



Synthesis and evaluation of efficiency of molybdenum trioxide and MoO₃@GO nanorods for adsorption of abamectin pesticide from the environment

Razieh Razavi¹ , Moslem Basij² , Zeinab Nazari³ , Sajedeh Mohammadi⁴ , Zahra Khademi⁵ , Salman Amiri⁶

1. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: r.razavi@ujiroft.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Plant Protection, Faculty of Agricultural Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: moslembasij@ujiroft.ac.ir
3. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: z.nazari@gmail.com
4. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: s.mohammadi76@gmail.com
5. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: khademi75@gmail.com
6. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran. E-mail: salman1364@gmail.com

Article Info	ABSTRACT	
Article type: Research Article	Agricultural pesticides are significant environmental pollutants that cause serious harm to humans and the ecosystem. Among these pesticides is abamectin, which is used as an acaricide. In this study, needle-like molybdenum trioxide (MoO ₃) nanorods were synthesized via the hydrothermal method, and a molybdenum trioxide@graphene oxide (MoO ₃ @GO) nanocomposite was heterogeneously prepared for the removal of the pesticide abamectin. The synthesized nanoparticles were characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and infrared spectroscopy (IR). The average size of the MoO ₃ nanorods was found to be 110 nm. The adsorption performance of these two materials for abamectin was compared. The results indicated that both adsorbents exhibit high adsorption capacity, with the MoO ₃ -graphene oxide nanocomposite showing superior adsorption. Key variables such as pesticide concentration, adsorbent dosage, contact time, and pH were investigated. The results demonstrated that the adsorption capacity of MoO ₃ nanorods was 95%, while that of the synthesized nanocomposite reached 98%. The adsorption process followed the Langmuir isotherm model. The optimal adsorption conditions were determined as follows: adsorbent dosage of 3 mg, pesticide concentration of 5 ppm, contact time of 15 minutes, and acidic pH.	
Article history: Received: 10 March 2025 Revised: 18 August 2025 Accepted: 20 August 2025 Published online: Autumn and Winter 2024		
Keywords: <i>Adsorption,</i> <i>Abamectin,</i> <i>Nanorod,</i> <i>Molybdenum Trioxide,</i> <i>Adsorption Isotherm.</i>		
Cite this article: Razavi, R., Basij, M., Bazari, Z., Mohammadi, S., Khademi, Z. & Amiri, S. (2024). Synthesis and evaluation of efficiency of molybdenum trioxide and MoO ₃ @GO nanorods for adsorption of abamectin pesticide from the environment. <i>Iranian Journal of Plant Protection Science</i> , 55 (2), 311-330. DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.390473.1007073		
 © The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press. DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.390473.1007073		

Extended Abstract

Introduction

Abamectin is a widely used antiparasitic agent derived from the fermentation products of the soil bacterium *Streptomyces avermitilis*. Initially developed as a veterinary drug in the 1980s, Abamectin is a mixture of two closely related components: Avermectin B1a and Avermectin B1b, with B1a being the more potent isomer. It has since found applications in agriculture and public health. Known for its efficacy against a variety of pests, including nematodes and arthropods, abamectin works by interfering with the transmission of nerve impulses in target organisms, leading to paralysis and death. Its unique mechanism of action, along with its favorable safety profile when used according to guidelines, has made it a valuable tool in integrated pest management (IPM) programs. In summary, abamectin remains a critical component of pest control strategies

in both agricultural and veterinary contexts. Its effectiveness against a broad spectrum of parasites, paired with relatively low toxicity to humans and animals, underscores its importance. However, awareness of its environmental impact and adherence to safety standards are essential to ensure responsible use. Continued research will be vital to balance the benefits of abamectin with potential risks, optimizing its role in sustainable pest management while safeguarding ecosystem health.

Materials and methods

to conduct this research, a 1000 ppm solution of abamectin (purchased from Sigma Aldrich) with 97% purity was prepared. Other materials used in the experiments, including 98% sulfuric acid, pure hydrogen peroxide, pure potassium permanganate, pure graphite, and concentrated hydrochloric acid, were also purchased from Sigma Aldrich.

Results and discussion

needle-like molybdenum trioxide nanorods were synthesized using a hydrothermal method, and a molybdenum trioxide@graphene oxide nanocomposite was synthesized heterogeneously. The characterization of the synthesized nanoparticles was performed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and infrared spectroscopy (IR), with an average size of 110 nanometers for the molybdenum trioxide nanorods. The results of this study compared these two compounds for the adsorption of abamectin toxin. The XRD pattern of graphene oxide shows sharp peaks at $2\theta = 11, 26.5$, which is indicating that the graphene oxide is not pure and contains some graphite impurities. The XRD pattern of MoO₃ shows sharp peaks at $2\theta = 12, 23.5, 27, 28.5, 34, 36.5, 39.5, 47, 49, \text{ and } 59$, corresponding to the formation of molybdenum trioxide, which matches the JCPDS pattern 050508. The peak at 12 corresponds to the (020) plane, the peak at 23 corresponds to the (110) plane, the peak at 27 corresponds to the (040) plane, the peak at 28 corresponds to the (021) plane, the peak at 34 corresponds to the (111) plane, the peak at 36 corresponds to the (041) plane, the peak at 39 corresponds to the (060) plane, the peak at 47 corresponds to the (200) plane, and the peak at 49 corresponds to the (210) plane. The XRD pattern of the nanocomplex shows that all the peaks of molybdenum trioxide are covered by the peaks of graphene oxide carefully. The shortening and broadening of peak 11 and the increasing height and broadening of peak 27 confirm that the peaks of molybdenum trioxide are covered by graphene oxide. The removal of molybdenum trioxide peaks at angles higher than 30° is due to the involvement of molybdenum oxide planes with graphene oxide through van der Waals bonding.

Conclusion

The findings showed that both adsorbents have high adsorption capacity, and the molybdenum trioxide and graphene oxide nanocomplex has a greater adsorption capacity. The variables of toxin concentration, adsorbent amount, contact time, and pH in the adsorption process were examined. The results indicated that the adsorption capacity of the molybdenum trioxide nanorods is 95%, and the capacity of the synthesized nanocomposite is 98%. During condition optimization, it was shown that an adsorbent amount of 3 mg, a toxin concentration of 5 ppm, and a contact time of 15 minutes at acidic pH achieved the highest adsorption. In the present study, needle-shaped molybdenum trioxide nanorods were synthesized using a hydrothermal method, and the molybdenum trioxide nanocomposite was synthesized via a heterogeneous method. Both nanocomposite materials were utilized as adsorbents for the adsorption and removal of the pesticide abamectin from the environment. The results indicate that both nanocompounds have the capability to adsorb abamectin, with the molybdenum trioxide@graphene oxide nanocomposite displaying superior efficiency as an abamectin adsorbent. Kinetic and thermodynamic data for the adsorption process were also calculated.



سنتز و ارزیابی عملکرد نانو میله مولیبدن تری اکسید و نانوکامپوزیت مولیبدن تری اکسید-گرافن برای جذب آفت کش آباتکتین از محیط زیست

راضیه رضوی^۱ | مسلم بسیج^۲ | زینب نظری^۳ | ساجده محمدی^۴ | زهرا خادمی^۵ | سلمان امیری هنزایی^۶

۱. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: r.razavi@ujiroft.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: moslembasij@ujiroft.ac.ir

۳. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: z.nazari@gmail.com

۴. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: s.mohammadi76@gmail.com

۵. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: khademi75@gmail.com

۶. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. رایانامه: salman1364@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹ تاریخ انتشار: پاییز و زمستان ۱۴۰۳ کلیدواژه‌ها: جذب، آباتکتین، نانو میله، مولیبدن تری اکسید، ایزوترم جذب.	آفت کش‌های کشاورزی به‌عنوان آلاینده‌های محیط زیستی، تهدید جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های طبیعی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، نانومیله‌های سوزنی شکل مولیبدن تری اکسید (MoO_3) به روش هیدروترمال و نانوکامپوزیت تری اکسید مولیبدن-گرافن ($\text{MoO}_3@\text{GO}$) به‌صورت هتروژن سنتز شدند و کارایی آنها در حذف آفت کش آباتکتین مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه‌یابی نانوذرات سنتز شده با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین اندازه نانومیله‌های MoO_3 حدود ۱۱۰ نانومتر است. مطالعات جذب نشان داد که هر دو جاذب از بازده جذب بالایی برخوردارند، با این حال نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$ با بازدهی ۹۸٪ نسبت به نانومیله‌های خالص MoO_3 (۹۵٪) عملکرد بهتری داشت. پارامترهای مؤثر در فرآیند جذب شامل غلظت اولیه آفت کش (۵ پی پی ام)، مقدار جاذب (۳ میلی گرم)، زمان تماس (۱۵ دقیقه) و pH اسیدی بهینه‌سازی شدند. مدل ایزوترم جذب از نوع لانگمویر بود که نشان‌دهنده جذب تک لایه‌ای است. این مطالعه نشان داد که نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$ می‌تواند به‌عنوان جاذب مؤثری برای حذف آلاینده‌های آلی از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: رضوی، راضیه؛ بسیج، مسلم؛ نظری، زینب؛ محمدی، ساجده؛ خادمی، زهرا و امیری هنزایی، سلمان (۱۴۰۳). سنتز و ارزیابی عملکرد نانو میله مولیبدن تری اکسید و نانوکامپوزیت مولیبدن تری اکسید-گرافن برای جذب آفت کش آباتکتین از محیط زیست. نشریه دانش گیاهپزشکی ایران، ۵۵ (۲)، ۳۱۱-۳۳۰. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.390473.1007073>



© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.390473.1007073>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

با افزایش جمعیت جهانی و نیاز فزاینده به تأمین امنیت غذایی، استفاده از آفت‌کش‌های شیمیایی به منظور حفظ محصولات کشاورزی از آسیب آفات، بیماری‌ها و سایر عوامل مخرب، به صورت گسترده در سراسر جهان رواج یافته است. با این حال، کاربرد بی‌رویه این ترکیبات در دهه‌های اخیر منجر به آلودگی گسترده محیط‌زیست شده است. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO)، سالانه حدود ۲۵۰,۰۰۰ مورد مرگ و میر ناشی از مسمومیت در جهان رخ می‌دهد که سهم آفت‌کش‌ها به تنهایی حدود ۱۵۰,۰۰۰ مورد برآورد شده است (Kralj et al., 2007; Dionisio et al., 2014; Sathishkumar et al., 2016). این آمار نشان‌دهنده تأثیر مخرب آفت‌کش‌ها بر سلامت انسان و ضرورت توسعه روش‌های کارآمد برای کاهش آلودگی ناشی از آنهاست.

