

Kinetic Evaluation of the Removal of Heavy Metal Lead Ions from Aqueous Solution Using a Zirconium-Based Metal–Organic Framework (UiO-66)

Mahdi Takalo ¹, Sepehr Shakerizadeh ¹, Iman Mobasherpour ^{2*}, Esmail Salahi ³

¹ MSc Student, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

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

³ Professor, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

*Corresponding Author's Email: iman.mobasherpour@gmail.com (Iman Mobasherpour)

Paper History:

Received: 2025-12-27

Revised: 2026-02-25

Accepted: 2026-05-16

Keywords:

Metal–Organic Framework,
Solvothetmal,
Lead,
Adsorption,
Kinetic Models

Abstract Due to the high toxicity, chemical stability, bioaccumulation in food chains, and non-biodegradable nature of heavy metal contaminants, lead pollution, in particular, has emerged as one of the world's most significant environmental and public health issues. Therefore, the development of sustainable, economically viable, and efficient technologies for the removal of hazardous pollutants from water resources is of great importance. In this regard, the current study investigates the synthesis and characterization of a zirconium-containing metal-organic framework (UiO-66) as an adsorbent for the removal of divalent lead cations (Pb^{2+}) from aqueous solutions through adsorption. In addition, the adsorption behavior and mechanism were investigated using various kinetic models. The results demonstrated that the UiO-66 adsorbent exhibits a considerable adsorption capacity of 114.46 mg/g for Pb^{2+} ions, indicating its effective performance in removing this heavy metal contaminant. Kinetic evaluation demonstrated that the adsorption behavior is best described by the pseudo-second-order model, with an excellent correlation coefficient ($R^2 = 0.999$), indicating that chemisorption predominates as the controlling mechanism of the process. In conclusion, the findings of this study introduce UiO-66 as a stable and promising adsorbent with significant potential for the efficient purification of lead-contaminated water.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.568922.1352>

URL: https://www.jamt.ir/article_245412.html

1. INTRODUCTION

Access to clean water is crucial for human well-being and ecological stability (Wang et al., 2024). Nevertheless, water resources are consistently endangered by industrial contaminants, including heavy metals, persistent organic pollutants, radioactive substances, and pathogenic agents (Mohamed et al., 2024). Notably, heavy metals like lead, because of their long-term environmental stability and toxic effects, may induce anemia, renal dysfunction, hepatic inflammation, and multiple cancers (Collin et al., 2022; Jia et al., 2021). Adsorption technology is a simple, accessible, and cost-effective method for removing heavy metals from water (Zhou et al., 2024). Its mechanism involves a fluid (adsorbate) being captured onto the surface of a porous solid material (adsorbent) through physical and chemical bonding (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Numerous adsorbents, such as silica (Ramezani et al., 2026), carbon nanotubes (Aboughaly, 2026), bentonite (Kadirbayeva et al., 2026), biochar (Shakerizadeh et al., 2025; Takalo et al., 2025), and metal–organic frameworks (MOFs) (Chattopadhyay et al., 2026), have been investigated for the removal of various heavy metals, with MOFs being among the most prominent. UiO-66 is a zirconium-based metal–organic framework composed of Zr^{4+} clusters and terephthalic acid (H_2BDC) linkers. Its unique surface characteristics have made it a valuable material for adsorption applications and separation processes. Paz et al. utilized a magnetic Zr-MOF composite (MOF-808/ Fe_3O_4) to adsorb lead

ions from aqueous solutions. The adsorption performance attained 44.2 mg/g when 30 mg of the adsorbent was contacted with a 50 mg/L Pb^{2+} solution for 12 hours (Paz et al., 2022). In the present study, a Zr-MOF known as UiO-66 was synthesized and characterized, and this material was employed as an adsorbent to remove lead ions from aqueous solutions. The research's main focus is the investigation of the adsorption process and the analysis of the associated kinetic models, a topic of considerable importance given the need for effective lead removal from natural environments and water resources. Moreover, by presenting an efficient approach for the use of UiO-66, this study represents an innovative step toward improving MOF-based adsorbents for water purification.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Production and Characterization of UiO-66

