, S., & Samiee, L. (2021). Green Synthesis of Heteroatom Doped Graphene from Natural and Chemical Precursors for Oxygen Reduction Reaction. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(4), 1-11. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.255422.1157>
19. Tian, P., Tang, L., Teng, K., & Lau, S. (2018). Graphene quantum dots from chemistry to applications. *Materials today chemistry*, 10, 221-258. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.09.007>
20. Wang, J., Cao, S., Ding, Y., Ma, F., Lu, W., & Sun, M. (2016). Theoretical investigations of optical origins of fluorescent graphene quantum dots. *Scientific reports*, 6(1), 24850. <https://doi.org/10.1038/srep24850>
21. Wu, X., & Zhao, J. X. (2015). Fabrication of highly fluorescent graphene quantum dots using L-glutamic acid for in vitro/in vivo imaging and sensing. *Proceedings of the North Dakota Academy of Science*, 69, 27A-27A. <https://link.gale.com/apps/doc/A434223475/AONE?u=anon-9da c5e5f&sid=googleScholar&xid=20f6ca4c>
22. Xu, X., Gao, F., Bai, X., Liu, F., Kong, W., & Li, M. (2017). Tuning the photoluminescence of graphene quantum dots by photochemical doping with nitrogen. *Materials*, 10(11), 1328. <https://doi.org/10.3390/ma10111328>
23. Zheng, P., & Wu, N. (2017). Fluorescence and sensing applications of graphene oxide and graphene quantum dots: a review. *Chemistry-An Asian Journal*, 12(18), 2343-2353. <https://doi.org/10.1002/asia.201700814>
24. Zhang, S., Li, Y., Song, H., Chen, X., Zhou, J., Hong, S., & Huang, M. (2016). Graphene quantum dots as the electrolyte for solid state supercapacitors. *Scientific reports*, 6(1), 19292. <https://doi.org/10.1038/srep19292>
25. Zhang, T., Li, W., Huang, K., Guo, H., Li, Z., Fang, Y., ... & Wu, J. (2021). Regulation of functional groups on graphene quantum dots directs selective CO₂ to CH₄ conversion. *Nature communications*, 12(1), 5265. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25640-1>
26. Zhang, Y. P., Ma, J. M., Yang, Y. S., Ru, J. X., Liu, X. Y., Ma, Y., & Guo, H.-C. (2019). Synthesis of nitrogen-doped graphene quantum dots (N-GQDs) from marigold for detection of Fe³⁺ ion and bioimaging. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 217, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.03.044>

آنها پایدارتر می‌شود و نمونه 4N به‌عنوان نمونهٔ بهینه، بهترین خواص نوری را دارد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج شده از رسالهٔ دکتری مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر است. بدین‌وسیله از حمایت‌های معنوی دانشگاه فوق‌الذکر تشکر می‌شود.

مراجع

1. Afsharipour, R., Dadfarnia, S., & Haji Shabani, A. M. (2022). Chemiluminescence determination of dopamine using N, P-graphene quantum dots after preconcentration on magnetic oxidized nanocellulose modified with graphene quantum dots. *Microchimica Acta*, 189(5), 192. <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05251-3>
2. Bacon, M., Bradley, S. J., & Nann, T. (2014). Graphene quantum dots. *Particle & Particle Systems Characterization*, 31(4), 415-428. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201300252>
3. Badiei, E., Sangpour, P., Bagheri, M., & Pazouki, M. (2014). Graphene oxide antibacterial sheets: Synthesis and characterization. *Int. J. Eng. Trans. C*, 27, 1803-1808. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2014.27.12c.01>
4. Chen, W., Lv, G., Hu, W., Li, D., Chen, S., & Dai, Z. (2018). Synthesis and applications of graphene quantum dots: a review. *Nanotechnology Reviews*, 7(2), 157-185. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2017-0199>
5. Chung, S., Revia, R. A., & Zhang, M. (2021). Graphene quantum dots and their applications in bioimaging, biosensing, and therapy. *Advanced Materials*, 33(22), 190436. <https://doi.org/10.1002/adma.201904362>
6. Durodola, S. S., Adekunle, A. S., Oluwakunmi, L. O., Oyekunle, J. A., Ore, O. T., & Oluwafemi, S. O. (2022). A review on graphene quantum dots for electrochemical detection of emerging pollutants. *Journal of Fluorescence*, 32(6), 2223-2236. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-03018-w>
7. Hasan, M. T., Gonzalez-Rodriguez, R., Ryan, C., Pota, K., Green, K., Coffey, J. L., & Naumov, A. V. (2019). Nitrogen-doped graphene quantum dots: Optical properties modification and photovoltaic applications. *Nano Research*, 12(5), 1041-1047. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2337-4>
8. Kaur, M., Kaur, M., & Sharma, V. K. (2018). Nitrogen-doped graphene and graphene quantum dots: A review on synthesis and applications in energy sensors and environment. *Advances in colloid and interface science*, 259, 44-64. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.07.001>
9. Khan, F., & Kim, J. H. (2019). Emission-wavelength-dependent photoluminescence decay lifetime of N-functionalized graphene quantum dot downconverters: Impact on conversion efficiency of Cu (In, Ga) Se₂ solar cells. *Scientific reports*, 9(1), 10803. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47068-w>
10. Lee, S. Y., Kwon, M., Raja, I. S., Molkenova, A., Han, D.-W., & Kim, K. S. (2022). Graphene-based nanomaterials for biomedical imaging. In *Multifaceted Biomedical Applications of Graphene* (pp. 125-148): Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4923-3_7
11. Li, L., Li, L., Wang, C., Liu, K., Zhu, R., Qiang, H., & Lin, Y. (2015). Synthesis of nitrogen-doped and amino acid-functionalized graphene quantum dots from glycine, and their application to the fluorometric determination of ferric ion. *Microchimica Acta*, 182(3), 763-770. <https://doi.org/10.1007/s00604-014-1383-6>