در ایران آبامکتین برای کنترل بعضی از حشرات و نیز کنه‌ها مصرف می‌شود. حشره‌کش‌ها به عنوان پرکاربردترین گروه آفت‌کش‌ها در ایران شناخته می‌شوند. بررسی آمار مصرف طی دو دهه اخیر نشان می‌دهد که این ترکیبات سهمی بیش از ۵۰ درصد از کل مصرف آفت‌کش‌ها در کشور را به خود اختصاص داده‌اند. با وجود مزایای چشمگیر این ترکیبات در کنترل آفات کشاورزی، پیامدهای منفی زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از کاربرد آنها به چالشی جدی تبدیل شده است. از جمله مهم‌ترین نگرانی‌های مرتبط با استفاده از حشره‌کش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ایجاد آلودگی در اکوسیستم‌های آبی و خاکی

اثرات سمی بر موجودات غیرهدف (Non-target organisms)

مخاطرات سلامت انسان از طریق مواجهه مستقیم و غیرمستقیم

در این میان، آبامکتین (Abamectin) به عنوان یک حشره‌کش-کنه‌کش پر مصرف، مورد توجه ویژه قرار دارد. این ترکیب که از خانواده آورمکتین‌ها (Avermectins) محسوب می‌شود، علی‌رغم کارایی بالا در کنترل آفات، به دلیل ماهیت غیرانتخابی (Non-selective) خود، اثرات نامطلوبی بر طیف وسیعی از موجودات زنده دارد (Wu et al., 2012; Campbell et al., 2012). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این ترکیب می‌تواند برای گونه‌های آبی، زنبورهای عسل و حتی پستانداران خطرناک باشد.

آبامکتین با دارا بودن خاصیت نفوذی بالا، از طریق مکانیسم عمل اختصاصی بر کانال‌های کلریدی وابسته به گلوتامات (GluCl_s) در سیستم عصبی بی‌مهرگان اثر می‌گذارد. این ترکیب با اتصال به زیرواحدهای α و β کانال‌های کلریدی، موجب باز شدن پایدار آنها شده و با افزایش ورود یون‌های کلر به داخل سلول‌های عصبی و عضلانی، هایپرپلاریزاسیون غشا (تا ۹۰- میلی‌ولت) و در نهایت فلج سریع آفت را ایجاد می‌کند. جالب توجه اینکه این کانال‌ها در پستانداران وجود نداشته و همین ویژگی موجب سمیت انتخابی آبامکتین برای بی‌مهرگان (با حفظ ایمنی نسبی برای پستانداران، $LD_{50} > 2000 \text{ mg/kg}$ در موش) شده است. این آفت‌کش کاربرد گسترده‌ای در کنترل آفات مهم کشاورزی از جمله کنه‌ها (*Tetranychus urticae*)، مگس‌های سفید (*Bemisia tabaci*)، پروانه‌های مینوز (*Liriomyza spp.*)، تریپس‌ها و شته‌ها داشته و در محصولات متنوعی مانند مرکبات، پنبه، درختان میوه، سبزیجات و گیاهان زینتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mokhtari et al., 2016, Joseph et al., 2011, Bokhale et al., 2014, Mosleh et al., 2106, Ghafoori et al., 2015, Hu et al., 2014).

میزان مصرف این آفت‌کش در سبزی و صیفی‌جات ۰٫۶ لیتر در هکتار (معادل ۰٫۶ در هزار) برای کنترل مگس مینوز و در مرکبات ۲۰ میلی‌لیتر به همراه ۲۵۰ میلی‌لیتر روغن تابستانه در ۱۰۰ لیتر آب برای کنترل کنه زنگار توصیه شده است (<https://www.epa.gov>).

آلوده شدن منابع آب آشامیدنی به باقیمانده آفت‌کش‌ها یک چالش جهانی محسوب می‌شود، به‌ویژه در مناطق مجاور به اراضی کشاورزی و حاشیه شهرها. مطالعات نشان می‌دهد که حتی کاربرد صحیح و قانونی این ترکیبات نیز می‌تواند منجر به انتقال و نفوذ مواد شیمیایی به منابع آب سطحی و زیرزمینی گردد. اگرچه غلظت این آلاینده‌ها در آب‌های تصفیه‌شده عموماً در محدوده $\mu\text{g/L}$ تا ng/L گزارش می‌شود، اما برخی از ترکیبات آفت‌کش به دلیل سمیت بالا و پایداری شیمیایی، حتی در غلظت‌های بسیار کم نیز می‌توانند خطرات جدی برای سلامت انسان ایجاد نمایند به‌عنوان مثال، گروهی از آفت‌کش‌های کلره آلی دارای پتانسیل سرطان‌زایی و اختلال در سیستم غدد درون‌ریز هستند (Ghafoori et al., 2015).

مطالعات نشان می‌دهد که مؤثرترین راهکار برای کاهش مخاطرات بهداشتی و زیست‌محیطی آفت‌کش‌ها، پیشگیری از ورود آنها به منابع آبی است، چون روش‌های متعارف تصفیه آب مانند ته‌نشینی، صاف‌سازی، گندزدایی و جذب سطحی کارایی محدودی در حذف این ترکیبات دارند و معمولاً کمتر از ۲۰٪ از آلاینده‌ها را حذف می‌کنند. (Mosleh et al., 2016) به‌ویژه در غلظت‌های بسیار پایین (زیر ppb)، این روش‌ها اغلب نامؤثر هستند و حتی ممکن است منجر به تشکیل مشتقات جانبی سمی‌تر شوند. بنابراین اجرای راهکارهای پیشگیرانه مانند مدیریت تلفیقی آفات (IPM)، ایجاد مناطق حائل سبز در حواشی مزارع، آموزش کشاورزان و پایش مستمر کیفیت آب ضروری به نظر می‌رسد. شواهد نشان می‌دهد هزینه‌های پیشگیری می‌تواند تا ۱۰ برابر کمتر از هزینه‌های تصفیه باشد که بر اهمیت تغییر رویکرد از درمان به پیشگیری تأکید دارد (Mosleh et al., 2016).

شواهد پژوهشی به وضوح نشان می‌دهد که رویکرد پیشگیرانه در مدیریت آلودگی آب به آفت‌کش‌ها به مراتب مؤثرتر از روش‌های درمانی است. بر اساس مطالعات معتبر (Mosleh et al., 2016)، روش‌های متداول تصفیه آب شامل فرآیندهای فیزیکی (ته‌نشینی و صاف‌سازی) و شیمیایی (گندزدایی و جذب سطحی) در بهترین شرایط قادر به حذف کمتر از ۲۰ درصد از ترکیبات آفت‌کش هستند، خصوصاً در غلظت‌های زیر ppb که معمولاً در منابع آب مشاهده می‌شود. این محدودیت‌های فنی همراه با خطر تشکیل محصولات جانبی سمی‌تر در فرآیند تصفیه، لزوم تمرکز بر راهکارهای پیشگیرانه مانند اجرای برنامه‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM)، ایجاد نوارهای حفاظتی سبز در حواشی مزارع، آموزش تخصصی کشاورزان و پایش مداوم کیفیت منابع آبی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. جالب توجه اینکه تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهد هزینه‌های سرمایه‌گذاری در بخش پیشگیری تا یک دهم هزینه‌های مورد نیاز برای تصفیه مؤثر این آلاینده‌ها برآورد می‌شود، که این امر توجیه‌پذیری اقتصادی رویکرد پیشگیرانه را به خوبی نشان می‌دهد (Kumar et al., 2013, Xiong et al., 2012, Meng et al., 2015). گرافن اکساید و مواد کامپوزیتی آن به دلیل سطح بزرگ و بسیار فعال و خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد، به مرکز توجه پژوهشگران و کاربردهای متعددی از جمله تصفیه فاضلاب و جذب آلاینده‌های آلی تبدیل شده‌اند (Rout et al., 2023). این مطالعه با هدف سنتز و ارزیابی عملکرد نانوذرات MoO_3 و نانوکامپوزیت MoO_3/GO در حذف آفت‌کش آلامکتین از محیط‌زیست انجام شد. نانوذرات مولیبدن تری‌اکسید به روش هیدروترمال سنتز شدند که ساختار سوزنی‌شکل با سطح ویژه بالا و پایداری ساختاری مطلوبی نشان دادند. از گرافن اکسید نیز به‌عنوان بستر نانوکامپوزیتی استفاده شد که به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، هدایت الکتریکی و گرمایی عالی، و قابلیت ایجاد برهمکنش‌های الکترواستاتیک و پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آلامکتین، کارایی جذب را به‌طور چشمگیری بهبود بخشید. پارامترهای مؤثر بر فرآیند جذب شامل pH، زمان تماس و غلظت آفت‌کش به‌دقت بهینه‌سازی شدند. این پژوهش از سه جنبه حائز نوآوری است: (۱) سنتز نانومیله‌های MoO_3 و نانوکامپوزیت MoO_3/GO با روش‌های ساده و کارآمد، (۲) اولین گزارش از کاربرد این نانوکامپوزیت در جذب انتخابی آلامکتین با بازدهی بیش از ۹۸٪، و (۳) ارائه راه‌حلی سریع، کم‌هزینه و قابل بازیافت برای حذف آلاینده‌های آفت‌کشی از محیط‌های آبی. نتایج نشان داد که مکانیسم جذب از طریق برهمکنش‌های فیزیکوشیمیایی شامل جذب سطحی، پیوند

هیدروژنی و نیروهای الکترواستاتیک صورت می گیرد که نانوکامپوزیت سنتز شده را به گزینه ای ایده آل برای تصفیه پساب های کشاورزی تبدیل می کند.

پیشینه پژوهش

آبامکتین یک لاکتون ماکروسیکلیک از گروه ایورمکتین ها و یکی از موثرترین آفت کش ها و ضد انگل های توسعه یافته در دهه ۱۹۸۰ توسط شرکت مرک شناخته می شود. این ترکیب با مکانیسم عمل منحصر به فرد خود بر روی کانال های کلریدی وابسته به گلوتامات (GluCl_s) در سیستم عصبی بی مهرگان، باعث هایپرپلاریزاسیون نورونی و فلج آفات می گردد (Campbell et al., 1983). کاربردهای گسترده آبامکتین در کشاورزی برای کنترل کنه ها، نماتدها و حشرات و در دامپزشکی برای درمان انگل های خارجی مانند جرب و شپش به اثبات رسیده است (Bloomquist et al., 1996). با این حال، مطالعات نشان داده اند که پایداری نسبی این ترکیب در محیط (نیمه عمر ۷-۲۸ روز در خاک) و سمیت آن برای موجودات غیرهدف مانند آبزیان و حشرات مفید، نگرانی های زیست محیطی قابل توجهی ایجاد کرده است (Wall, R., & Strong, 1994) (McKellar & Benchaoui, 1996). ارزیابی های سم شناسی نیز نشان داده که اگرچه آبامکتین برای پستانداران سمیت کمی دارد (LD₅₀ > 2000 mg/kg)، اما ممکن است در دوزهای بالا باعث عوارض عصبی شود (Omura, 2008). این یافته ها لزوم مدیریت دقیق مصرف و پایش باقیمانده این ترکیب در اکوسیستم های کشاورزی را نشان می دهد.