The solvothermal approach was adopted for the synthesis of UiO-66. Terephthalic acid (0.9 g) and zirconyl chloride octahydrate (1.1 g) were added to 60 mL of DMF and magnetically stirred at 250 rpm for 30 minutes. The prepared mixture was transferred to a 100 mL autoclave and maintained in an oven at 120 °C for 24 h. The resulting solid was successively rinsed with DMF followed by methanol, centrifuged, and oven-dried at 70 °C for 24 h, yielding a white UiO-66 powder.

Please cite this article as: Takalo, M., Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., & Salahi, E. (2026). Kinetic Evaluation of the Removal of Heavy Metal Lead Ions from Aqueous Solution Using a Zirconium-Based Metal–Organic Framework (UiO-66), *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 15, No. 1, 1-14. <https://doi.org/10.30501/jamt.2026.568922.1352>.



The as-synthesized UiO-66 was then characterized using XRD, FT-IR, FE-SEM, and EDS analyses.

2.2. Batch Adsorption Experiment

A 500 mL aqueous solution containing 400 mg/L of lead ions was prepared and magnetically stirred at 300 rpm for 30 minutes to ensure homogeneity. Subsequently, 0.2 g of pristine UiO-66 powder was added as the adsorbent, and the adsorption process was carried out under continuous agitation. Samples were collected at contact times of 5, 10, 30, 60, 120, and 180 minutes. At each sampling point, 10 mL of the solution was withdrawn and centrifuged at 2000 rpm for 2 minutes, yielding a clear supernatant. The lead concentration in the supernatant was quantified using atomic absorption spectroscopy (AAS), and all measurements were performed in triplicate. The recovered solid was dried at 70 °C for 24 h and subsequently analyzed using FE-SEM and EDS.

2.3. Adsorption Kinetic Models

Kinetic models of adsorption are commonly employed to investigate both the adsorption rate and underlying mechanism. The pseudo-first-order (PFO), pseudo-second-order (PSO), Elovich, and intra-particle diffusion (IPD) models were applied in the present work.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The variation in the adsorption capacity (q_t) of UiO-66 with contact time is illustrated in Figure 1. A rapid increase in q_t was observed within the first 20 minutes, reaching 78.63 mg/g, indicating a strong affinity for Pb^{2+} ions and the availability of abundant accessible active sites. As the contact time increased, the adsorption rate gradually decreased, and equilibrium was attained within 60–120 minutes. The equilibrium adsorption capacity of 114.46 mg/g confirms the high efficiency of UiO-66 for Pb^{2+} adsorption, particularly at high initial concentrations.

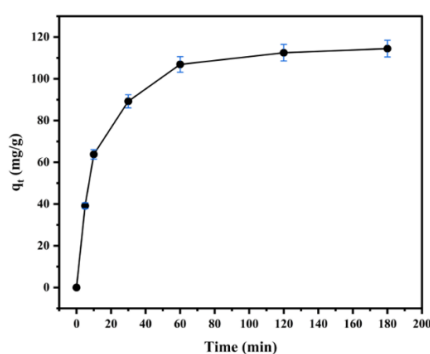


Figure 1. Pb^{2+} ion adsorption capacity from aqueous solution by the UiO-66 adsorbent (Adsorption experimental conditions: Pb^{2+} ion concentration of 400 mg/L, adsorbent mass of 0.2 g, stirring speed of 300 rpm, solution temperature of 25 °C, and solution pH of 7)

Figure 2a shows the surface morphology of UiO-66 after Pb^{2+} adsorption from an aqueous solution, obtained by FE-SEM at a magnification corresponding to a 5 μ m scale. Figure 2b presents the corresponding EDS analysis. The EDS results clearly confirm the presence

of lead (Pb) after adsorption, demonstrating that UiO-66 effectively removes Pb^{2+} ions from the aqueous medium. Moreover, the appearance of distinct Pb peaks in the EDS spectrum indicates a strong interaction and stable binding of Pb^{2+} ions to the UiO-66 surface.