روش شناسی پژوهش

برای انجام این تحقیق، محلول آبی ۱۰۰۰ ppm از آفت کش آبامکتین (خریداری شده از شرکت سیگما آلدریج) ۹۷ درصد تهیه شد. دیگر مواد بکار رفته در انجام آزمایش، از جمله اسید سولفوریک ۹۸٪، آب اکسیژنه خالص، پرمنگنات پتاسیم خالص، گرافیت

خالص و اسید کلریدریک غلیظ نیز از شرکت سیگما آلدریج خریداری شده اند. گرافن اکسید و مولیبدن تری اکسید توسط روش های زیر سنتز گردید.

سنتز گرافن اکسید

به منظور سنتز گرافن اکسید مطلوب از روش هامرز [6] اصلاح شده، استفاده شد، با این تفاوت که در آن از اکسیدکننده قوی تری مانند پتاسیم پرمنگنات به جای اسید نیتریک استفاده می شود. استفاده از این اکسیدکننده باعث می شود که صفحات گرافیت از هم فاصله بیشتری گرفته و محصول گرافن اکسید به دست آمده با کیفیت تر و همچنین دارای pH بالاتری باشد. بدین منظور ابتدا یک ظرف شیشه ای درون حمام یخ قرار داده می شود. از ابتدای این مرحله با قراردادن دماسنج درون حمام، دما باید زیر ۱۰ درجه سلسیوس حفظ شود. مقدار ۴۶ میلی لیتر اسید سولفوریک ۹۸٪ درون ظرف ریخته و همراه هم زدن مقدار ۲ گرم گرافیت خالص به ظرف اضافه و عمل اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه انجام می شود. سپس مقدار ۶ گرم پودر پتاسیم پرمنگنات به آرامی و همراه با همزن شدید در مدت ۱/۵ ساعت به مخلوط اضافه و پس از اتمام، عمل اختلاط به مدت نیم ساعت ادامه می یابد. بعد از این دمای حمام به ۳۵ درجه سلسیوس افزایش یافته و پس از پایداری دما، حدود یک ساعت دیگر اختلاط صورت می پذیرد. برای رقیق سازی مقدار ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر با احتیاط به ظرف اضافه شده و همزن خاموش شود و ۳۰۰ میلی لیتر آب مقطر درون ظرف بزرگ تری ریخته و محتوای ظرف اولیه به آرامی به ظرف بزرگ تر انتقال می یابد و اختلاط به مدت نیم ساعت انجام می شود. در این مرحله نیز دمای حمام نباید بیشتر از ۴۰ درجه سلسیوس شود. بعد از رقیق سازی مخلوط با آب مقطر، ۲۰ میلی لیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ به آرامی به ظرف اضافه و نیم ساعت اختلاط ادامه پیدا می کند. در این مرحله رنگ محلول برای مدت کوتاهی به زرد روشن تغییر می یابد. سپس شستشوی مخلوط به منظور حذف یون ها و افزایش pH توسط اسید کلریدریک ۱۰٪ و آب مقطر، با اضافه کردن به مخلوط و اختلاط سانتریفیوژ با ۱۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت یک ساعت

انجام می‌گیرد. سپس ظرف، به مدت حدود ۵ ساعت در جای ساکن قرار می‌گیرد و مواد ته‌نشین شده صاف می‌گردد. سپس مخلوط در آون در دمای ۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت قرار داده می‌شود. پودر تشکیل شده گرافن اکسید است

سنتز اکسید مولیبدن (MoO_3)

MoO_3 با استفاده از روش هیدروترمال تهیه شد برای این منظور ابتدا ۱/۴ گرم از $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot\text{H}_2\text{O}$ در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر توسط همزن مغناطیسی حل شد و سپس ۰/۴ گرم از سورفکتانت CTAB حل شده در ۳۰ میلی لیتر آب به آن اضافه شد محلول در حین افزودن سورفکتانت همزده می‌شود همزدن تا جایی ادامه می‌یابد که محلول همگنی بدست آید. در مرحله بعد ۵ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ به صورت قطره ایی تا رسیدن به pH ۱ اضافه شود. محلول به دست آمده به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس داخل اتو کلاو قرار می‌گیرد، بعد از آن محلول صاف شده و با آب مقطر و ایزوپروپانول شستشو داده می‌شود. این رسوب بایستی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردد.

سنتز نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$

برای سنتز نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$ مقدار ۵ میلی گرم از نانو ذرات MoO_3 و ۵ میلی گرم از GO درون ۲۰ میلی لیتر آب مقطر ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت همزده شد و محلول صاف گردید و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک گردید.

تعیین ساختار

ساختار نانوذرات سنتز شده با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز (IR)، پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشخصه‌یابی شد. این روش‌ها به ترتیب برای تأیید گروه‌های عاملی، ساختار بلوری و مورفولوژی نانوذرات استفاده شدند.

با استفاده از مطالعات XRD و با کمک از معادله شرر میتوان اندازه نانو ذرات را بدست آورد. معادله شرر از رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

در این معادله مقادیر $k=0.94$ و $\lambda=1.54056$ ، β نصف پهنای پیک است و θ زاویه مورد نظر در پیک مربوطه است.

آزمایش جذب

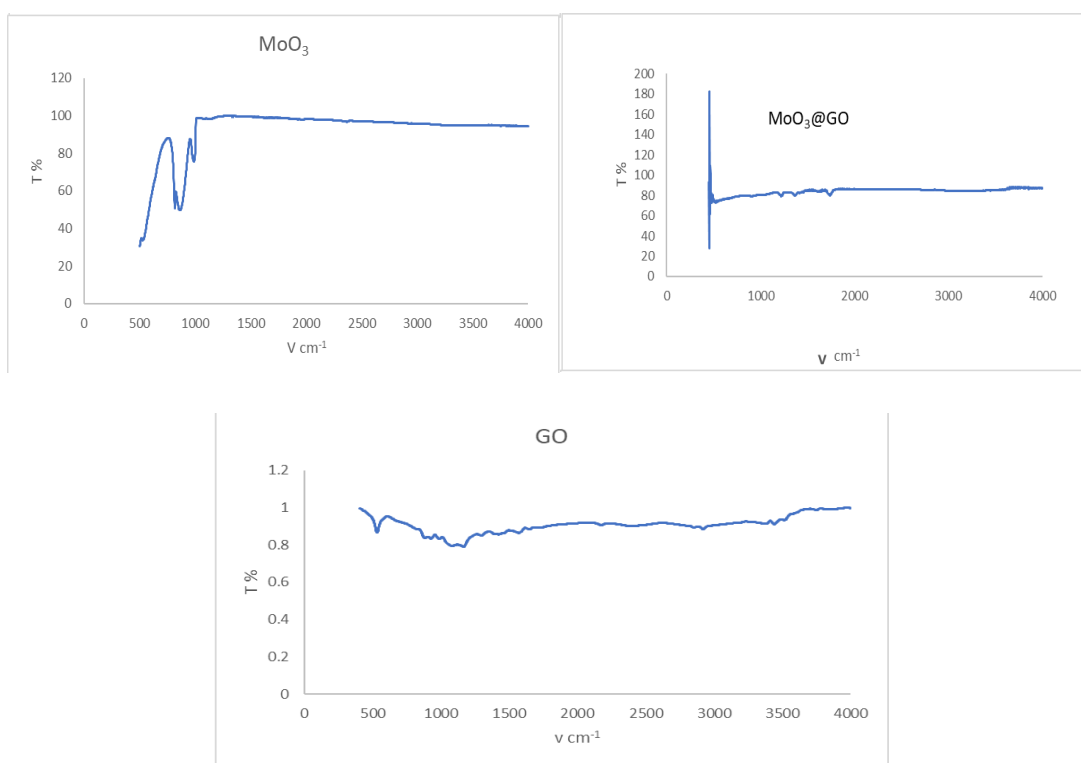
برای انجام آزمایش‌های مخصوص جذب آفت‌کش آدامکتین، پارامترهای غلظت آفت‌کش (از ۳ تا ۱۰۰ ppm)، مقدار جاذب (۳، ۵ و ۷ میلی گرم)، زمان تماس (۱۵ تا ۶۰ دقیقه)، pH (از ۳ تا ۱۱) محلول و دمای جذب، مورد آزمایش قرار گرفت و تغییرات جذب توسط روش UV-Vis در طول موج ۲۵۶ nm قرائت شد. لازم به ذکر است که برای استخراج و خالص‌سازی آدامکتین از نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا نمونه با استفاده از حلال‌های آلی مانند استون یا متانول به کمک روش استخراج مایع-مایع (LLE) تحت شرایط اسیدی یا خنثی پردازش می‌شود. پس از جداسازی فاز آلی، حلال با استفاده از تبخیر در خلأ یا دستگاه روتاری اواپراتور حذف می‌شود. برای خالص‌سازی بیشتر، از کروماتوگرافی ستونی (CC) با استفاده از سیلیکاژل یا آلومینا به عنوان فاز ساکن و مخلوط‌های حلالی مانند هگزان-اتیل استات یا کلروفرم-متانول استفاده می‌شود. در نهایت، خلوص آدامکتین با روش‌های کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) یا طیف‌سنجی جرمی (LC-MS) تأیید می‌شود. در صورت نیاز به کریستال‌سازی، می‌توان از حلال‌های مناسب مانند اتانول یا استونیتریل استفاده کرد تا ترکیب با خلوص بالا به دست آید. در این تحقیق از آدامکتین خالص برای انجام آزمایشات حذف استفاده شد.

یافته های پژوهش

تعیین ساختارهای نانوذرات

آنالیز IR

همان طور که در روش سنتز مولیدن تری اکسید ذکر شد بعد از سنتز ذرات، طیف IR آنها گرفته شد (شکل ۱). در این شکل مشاهده می شود که پیک $988/43$ ، $817/22$ و $861/43$ cm^{-1} مربوط به مولیدن تری اکسید می باشند. وجود این پیک های تیز مربوط به ارتعاشات کششی پیوند Mo-O می باشد. طیف IR گرافن اکسید وجود پیوندهای C-C و C-O را نشان می دهد. عدد موج 1632 cm^{-1} مربوط به گروه کربونیل می باشد و عدد موج 1720 cm^{-1} مربوط به پیوند C-C می باشد و طیف IR مربوط به نانو کمپلکس $\text{MoO}_3@\text{GO}$ حضور ترکیب MoO_3 را در GO نشان می دهد. از آنجا که پیک های ارتعاشی پیوند Mo-O تیز می باشند زمانیکه با گرافن اکسید متصل شدند از تیزی پیک ها کاسته می شود.



شکل ۱. طیف های IR مربوط به MoO_3 ، GO و $\text{MoO}_3@\text{GO}$

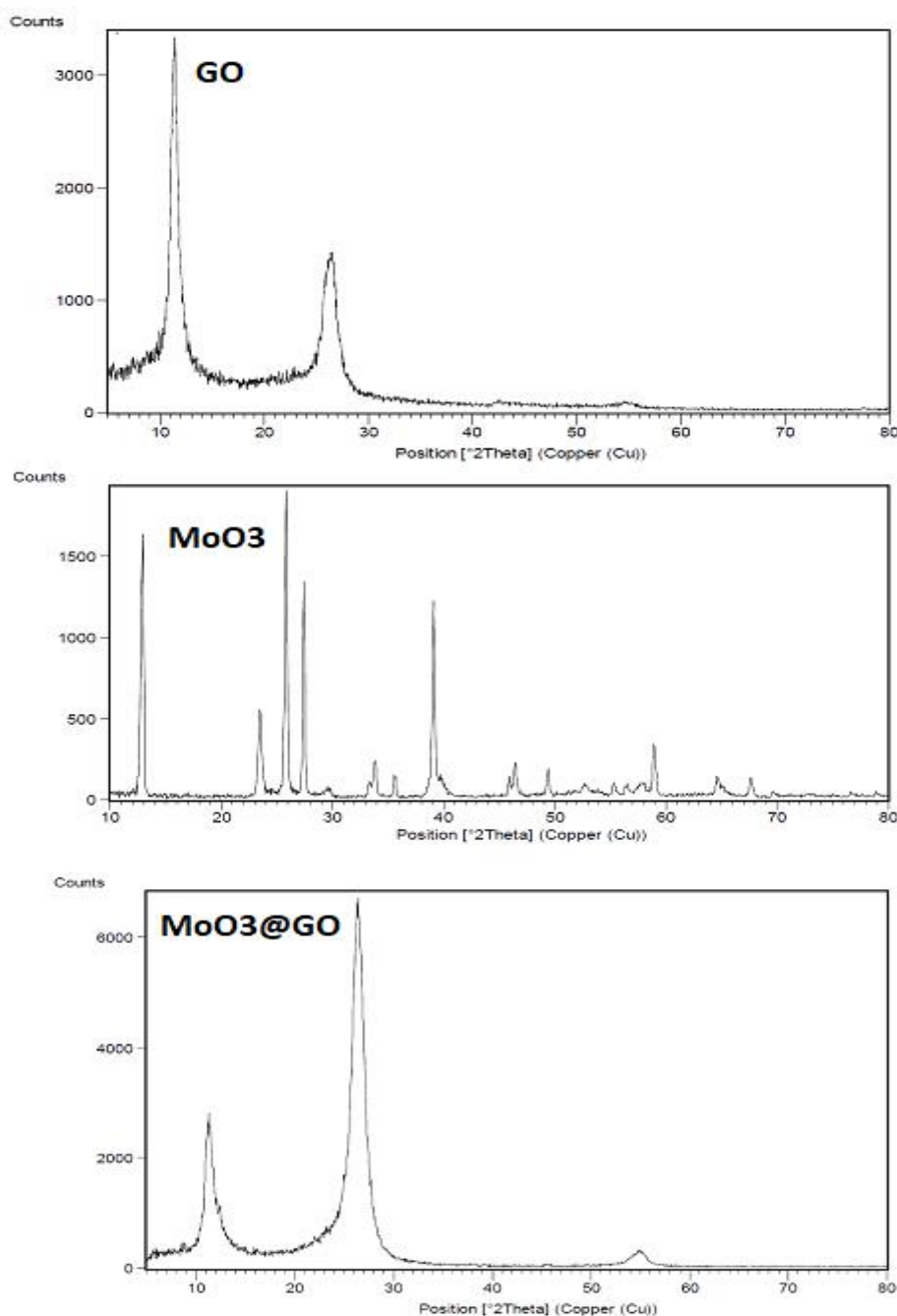
آنالیز XRD

الگوی XRD مربوط به گرافن اکسید پیک های تیزی در $2\theta = 11, 26.5$ را نشان می دهد که گویای این مطلب است که اکسید گرافن به صورت خالص نیست و مقداری ناخالصی گرافیت در آن وجود دارد.

الگوی XRD مربوط به MoO_3 نشان می دهد پیک های تیز موجود در $2\theta = 12, 23.5, 27, 28.5, 34, 36.5, 39.5, 47, 49$ و 59 مربوط به شکل گیری مولیدن تری اکسید هستند که با الگوی JCPDS=050508 تطابق دارد. پیک 12 مربوط به صفحه (020) ، پیک 23 مربوط به صفحه (110) ، پیک 27 مربوط به صفحه (040) ، پیک 28 مربوط به صفحه (021) ، پیک 34 مربوط به صفحه (111) ، پیک 36 مربوط به صفحه (041) ، پیک 39 مربوط به صفحه (060) ، پیک 47 مربوط به صفحه (200) و پیک 49 مربوط به صفحه (210) می باشند. پیک XRD مربوط به نانو کمپلکس نشان می دهد تمام پیک های مولیدن تری

اکسید توسط پیک‌های مربوط به گرافن اکسید پوشیده شده اند. کوتاه شدن پیک ۱۱ و پهن شدن آن و بلند شدن و پهن شدن پیک ۲۷، تاییدی بر پوشیده شدن پیک‌های مولیبدن تری اکسید توسط گرافن اکسید است. حذف پیک‌های مولیبدن تری اکسید از زاویه بالاتر از ۳۰ بدلیل درگیر شدن صفحات نانو اکسید مولیبدن با گرافن اکسید از طریق پیوند واندروالسی می‌باشد (Kumar et al., 2013).

با استفاده از رابطه شرر (Scherrer equation)، اندازه نانو ذرات مولیبدن تری اکسید برابر با ۱۲۰ نانومتر و اندازه فاصله بین صفحات گرافن اکسید ۰/۵۹ نانومتر است.

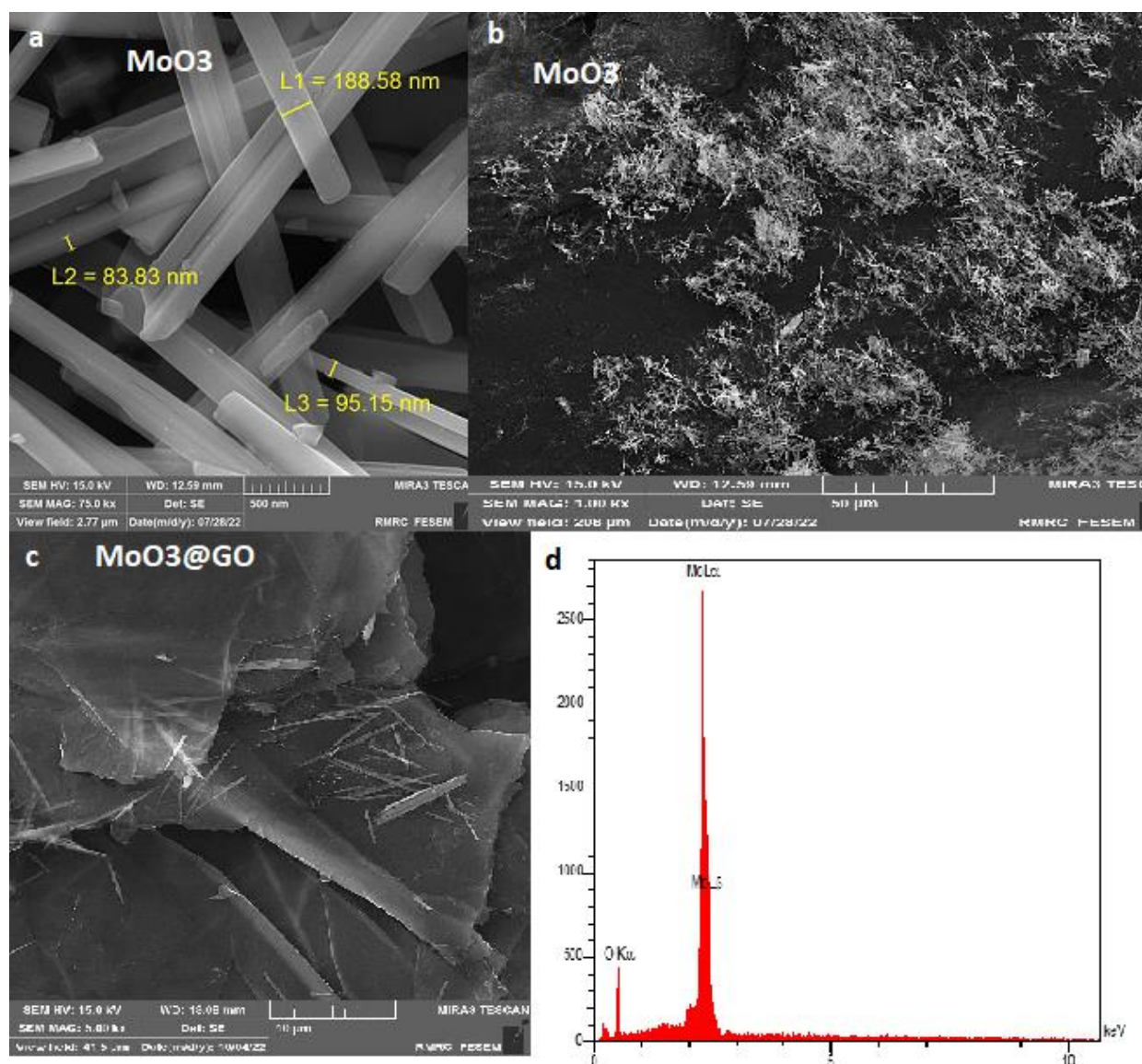


شکل ۲. الگوی XRD مربوط به GO, MoO₃, MoO₃@GO

آنالیز مورفولوژی

در شکل ۳ تصاویر SEM مربوط به نانو میله‌های مولیبدن تری اکسید به وضوح نشان داده شده است. تصاویر در دو بزرگنمایی ۵۰۰ نانومتر و ۵۰ میکرومتر آورده شده است. در تصویر a ساختارهای میله شکل نانو ذرات مولیبدن تری اکسید به وضوح دیده شده اند و اندازه عرض لوله ها به طور میانگین ۱۱۰ نانومتر است (Abbasi et al., 2018). تصویر b نشان دهنده رشد خوشه ایی نانو میله

است که ساختار سوزنی شکلی را نشان می دهند. در تصویر c قرار گرفتن ساختارهای میله ایی سوزنی شکل را بر روی صفحات گرافن اکسید مشاهده می شود. نمودار EDX نشاندهنده وجود مولیبدن در ساختار نانو می باشد است.