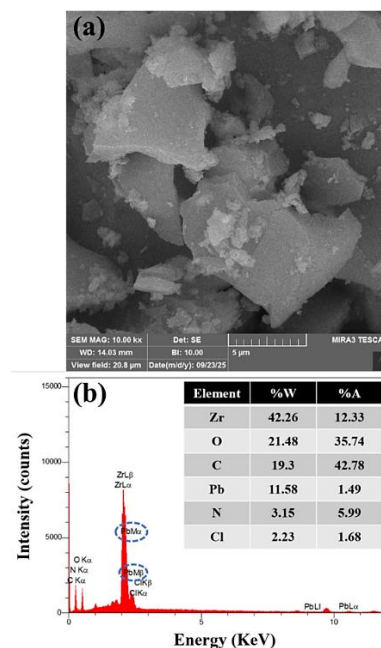


Figure 2. (a) FE-SEM image of UiO-66 at 5 μ m scale and (b) EDS analysis of the sample after Pb^{2+} adsorption from aqueous solution

Figures 3a and 3b show the linear representations of the IPD and PSO kinetic models, respectively, using the UiO-66 adsorbent for Pb^{2+} ion removal from aqueous solution.

Evaluation of these kinetic models indicated that the adsorption behavior occurs through multiple stages. The first stage involves the rapid transfer of Pb^{2+} ions from the aqueous solution to the external surface of the adsorbent (External mass transfer). The second stage corresponds to the gradual intraparticle diffusion of Pb^{2+} ions into the porous network of UiO-66, reaching the active adsorption sites (Pore diffusion). The third stage, the slowest and rate-determining step, involves chemical interaction (bond formation) at the active sites, and is best described by the PSO model, exhibiting the highest correlation coefficient ($R^2 = 0.999$) among the evaluated models.

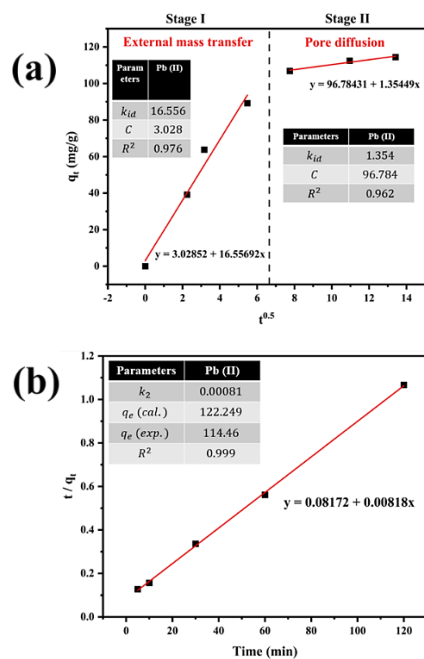


Figure 3. Linearized kinetic models for the adsorption of Pb^{2+} ions from aqueous solutions by the UiO-66 adsorbent: (a) intra-particle diffusion and (b) pseudo-second-order

4. CONCLUSION

In this investigation, UiO-66, a zirconium-containing metal-organic framework (Zr-MOF), was synthesized via the solvothermal method and subsequently characterized. The synthesized UiO-66 was employed as an adsorbent for the removal of Pb^{2+} ions from aqueous solutions. The results demonstrated that at an initial Pb^{2+} concentration of 400 mg/L under neutral pH conditions, the use of 0.2 g of UiO-66 led to a removal efficiency of 11.44%. Moreover, the adsorption capacity of UiO-66 for Pb^{2+} ions reached 114.46 mg/g at the same initial concentration, indicating the high adsorption efficiency of this material even at a low adsorbent dosage. Kinetic analysis revealed that among the evaluated models, the PSO model gave the best fit to the experimental results, exhibiting a high correlation coefficient ($R^2 = 0.999$).

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to sincerely thank the Materials and Energy Research Center (MERC) in Karaj for providing laboratory facilities and equipment.

REFERENCES

1. Aboaghy, M. (2026). Carbon nanotubes and its derivative composites for heavy metal adsorption. In *Composites and Biocomposites for Heavy Metal Adsorption* (pp. 107-124). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31528-2.00015-9>
2. Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
3. Chattopadhyay, K., Mandal, M., & Maiti, D. K. (2026). Synthesis, application, and efficiency of metal-organic frameworks for heavy metal adsorption. In *Composites and Biocomposites for Heavy Metal Adsorption* (pp. 273-290). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31528-2.00006-8>
4. Collin, M. S., Venkatraman, S. K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Stacey, R. S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., & Tovar, G. I. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
5. Jia, L., Wu, W., Zhang, J., & Wu, H. (2021). Insight into heavy metals (Cr and Pb) complexation by dissolved organic matters from biochar: Impact of zero-valent iron. *Science of The Total Environment*, 793, 148469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148469>
6. Kadirbayeva, A. A., Ishanova, M. N., & Minakowski, A. (2026). Comparative activation of Darbaza bentonite for heavy metal removal from industrial wastewaters: Structural characterization and kinetic insights. *Desalination and Water Treatment*, 101629. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101629>
7. Mohamed, S. M. I., Yilmaz, M., Güner, E. K., & El Nemr, A. (2024). Synthesis and characterization of iron oxide-commercial activated carbon nanocomposite for removal of hexavalent chromium (Cr^{6+}) ions and Mordant Violet 40 (MV40) dye. *Scientific Reports*, 14(1), 1241. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51587-6>
8. Paz, R., Viltres, H., Gupta, N. K., Romero-Galarza, A., & Leyva, C. (2022). Magnetic MOF-808 as a novel adsorbent for toxic metal removal from aqueous solutions. *Environmental Science: Advances*, 1(2), 182-191. <https://doi.org/10.1039/D2VA00010E>
9. Ramezani, S., Moghaddas, J., & Ghovvati, M. (2026). Smart silica aerogel for the efficient removal of heavy metals from real industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(2), 142. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06942-z>
10. Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., Sabzehmeidani, M. M., & Takalo, M. (2025). Platanus orientalis L. leaves residue-derived biochar: investigating the effects of synthesis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(10), 15305-15310. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06320-8>
11. Takalo, M., Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., & Sabzehmeidani, M. M. (2025). Investigation and Comparison of the Effect of Pyrolysis Temperature on the Microstructure and Properties of Biochar Derived from Platanus orientalis L. Leaves. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 14(3), 1-10. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.541645.1335>
12. Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijnveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., van Vliet, M. T., & Strokal, M. (2024). A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communications*, 15(1), 880. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>
13. Zhou, Y., Li, F., He, Y., Qiu, Y., Zhou, Z., Bai, H., Jiang, F., Wang, S., & Yang, X. (2024). Lanthanum (III)-2, 5-Pyrazinedicarboxylate framework as an antibacterial adsorbent for highly efficient and selective capture of Pb (II) and Cd (II) from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 345, 127329. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127329>



مقاله‌ی کامل پژوهشی

ارزیابی سینتیکی حذف یون‌های فلز سنگین سرب از محلول آبی به‌وسیله‌ی چهارچوب فلزی - آلی زیرکونیومی

مهدی تکلو^۱، سپهر شاکری‌زاده^۱، ایمان مباشرپور^{۲*}، اسمعیل صلاحی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۲دانشیار، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳استاد، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