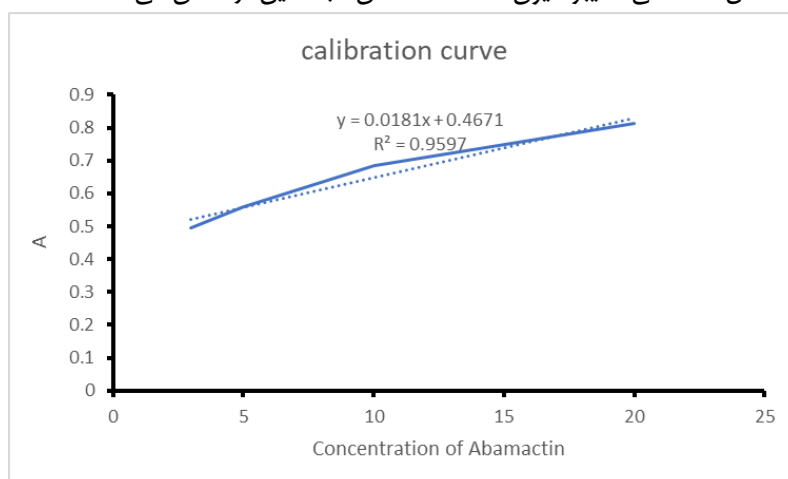


شکل ۳. تصاویر SEM مربوط به MoO₃ (a,b) در بزرگنمایی های ۵۰۰ نانومتر و ۵۰ میکرو متر و MoO₃@GO (c) در بزرگنمایی ۵۰ میکرومتر، EDX نانو MoO₃

آنالیز جذب آبامکتین

منحنی کالیبراسیون آبامکتین

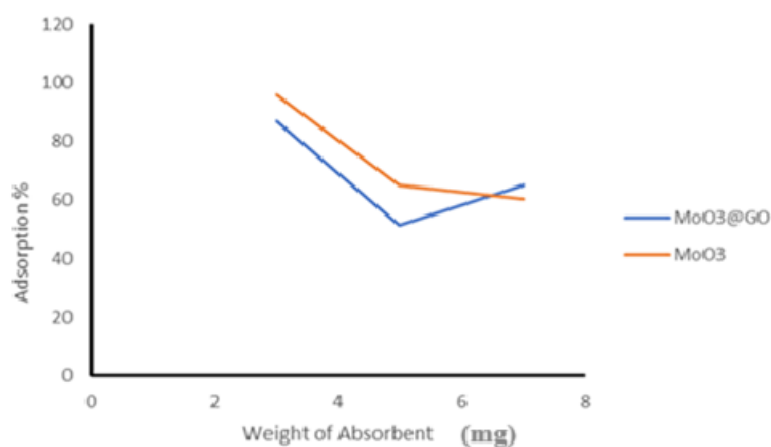
به منظور تعیین منحنی کالیبراسیون آبامکتین در آنالیز UV-Vis محلول استاندارد ۱۰۰ ppm از آن تهیه شد و محلول‌های استوک ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر لیتر تهیه گردید و جذب هر کدام از محلول‌ها با دستگاه UV-Vis مدل Lambda25-American قرائت شد. شکل ۴ منحنی کالیبراسیون غلظت آفت کش آبامکتین را نشان می‌دهد.



شکل ۴. منحنی کالیبراسیون آفت کش آبامکتین، جذب نمونه های آبامکتین در غلظت های ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ پی پی ام از محلول استاندارد

تأثیر مقدار جاذب

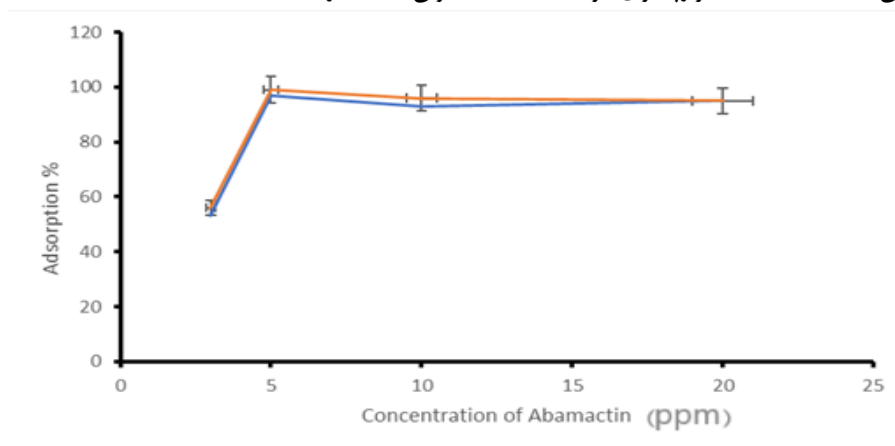
در این مطالعه از نانو میله مولیبدن تری اکسید و نانوکامپوزیت مولیبدن تری اکسید@ گرافن اکسید به عنوان جاذب استفاده گردید. برای انجام آزمایش‌های مربوطه، مقدارهای ۳، ۵ و ۷ میلی گرم از هر کدام از جاذب‌ها با غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر از آفت کش آبامکتین و در زمان ۲۰ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۵ منحنی مربوط به تغییرات فرآیند جذب بر حسب مقدار جاذب را نشان می‌دهد همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار ۳ میلی گرم بر لیتر بیشترین درصد جذب آفت کش را دارد و در مقدارهای ۵ و ۷ میلی گرم بر لیتر درصد جذب کاهش یافته است که می‌تواند بدلیل اشباع شدن سطح جاذب از آفت کش باشد (Mosleh et al., 2016).



شکل ۵. تاثیر مقدار جاذب بر جذب آبامکتین، مقدارهای متفاوت جاذب با غلظت ۵ پی پی ام و زمان ۲۰ دقیقه

تأثیر غلظت آفت کش

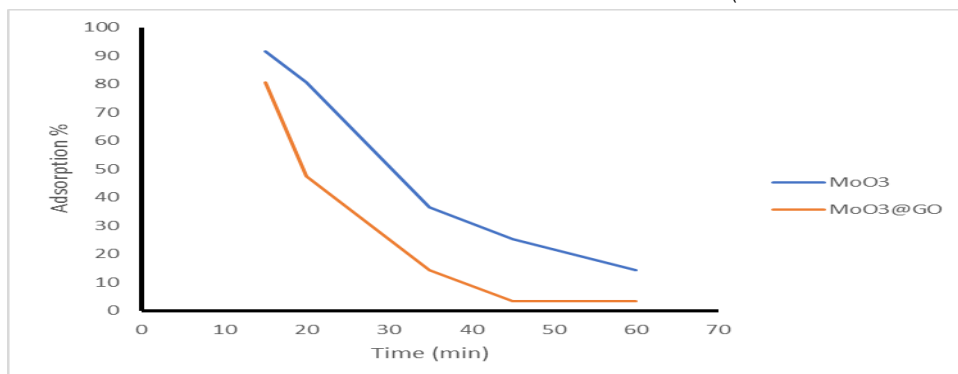
برای تعیین غلظت بهینه آفت کش در فرایند جذب هر کدام از محلول های ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر لیتر از آفت کش آبامکتین در تماس با مقدار بهینه جاذب (۳ میلی گرم) از مرحله قبل و در مدت زمان ۲۰ دقیقه قرار گرفت و نهایتاً محلول ها صاف گردید و جذب محلول های زیر صافی خوانده شد و مقدار درصد جذب و همچنین مقدار آفت کش مورد استفاده بهینه بدست آورده شد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود مقدار بهینه برای انجام آزمایش های بعدی ۵ میلی گرم بر لیتر می باشد. با توجه به نمودار شکل ۶ می توان نتیجه گرفت که گستره خطی فرایند جذب، ۲۰-۵ میلی گرم بر لیتر است و همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است تکرارپذیری فرایند جذب به میزان ۰/۰۱ درصد است.



شکل ۶. تأثیر غلظت آفت کش بر جذب، محلول های ۳، ۵، ۱۰، ۲۰ پی پی ام با ۳ میلی گرم جاذب در زمان ۲۰ دقیقه