چکیده آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه فلز سرب به دلیل سمیت بالا، قابلیت تجمع در زنجیره‌های غذایی، پایداری شیمیایی و زیست‌تخریب‌ناپذیری به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی در سطح جهانی تبدیل شده است. از این رو، توسعه‌ی فناوری‌های کارآمد، اقتصادی و پایدار برای حذف این آلاینده‌های خطرناک از محیط‌های آبی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این خصوص، پژوهش حاضر با سنتز و مشخصه‌یابی نوعی چهارچوب فلزی - آلی زیرکونیومی (UiO-66) به‌عنوان جاذب با روش جذب سطحی به حذف کاتیون‌های فلزی دوظرفیتی سرب (Pb^{2+}) از محلول آبی متمرکز شده است. همچنین، رفتار و سازوکار فرایند جذب از طریق مدل‌های سینتیکی مختلف تحلیل شد. نتایج این پژوهش نشان داد که جاذب UiO-66 دارای ظرفیت جذب مناسبی معادل $114/46$ میلی‌گرم بر گرم برای یون‌های Pb^{2+} است که بیانگر کارایی مناسب این ماده در جذب این نوع آلاینده‌ی فلزی است. تحلیل سینتیکی داده‌ها نشان داد که فرایند جذب به‌خوبی از مدل سینتیکی شبه‌مرتبه‌ی دوم (PSO) پیروی می‌کند که ضریب هم‌بستگی بسیار بالای آن ($R^2 = 0/999$) گواه این امر است. در جمع‌بندی، این پژوهش ماده‌ی جاذب UiO-66 را به‌عنوان جاذبی پایدار و امیدبخش برای پالایش مؤثر آب‌های آلوده به سرب معرفی می‌کند.

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶

پذیرش قطعی: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

کلیدواژه‌ها:

چهارچوب فلزی - آلی،

سولوترمال،

سرب،

جذب سطحی،

مدل‌های سینتیکی



<https://doi.org/10.30501/jamt.2026.568922.1352>

URL: https://www.jamt.ir/article_245412.html

۱- مقدمه

برای انسان و سایر موجودات زنده همواره مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند (Liu et al., 2025). یکی از سمی‌ترین و سرطان‌زاترین این فلزات سرب (Pb) است (Jia et al., 2021). براساس استانداردهای سازمان جهانی بهداشت، حداکثر غلظت مجاز سرب در آب آشامیدنی $0/07$ میلی‌گرم بر لیتر است (Hosseini et al., 2022). همچنین، گزارش‌های آژانس حفاظت از محیط‌زیست نشان می‌دهد که حتی مقادیر بسیار اندک این فلز نیز می‌تواند آثار زیان‌بار متعددی بر سلامت انسان بر جای گذارد. از جمله‌ی این آثار می‌توان به کم‌خونی، نارسایی کلیوی، التهابات

آب پاک یکی از عناصر اساسی برای حفظ تعادل زیست‌بوم و صیانت از سلامت انسان و سایر گونه‌های زیستی به شمار می‌رود (Wang et al., 2024). با این حال، حجم قابل‌توجهی از آلاینده‌ها همچون فلزات سنگین، ترکیبات آلی پایدار، مواد رادیواکتیو و عوامل بیماری‌زا، که عمدتاً از فعالیت‌های انسانی ناشی می‌شوند، به‌طور مستمر امنیت و پایداری منابع آبی را تهدید می‌کنند (Mohamed et al., 2024).

در میان این آلاینده‌ها، فلزات سنگین به دلیل کاربردهای گسترده‌ی صنعتی، پایداری بالا در محیط زیست و سمیت مزمن