تأثیر زمان تماس

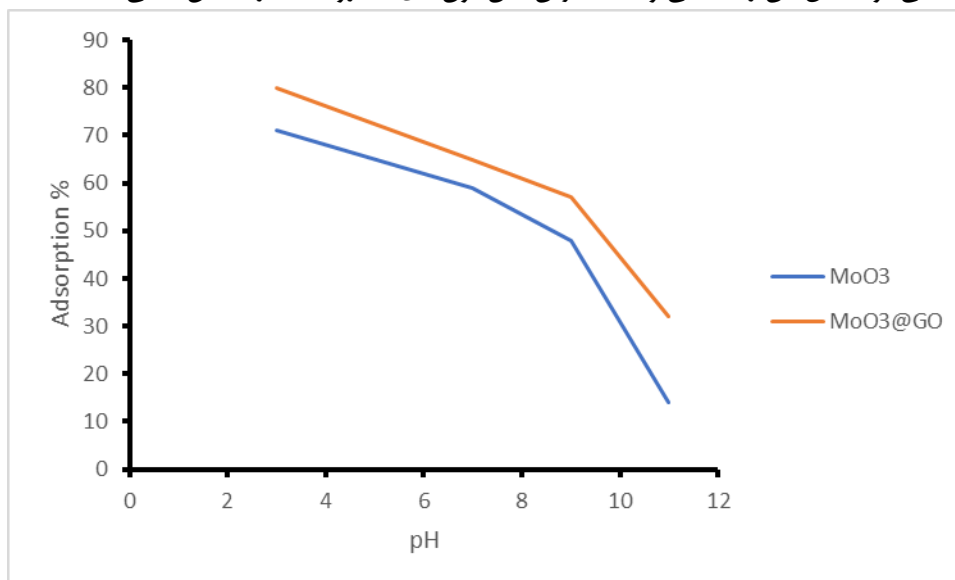
برای انجام آزمایش تعیین زمان تماس، مقدار بهینه آفت کش آبامکتین ۵ میلی گرم بر لیتر با مقدار بهینه جاذب ۳ میلی گرم در زمان های ۱۵، ۲۰، ۳۵، ۴۵ و ۶۰ دقیقه تماس داده شد و بعد از سپری شدن زمان هر آزمایش محلول صاف گردید و جذب آن قرائت شد. نتایج در شکل ۷ آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین جذب آفت کش آبامکتین هم برای نانو میله مولیبدن تری اکسید و هم برای نانوکامپوزیت مولیبدن تری اکسید و گرافن اکسید در زمان ۱۵ دقیقه ثبت شد. با گذشت زمان درصد جذب کمتر می شود و این نشان دهنده این است که سرعت جذب آفت کش بر روی جاذب در همان ابتدای فرایند جذب رخ می دهد و همچنین کاهش درصد جذب آفت کش بر روی جاذب در زمان های بالاتر می تواند بدلیل اشباع شدن سطح جاذب باشد ضمن اینکه ثابت شدن مقدار جذب شده در زمان بی نهایت نیز محتمل می شود (Mosleh et al., 2016).



شکل ۷. تأثیر زمان تماس بر فرایند جذب، غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر از آفت کش، با ۳ میلی گرم از جاذب در زمان های ۱۵، ۲۰، ۳۵، ۴۵، ۶۰ دقیقه

تأثیر pH

به منظور تعیین تأثیر pH بر فرآیند جذب، بر اساس مراحل قبل مقدار جاذب ۳ میلی گرم و مقدار آفت کش ۵ میلی گرم بر لیتر در زمان تماس ۱۵ دقیقه در دامنه pH بین ۱۱-۳ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل ۸ نشان می دهد که تأثیر pH بدین صورت است که با افزایش pH در محیط بازی فرایند جذب کاهش می یابد و در محیط اسیدی بیشترین جذب مشاهده می شود. دلیل این رخداد می تواند جایگزین شدن یون های هیدروکسید در مناطق جذبی جاذب باشد.



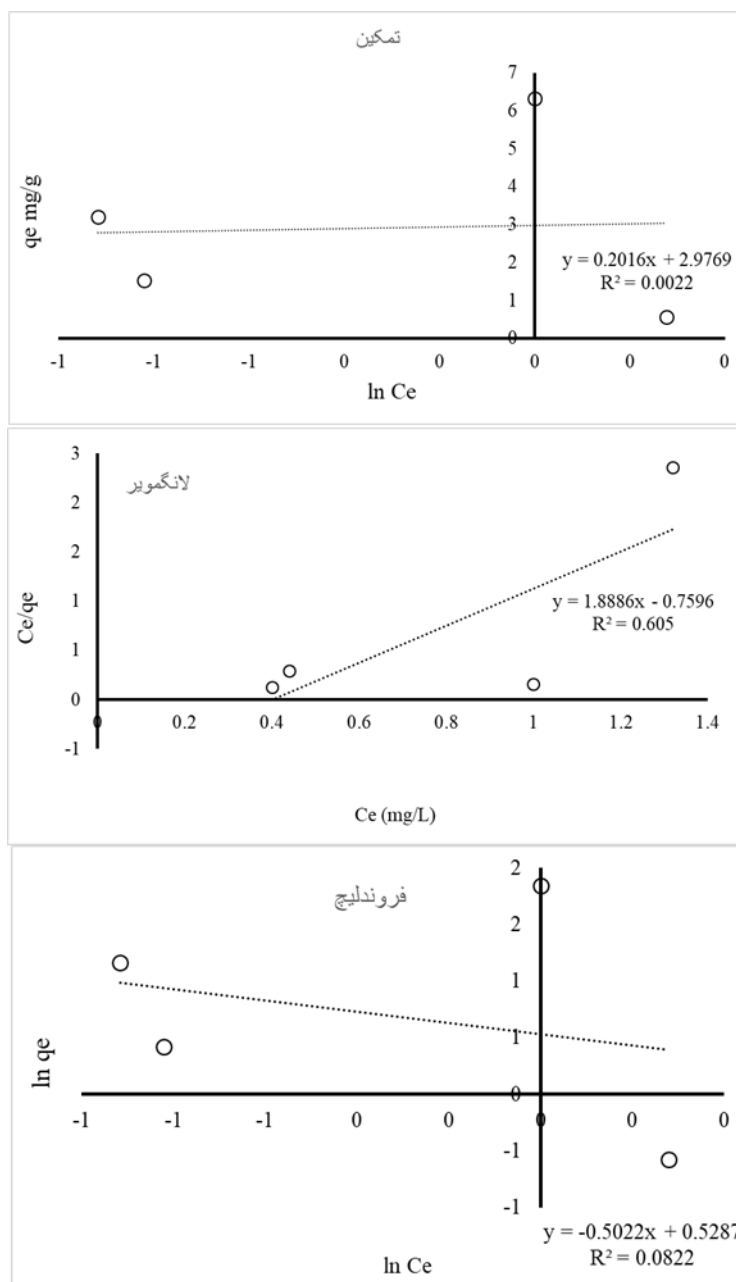
شکل ۸. تأثیر pH بر فرآیند جذب، غلظت آفت کش ۵ میلی گرم بر لیتر، با ۳ میلی گرم از جاذب در ۱۱ pH به مدت ۱۵ دقیقه

ایزوترم های جذب

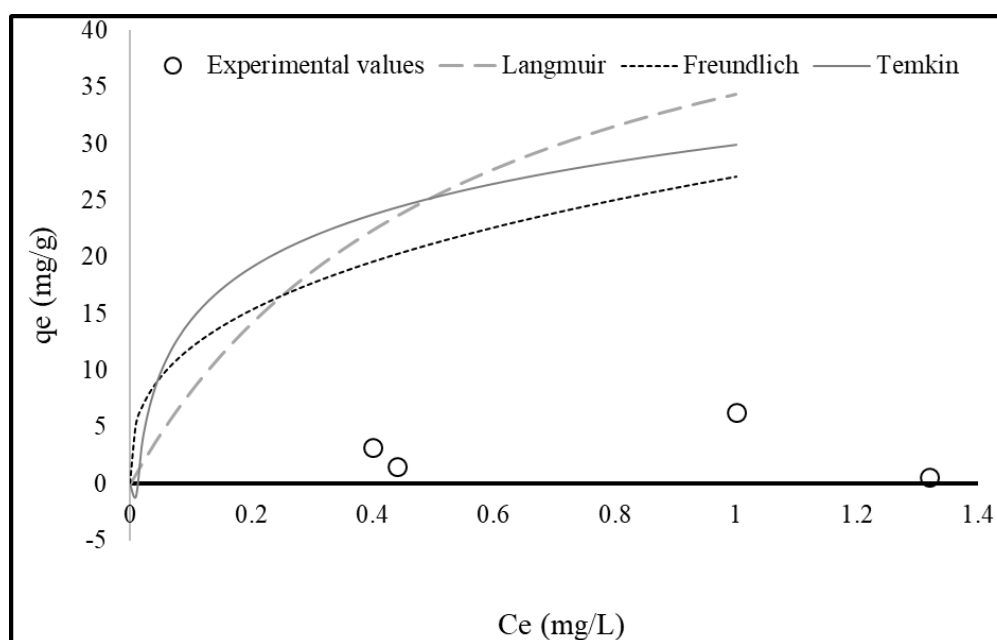
به منظور مطالعه ی مکانی آفت کش جذب، ظرفیت جاذب، خواص سطحی جاذب و مقایسه کارایی انواع جاذب ها جهت انتخاب مناسبترین جاذب؛ همواره از ایزوترم های مختلف جذب مثل ایزوترم لانگمویر، فرنللیچ و تمکین استفاده می شود [7]. در ایزوترم لانگمویر، فرایند جذب در موقعیت های معینی اتفاق می افتد. واکنشی خاص و ممانعت فضایی بین جاذب و جذب شونده وجود ندارد. فرایند جذب تک لایه، همگن و یکنواخت است. ملکولهای جاذب دارای آنتالپی و انرژی فعال سازی ثابت هستند و جابجای جذب شونده در سطح جاذب رخ نمی دهد. این مدل جذب بخشی از سطح جاذب را مورد بررسی قرار می دهد که هنگام اشباع تعادلی قادر به جذب ملکول دیگری نباشد. در ایزوترم های تمکین آنتالپی جذب تابع خطی از پوشش سطح هستند. ایزوترم های فرنللیچ جذب چند لایه دارند و برای جذب غیر ایده آل استفاده می شوند. همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می شود نمودارهای خطی ایزوترم های تمکین، لانگمویر و فرنللیچ آورده شده است. با توجه به وضعیت نمودارها مقادیر R^2 برای ایزوترم های تمکین، لانگمویر و فرنللیچ به ترتیب برابر با ۰/۰۲۲، ۰/۶۰۵ و ۰/۸۲۲ است که این مقادیر نشان می دهند فرایند جذب آبامکتین بر روی نانو کامپوزیت مولیبدن تری اکسید و گرافن اکسید خطی نمی باشد. پس از این نتیجه گیری از مدل غیر خطی ایزوترم ها استفاده شد که نتایج آن را در جدول ۱ و شکل ۱۰ مشاهده می نمایید. مطابق با داده های بدست آمده، می توان نتیجه گرفت که فرایند جذب از ایزوترم لانگمویر تبعیت می کند و مقدار حداکثر ظرفیت جذب تعادلی آن ۵۳ می باشد.