عهده‌دار مکاتبات: ایمان مباشرپور

نشانی: ایران، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده‌ی سرامیک

پیام نگار: iman.mobasherpour@gmail.com

کبدی و انواع سرطان‌ها اشاره کرد (Kinuthia et al., 2020; Collin et al., 2022). با توجه به این آثار مخرب، ضرورت حذف این فلز از محیط و منابع طبیعی (به‌ویژه منابع آب) بیش‌ازپیش آشکار می‌شود. روش‌های گوناگونی برای حذف فلزات سنگین از آب به کار گرفته می‌شود. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به تبادل یونی (Dabrowski et al., 2004)، رسوب شیمیایی (Sun et al., 2020)، استخراج با حلال (Merroune et al., 2024)، فتوکاتالیست (Qi et al., 2023)، فیلتراسیون غشایی (Han et al., 2022)، و جذب سطحی (Li et al., 2025; Ziaei-Rad et al., 2025) اشاره کرد. در این میان، فناوری جذب سطحی به دلیل سادگی، مقرون‌به‌صرفه بودن، قابلیت احیا و استفاده‌ی مجدد از ماده‌ی جاذب و همچنین جلوگیری از ایجاد آلودگی ثانویه یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها برای حذف فلزات سنگین از آب به شمار می‌رود (Li et al., 2023; Zhou et al., 2024). فرایند جذب سطحی به این صورت عمل می‌کند که یک سیال (اعم از گاز، مایع یا ترکیبی از این دو) از طریق پیوندهای شیمیایی یا فیزیکی به سطح بستری متخلخل و جامد (ماده‌ی جاذب) جذب می‌شود (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). جاذب‌های متداول برای حذف فلزات سنگین از آب شامل موادی همچون رس‌های طبیعی (Kadirbayeva et al., 2026; Ramezani et al., 2026)، مواد کربنی (مانند زغال زیستی، کربن فعال و نانولوله‌های کربنی) (Aboughaly, 2026; Shakerizadeh et al., 2025; Takalo et al., 2025)، باقی‌مانده‌ی محصولات کشاورزی، زئولیت‌ها و چهارچوب‌های فلزی-آلی هستند (Aziz et al., 2025; Eleraky et al., 2025; Jalilian et al., 2025; Lingamdinne et al., 2025; Meng et al., 2025; Shabbirahmed et al., 2025). چهارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) از شبکه‌های منظم و متخلخلی تشکیل شده‌اند که در آن‌ها گره‌های فلزی با استفاده از اتصال‌دهنده‌های آلی و از طریق پیوندهای کئوردیناسیونی به یکدیگر متصل می‌شوند (Wang et al., 2025a). سنتز این مواد با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که از جمله می‌توان به روش‌های الکتروشیمیایی، سونوشیمیایی، مکانوشیمیایی، ماکروویو و هیدرو/سولوترمال اشاره کرد (Akmal et al., 2025; An et al., 2025; Bhanderi et al., 2025; Wang et al., 2025b). در میان این روش‌ها، روش سولوترمال به‌عنوان یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین تکنیک‌ها استفاده می‌شود

ماده‌ی UiO-66 نوعی چهارچوب فلزی-آلی مبتنی بر فلز زیرکونیوم با فرمول شیمیایی $Zr_6O_4(OH)_4(BDC)_6$ است که نخستین بار کاوکا و همکارانش در دانشگاه اسلو (نروژ) آن را سنتز کردند. این ساختار از خوشه‌های Zr^{4+} و اتصال‌دهنده‌های ترفتالیک اسید (H_2BDC) تشکیل شده است (Cavka et al., 2008). پایداری حرارتی، شیمیایی و مکانیکی بسیار بالای UiO-66 آن را به ماده‌ای ارزشمند برای کاربردهای جذب سطحی و فرایندهای جداسازی تبدیل کرده است (Huang et al., 2025). براساس مطالعات اخیر، شائو و همکاران با استفاده از نمک فلزی نترات روی و لیگاند آلی ۲، ۴، ۶-تری‌آمینوپریمیدین موفق به سنتز نوعی چهارچوب فلزی-آلی از نوع Zn-MOF شدند. آن‌ها از این ماده به‌عنوان جاذب برای حذف یون‌های سرب از محلول‌های آبی از طریق فرایند جذب سطحی استفاده کردند. در شرایطی که غلظت اولیه‌ی یون سرب ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار جاذب ۵۰ میلی‌گرم، زمان تماس ۲ ساعت و pH محلول جاذب برابر با مقدار ۷ بود، جاذب سنتز شده قادر به دستیابی ظرفیت جذب 90 mg g^{-1} شد (Shao et al., 2025).

همچنین، پاز و همکاران نوعی چهارچوب فلزی-آلی مبتنی بر زیرکونیوم (Zr-MOF) به نام MOF-808 را با استفاده از لیگاند آلی تری‌مسیک اسید (H_3BTC) سنتز کردند. سپس، با به‌کارگیری نانوذرات Fe_3O_4 و MOF-808 سنتز شده، کامپوزیت مغناطیسی جدیدی تهیه کردند و آن را به‌عنوان جاذب برای حذف یون‌های سرب از محلول‌های آبی به کار بردند. نتایج نشان داد که در محلولی با غلظت اولیه‌ی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سرب، با ۳۰ میلی‌گرم از جاذب و ۱۲ ساعت زمان تماس، ظرفیت جذب این جاذب به $44/2 \text{ mg g}^{-1}$ می‌رسد (Paz et al., 2022).

در پژوهش حاضر، با توجه به مطالعات پیشین، نوعی چهارچوب فلزی-آلی مبتنی بر زیرکونیوم (Zr-MOF) با نام علمی UiO-66 سنتز و مشخصه‌یابی شد. این ماده به‌عنوان جاذب با هدف حذف فلز سنگین و خطرناک سرب از محلول‌های آبی

4 cm^{-1} ثبت شد. آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) همراه با تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) به‌وسیله‌ی دستگاه شرکت TESCAN (مدل MIRA 3 ساخت کشور جمهوری چک) از سطح UiO-66 انجام شد. این آزمون‌ها با هدف بررسی ریخت‌شناسی سطحی نمونه و همچنین تعیین میزان سرب تثبیت‌شده در سایت‌های فعال جذب جاذب استفاده شدند.

۲-۲- حذف سرب از محلول آبی به روش جذب سطحی

نمک سرب مورد استفاده در این مرحله از پژوهش نترات سرب با فرمول شیمیایی $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ و جرم مولی $331/2$ میلی‌گرم بر لیتر محصول شرکت Merck بود. برای حذف یون‌های Pb^{2+} از محلول آبی به روش جذب سطحی توسط ماده‌ی جاذب UiO-66 ابتدا محلولی با حجم 500 میلی‌لیتر و غلظت 400 میلی‌گرم بر لیتر یون سرب تهیه شد. برای این منظور، محلول در یک بشر قرار داده شد و به‌وسیله‌ی همزن مغناطیسی با سرعت 300 دور بر دقیقه به‌مدت 30 دقیقه هم زده شد تا کاملاً یکنواخت شود. سپس، $0/2$ گرم از پودر UiO-66 خالص به‌عنوان جاذب به محلول افزوده شد و فرایند جذب سطحی با قرار دادن بشر روی همزن مغناطیسی با همان سرعت (300 دور بر دقیقه) آغاز شد. نمونه‌برداری در زمان‌های 5 ، 10 ، 30 ، 60 ، 120 و 180 دقیقه پس از تماس جاذب و جذب‌شونده انجام شد. در هر نوبت نمونه‌گیری، 10 میلی‌لیتر از محلول برداشت شد و سپس به منظور جداسازی محلول شفاف به‌مدت 2 دقیقه و با دور 2000 دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول شفاف جداشده برای تعیین غلظت باقی‌مانده‌ی سرب استفاده شد. اندازه‌گیری غلظت سرب با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) ساخت شرکت **GBC Scientific Equipment Ltd.** (مدل **932 Plus** کشور استرالیا) انجام شد. برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری، غلظت سرب در هر نمونه سه بار به صورت تکراری سنجیده شد. نمونه‌ی جامد باقی‌مانده پس از سانتریفیوژ جمع‌آوری و در آون با دمای 70 درجه‌ی سلسیوس به‌مدت 24 ساعت خشک شد. در ادامه، برای بررسی ریخت‌شناسی و تعیین میزان سرب جذب‌شده، آزمون‌های FE-SEM و EDS بر روی نمونه‌ی جامد خشک‌شده انجام شد. برای تعیین میزان حذف سرب از محلول (برحسب درصد)