جدول ۱. پارامترهای ایزوترم های تمکین، لانگمویر و فرنللیچ غیر خطی برای غلظت های آفت کش ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر لیتر و جاذب به مقدار ۳ میلی گرم در زمان ۱۵ دقیقه و pH اسیدی

Langmuir			Freundlich			Temkin			
R^2	$q_{\max}$	k_L	R^2	k_F	n	k_t	b_T	B	R^2
0.95	53.48	1.798	0.92	27.1	2.8	85.5	368.7	6.72	0.93

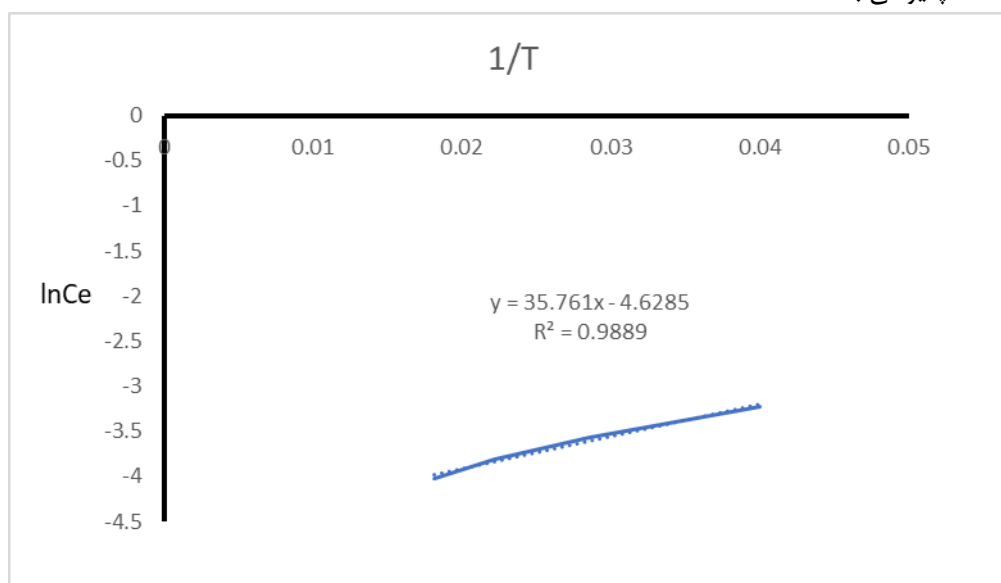


شکل ۹. نمودارهای ایزوترم های تمکین، لانگمویر و فرنللیچ خطی برای غلظت های آفت کش ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر لیتر و جاذب به مقدار ۳ میلی گرم در زمان ۱۵ دقیقه و pH اسیدی



شکل ۱۰. نمودارهای ایزوترم های تمکین، لانگمویر و فرنللیچ غیر خطی برای غلظت های آفت کش ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر لیتر و جاذب به مقدار ۳ میلی گرم در زمان ۱۵ دقیقه و pH اسیدی

با استفاده از داده های نمودار شکل ۱۱ که تغییرات غلظت تعادلی جذب شونده (آفت کش آبامکتین) را در دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس نشان می دهد. با استفاده از شیب نمودار می توان مقدار $\Delta H = 297.31$ ژول بر مول می باشد. که نشاندهنده این است فرایند جذب مورد مطالعه گرماگیر است. این مقدار گرما نشان می دهد فرایند جذب از نوع جذب شیمیایی و برگشت ناپذیر می باشد.



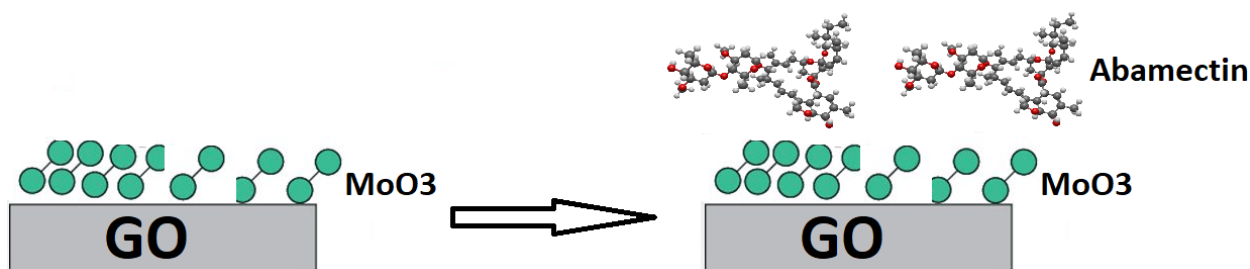
شکل ۱۱. نمودار تغییر غلظت تعادلی برای محلول ۵ میلی گرم بر لیتر آفت کش در دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس و جاذب به مقدار ۳ میلی گرم در زمان ۱۵ دقیقه و pH اسیدی

کار حاضر در مقایسه با کارهای انجام شده بر روی آبامکتین دارای این مزیت است که کارهای قبلی از جاذب های فتو کاتالیست استفاده شده است در حالیکه MoO_3 و $\text{MoO}_3@\text{GO}$ جاذب های غیر فتو کاتالیستی می باشند و مزیت دیگر این است که جاذب های با هزینه کم و مقرون به صرفه ای هستند و در مدت زمان بسیار کم اثر فوق العاده جذب آلودگی را دارند. جدول ۲ مقایسه رفتاری بعضی جاذب ها را نشان می دهد.

جدول ۲. مقایسه رفتار جاذب های دیگر با MoO_3 و $\text{MoO}_3@\text{GO}$

جاذب	درصد جذب	زمان جذب	شماره مرجع
Fe+modified biochar+pebbles+Coke	99%	-	(Mohammed 2023)
Electrocoagulation	94%	-	(Ghalwa 2015)
$\text{Cu}_2(\text{OH})\text{PO}_4\text{-HKUST-1}$ MOF photocatalyst	99.93%	20 min	(Mohammed 2023)
Greenhouse soil	11%	-	(Jodeh 2014)
Photo-Fenton Process	70%	60min	(Matos 2012)
B-CuAl LDH	86.36%	60 min	(Khorasanizadeh 2023)
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> ZJB-14120	84.82%	48 h	(Wang 2015)

مکانیزم جذب آبامکتین بر روی نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$



فرایند جذب شیمیایی آبامکتین بر روی نانو کمپلکس مولیبدن تری اکسید@ گرافن اکسید در شماتیک بالا دیده می شود. در ابتدا گرافن اکسید و مولیبدن تری اکسید سنتز شدند و بعد از جذب مولیبدن تری اکسید بر روی گرافن اکسید، آبامکتین در شرایط آزمایش بر روی نانو کمپلکس به صورت شیمیایی جذب شد.

نتیجه گیری و بحث

در مطالعه حاضر نانو میله سوختی شکل مولیبدن تری اکسید با روش هیدرو ترمال سنتز شد و کمپلکس نانو کامپوزیت مولیبدن تری اکسید به روش هتروژن سنتز شد و هر دو ترکیب نانو به عنوان جاذب برای جذب و حذف آفت کش آبامکتین در محیط زیست مورد استفاده قرار گرفتند نتایج نشان می دهد که هر دو ترکیب نانو توانایی جذب آبامکتین را دارند که کارایی نانو کامپوزیت مولیبدن تری اکسید@ گرافن اکسید به عنوان جاذب آبامکتین بهتر می باشد. داده های سینتیک و ترمودینامیک فرایند جذب نیز محاسبه گردیده است. در این پژوهش به طور موفقیت آمیزی نانومیله های MoO_3 و نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$ را سنتز و کارایی آن ها را در جذب سم آبامکتین مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که هر دو نانوجاذب از ظرفیت جذب بالا و سریع برخوردارند، اما نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$ به دلیل حضور گرافن اکسید (GO) و برهمکنش های شیمیایی قوی تر، عملکرد بهتری (۹۸٪ جذب) نسبت به نانومیله های خالص MoO_3 (۹۵٪ جذب) دارد. این تفاوت ناشی از: افزایش سطح ویژه و تخلخل در نانوکامپوزیت و وجود گروه های عاملی اکسیژن دار روی GO که پیوندهای هیدروژنی و الکترواستاتیک با مولکول های آبامکتین تشکیل می دهند.

درمقایسه با روش‌های متداول حذف آبامکتین، زیست‌پالایی گرچه روشی سازگار با محیط‌زیست است، اما به دلیل زمان طولانی تجزیه (چند روز تا هفته)، وابستگی به شرایط محیطی (pH، اکسیژن، و تولید متابولیت‌های سمی ثانویه، کارایی محدودی دارد. جذب با کربن فعال: اگرچه پرکاربرد است، اما ظرفیت جذب پایین تر (%۹۰-۸۰) و دشواری در بازیافت را نشان می‌دهد. برتری نانوکامپوزیت: $\text{MoO}_3@\text{GO}$ سرعت جذب بالا (۱۵ دقیقه به‌جای چند روز و بازدهی ۹۸٪ حتی در غلظت‌های پایین آبامکتین) (۵ ppm)، امکان بازیافت و استفاده مجدد با روش‌های ساده مانند شستشوی اسیدی. در تحلیل مکانیسم‌های جذب باید گفت جذب فیزیکی ناشی از ساختار متخلخل نانومیله‌های MoO_3 و سطح ویژه بالای نانوکامپوزیت و جذب شیمیایی بدلیل پیوند هیدروژنی بین گروه‌های $\text{C}=\text{O}$ و OH در آبامکتین با گروه‌های عاملی GO کربوکسیل و هیدروکسیل و برهمکنش‌های الکترواستاتیک بین مولکول‌های آبامکتین (دارای بار جزئی مثبت) و سطح باردار منفی نانوکامپوزیت است. مدل جذب لانگمویر، تأیید کننده جذب تک‌لایه‌ای و یکنواخت سم بر سطح نانوجاذب‌ها است. گزارش‌های متعددی در مورد توانایی جذب گرافن اکسید و کمپوزیت‌های آن در تأیید یافته‌های این مقاله موجود است. نتایج یک پژوهش نشان می‌دهد که گرافن اکسید در اندازه نانو جاذب قوی آفت‌کش هاست و حشره‌کش‌های سایفلوترین، دیازینون و آورمکتین را به سرعت جذب میکند. در این بررسی آورمکتین مطلوب‌ترین ترکیب برای جذب بود. این آفت‌کش با پیوندهای استوار هیدروژنی و واندروالسی جذب سطح گرافن تری‌اکسید میشود (Tadawattana et al., 2025). همچنین مشتقات گرافن به عنوان مود قابل بازیافت در حذف علف‌کش متری‌بوزین و حشره‌کش فیپرونیل از فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است (Kumari et al., 2023).

این پژوهش ثابت کرد که نانوکامپوزیت $\text{MoO}_3@\text{GO}$ یک گزینه کارآمد، سریع و پایدار برای حذف آبامکتین از محیط‌زیست است. نوآوری اصلی تحقیق در سنتز هدفمند نانومیله‌های MoO_3 و ترکیب آن با GO برای دستیابی به جذب انتخابی و با بازدهی بالا بود. در تأیید این نتایج نمونه‌های عامل‌دار شده کتووالانسی GO قابلیت جذب بالایی نسبت به GO دارند. برای مثال جذب قارچ‌کش کلروتالونیل از ۹٪ در GO به ۹۰٪ در لیگاند شیف باز (GO-SB) افزایش یافته است. این پدیده در مورد دو علف‌کش استوکسر و تریفلورالین هم مشاهده شده است (Taghiveva et al., 2024).

وجود آلاینده‌های آلی و معدنی به ویژه در فاضلاب‌های شهری و کارخانه‌ها و نیز پساب حاوی آفت‌کش در اطراف مزارعی مانند برنج، از نگرانی‌های مهم زیست محیطی و اکوسیستم آبی است. مشتقات نانوکامپوزیتی گرافن به عنوان مواد قابل بازیافت جاذب بالقوه‌ای برای جذب این آلاینده‌های خطرناک است. بنابراین کاربرد صنعتی این مواد در تصفیه آب و خاک می‌تواند به عنوان یک جایگزین سبز برای روش‌های متداول مطرح شود. البته برای تحقق این هدف، انجام مطالعات تکمیلی در مقیاس بزرگ و ارزیابی اثرات بلندمدت محیط‌زیستی ضروری است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

- Abbasi, A., Hamadani, M., Gholami, T., Salavati-Niasari, M., & Sadri, N., (2018) Facile preparation of PbCrO_4 and PbCrO_4/Ag nanostructure as an effective photocatalyst for degradation of organic contaminants, *Separation and Purification Technology*, 5 (2), 571-580. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.018>.
- Bokhale N.B., Bomble, R.R. Dalbhanjan, D.D. Mahale, S.P. Hinge, B.S. Banerjee, A.V. Mohod, & Gogate, P.R., (2014), Sonocatalytic and sonophotocatalytic degradation of rhodamine 6G containing wastewaters, *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1797-1804. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Bloomquist, J. R., Ion channels as targets for insecticides, *Annual Review of Entomology*. 41 (1996)

- 163–190. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.41.010196.001115>.
- Campbell W.C., (2012), Ivermectin and abamectin, *Springer Science & Business Media*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Campbell, W.C., Fisher, M.H., Stapley, E.O., Albers-Schönberg, G., & Jacob, T.A., (1983), Ivermectin: A potent new antiparasitic agent, *Science* (80-.). 221, 823–828. <https://doi.org/10.1126/science.6308762>.
- Chen, Y., Fan, Y., Huang, Y., Liao, X., Wenfeng, X., & Zhang, T., (2024), A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115905. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Chen, X., Qu, Z., Liu, Z., & Ren, G., (2022), Mechanism of oxidization of graphite to graphene oxide by the hummers method, *ACS Omega* 7, 23503–23510. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01963>.
- Dionisio A.C., & Rath, S., (2016), Abamectin in soils: analytical methods, kinetics, sorption and dissipation, *Chemosphere*, 151, 17-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Ghalwa, A., Nasser, M., & Farhat N.B., (2015), Removal of abamectin pesticide by electrocoagulation Process using stainless steel and iron electrodes, *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2:3 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Ghafoori, S.A., Mowla, R., Jahani, M., Mehrvar, & P.K. Chan, (2015), Sonopholytic degradation of synthetic pharmaceutical wastewater: Statistical experimental design and modeling, *Journal of Environmental Management*, 150, 128-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Hu, B., Wu, C., Zhang, Z., & Wang, L., (2014), Sonophotocatalytic degradation of trichloroacetic acid in aqueous solution, *Ceramics International* ,40, 7015-7021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Joseph C.G., Puma, G.L., Bono, A., Taufiq-Yap, Y.H., & Krishnaiah, D., (2011), Operating parameters and synergistic effects of combining ultrasound and ultraviolet irradiation in the degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol, *Desalination*, 276, 303-309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Kralj, M.B. Franko, M., & Trebše, P., (2007), Photodegradation of organophosphorus insecticides- Investigations of products and their toxicity using gas chromatography–mass spectrometry and AChE-thermal lens spectrometric bioassay, *Chemosphere*, 67 99-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Khorasanizadeh, M.H., Monsef, R., Salavati-Niasari, M., Majdi, H.S., Al-Azzawi, W.K., & Hashim, F.S., (2023), Schiff-base ligand assisted synthesis of DyVO4/ AgBr nanocomposites, characterization, and investigation of photocatalytic activity over organic dye contaminants, *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 105020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Khojasteh, H., Salavati-Niasari, M., & Sangsefidi, F.S., (2018), Photocatalytic evaluation of RGO/TiO2NWs/Pd-Ag nanocomposite as an improved catalyst for efficient dye degradation, *Journal of Alloys and Compounds*, 746, 611-618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Kumari, K., Singh, M., Tomar, N., Kumar, A., & Singh, P., (2023). Adsorption of pesticides using graphene oxide through computational and experimental approach. *Journal of Molecular Structure*. Vol. 1291, article id. 136043.
- Mokhtari, P., Ghaedi, M., Dashtian, K., Rahimi, M.R., & Purkait, M.K., (2016), Removal of methyl orange by copper sulfide nanoparticles loaded activated carbon: Kinetic and isotherm investigation, *Journal of Molecular Liquids*, 219, 299-305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Mosleh S., Rahimi, M., Ghaedi, M., Dashtian, K., & Hajati, S., (2016), Photocatalytic degradation of binary mixture of toxic dyes by HKUST-1 MOF and HKUST-1-SBA-15 in a rotating packed bed reactor under blue LED illumination: central composite design optimization, *RSC Advances* ,6 , 17204-17214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.

- Mosleh S., Rahimi, M., Ghaedi, M., Dashtian, K., & Hajati, S., (2016), BiPO₄/Bi₂S₃-HKUST-1-MOF as a novel blue light-driven photocatalyst for simultaneous degradation of toluidine blue and auramine-O dyes in a new rotating packed bed reactor: optimization and comparison to a conventional reactor, *RSC Advances*, 6, 63667-63680. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Meng X., Zhang, Z., & Li, X., (2015), Synergetic photoelectrocatalytic reactors for environmental remediation: A review, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 24, 83-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Mohammed A.A., & Ali, D.K., (2023), Bentonite-layered double hydroxide composite as potential adsorbent for removal of abamectin pesticide from wastewater, *Results in Surfaces and Interfaces*, 10, 100099. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Matos, T.A.F., Dias, A.L.N., Reis, A.D.P., Silva, M.R.A., & Kondo, M.M., (2012), Degradation of Abamectin Using the Photo-Fenton Process, *International Journal of Chemical Engineering*, 915724. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Soleiman, M., & Rahimi, M.R., (2016), Intensification of abamectin pesticide degradation using the combination of ultrasonic cavitation and visible-light driven photocatalytic process: synergistic effect and optimization study, *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1797-1804, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Nazé, P., (2023), Adiabatic processes like isothermal processes, *Physical Review E*, 107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.107.064114>.
- McKellar, Q.A., & Benchaoui, H.A., (1996), Avermectins and milbemycins, *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*, 19, 331-351. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2885.1996.tb00062.x>.
- Rout, D. R., Jena, H.M., Baigenzhenov, O. R. & Bandegharai, A. H., (2023), Graphene-based materials for effective adsorption of organic and inorganic pollutants: A critical and comprehensive review. *Science of the Total Environments*, Volume 863, Article 160871
- Nai-Qing, S., Wang, G., Li, Y., & Baia, S., (2020), Removal of abamectin and conventional pollutants in vertical flow constructed wetlands with Fe modified biochar, *RSC Advances*, 10, 44171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Omura, S., (1998) Ivermectin, 25 years and still going strong, *International Journal of Antimicrobial Agents*, 31, 91-98.
- Sathishkumar, P., Mangalaraja, R.V., Rozas, O., Mansilla, H.D., Gracia-Pinilla, M., Anandan, S., Gracia-Pinilla, M.A., & Anandan, S., (2014), Low frequency ultrasound (42 kHz) assisted degradation of Acid Blue 113 in the presence of visible light driven rare earth nanoclusters loaded TiO₂ nanophotocatalysts, *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1675-1681. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Shehdeh, J., Khalaf, O., Obaid, A.A., Hammouti, B., Hadda, T.B., Jodeh, W., Haddad, M., & Warad, I., (2014), Adsorption and kinetics Study of abamectin and imidacloprid in greenhouse soil in Palestine, *Journal of Materials and Environmental Science*, 5 (2), 571-580. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Tadawatta, P., Kawashima, K., Sittivanichai, S., Thienprasert, T., Mori, T., & Pongprayoon, P., (2025). Exploring the capabilities of nonosized graphene oxide as a pesticide nanosorbent stimulation studies. *ACS Omega*, 10(9) 8951-8959.
- Taghiyeva, N., Hasanova, U., Millet, M., Gardiennet, C., & Gakhramanova, Z., (2024). Synthesis and characterization of novel adsorbent based on functionalization of graphene with Schiff base and reduces schiff base for pesticide removal. *Materials* 17 (16), 4096.
- Vipin, K., Wang, X., & Lee, P.S., (2013), Synthesis of pyramidal and prismatic hexagonal MoO₃ nanorods using thiourea, *CrystEngComm*, 15, 7663-7669. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Wang, S. H., Zeng, X. C., Ho, Q. W. & Zheng, Y. G., (2015) Degradation of abamectin by newly

- isolated *Stenotrophomonas maltophilia* ZJB-14120 and characterization of its abamectin-tolerance mechanism. *Research in Biotechnology*, 166(5):408-418.
- Wu, T.Y., Guo, N., Teh, C.Y., & Hay, J.X.W., (2012), Advances in ultrasound technology for environmental remediation, *Springer Science & Business Media*.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>
- Wall, R., & Strong, L., (1987), Environmental consequences of treating cattle with the antiparasitic drug ivermectin, *Nature* 327, 418–421. <https://doi.org/10.1038/327418a0>.
- Xiong S.F., Yin, Z.L., Yuan, Z.F., Yan, W.B., Yang, W.Y., Liu, J.J., & Zhang, F., (2012), Dual-frequency (20/40 kHz) ultrasonic assisted photocatalysis for degradation of methylene blue effluent: synergistic effect and kinetic study, *Ultrasonics Sonochemistry*, 19, 756-761.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.
- Yuan-Shan, W., Zheng, X., Qi-Wei, H., & Zheng, Y., (2015), Degradation of abamectin by newly isolated *Stenotrophomonas maltophilia* ZJB-14120 and characterization of its abamectin-tolerance mechanism, *Research in Microbiology*, 166, 408-418.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.10.025>.