استفاده شده است. تمرکز اصلی این پژوهش بر مطالعه‌ی فرایند جذب سطحی و تحلیل مدل‌های سینتیکی مرتبط با آن است؛ موضوعی که با توجه به ضرورت حذف مؤثر سرب از محیط‌های طبیعی و منابع آب بسیار بااهمیت است. این مطالعه، با ارائه‌ی رویکردی کارآمد در استفاده از UiO-66، گامی نوآورانه در بهبود جاذب‌های مبتنی بر چهارچوب‌های فلزی-آلی برای تصفیه‌ی آب به شمار می‌رود.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- سنتز و مشخصه‌یابی ماده‌ی UiO-66

مقدار $1/1$ گرم زیرکونیوم اکسی‌کلرید اکتاهیدرات با فرمول شیمیایی $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (خلوص 98 درصد، محصول شرکت MERCK) به همراه $0/9$ گرم ترفتالیک اسید با فرمول شیمیایی $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})_2$ (خلوص 98 درصد، محصول شرکت MERCK) در 60 میلی‌لیتر دی‌متیل فرم‌امید (DMF) با فرمول شیمیایی $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ (خلوص 99 درصد، محصول شرکت MERCK) روی همزن مغناطیسی با سرعت 250 دور بر دقیقه به‌مدت 30 دقیقه حل شد. در مرحله‌ی بعد، محلول به‌دست‌آمده به اتوکلاوی با ظرفیت 100 میلی‌لیتر منتقل و به‌مدت 24 ساعت در آون با دمای 120 درجه‌ی سلسیوس قرار داده شد. پس از اتمام فرایند سولوترمال، محتویات اتوکلاو به‌طور جداگانه سه بار با DMF و سپس سه بار با متانول شست‌وشو داده و سانتریفیوژ شد. جامد حاصل در آون با دمای 70 درجه‌ی سلسیوس به‌مدت سه روز به‌طور یکنواخت خشک شد. در نهایت، پودر سفیدرنگ UiO-66 به‌عنوان محصول نهایی به دست آمد.

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی و تعیین فازهای بلوری موجود در UiO-66 با استفاده از دستگاه شرکت Philips (مدل **PW3710** ساخت کشور هلند) انجام شد. این اندازه‌گیری با تابش **Cu-K α** و گام اسکن $0/02$ درجه انجام شد. شناسایی و تحلیل پیک‌های پراش نیز با بهره‌گیری از نرم‌افزار تخصصی **X'Pert HighScore Plus** انجام شد. آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) به منظور شناسایی گروه‌های عاملی موجود در UiO-66 با استفاده از دستگاه شرکت **Bruker** (مدل **VECTOR 33** ساخت کشور آلمان) انجام شد. این آزمون با تعداد 45 اسکن و وضوح طیفی

مدل شبه‌مرتب‌بندی اول (برحسب min^{-1})، پارامتر k_2 بیانگر ثابت سرعت در مدل شبه‌مرتب‌بندی دوم (برحسب g/mg.min)، پارامتر α بیانگر نرخ اولیه جذب در مدل الویچ (برحسب mg/g.min)، پارامتر β بیانگر انرژی فعال‌سازی و ناهمگنی سطح در مدل الویچ (برحسب گرم بر میلی‌گرم)، پارامتر k_{id} بیانگر ثابت سرعت در مدل نفوذ درون‌ذره‌ای (برحسب $\text{mg/g.min}^{0.5}$)، پارامتر q_t بیانگر میزان ظرفیت جذب در زمان t (برحسب میلی‌گرم بر گرم) و پارامتر q_e بیانگر میزان ظرفیت جذب در حالت تعادل (برحسب میلی‌گرم بر گرم) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی آزمون پراش پرتو ایکس ماده‌ی جاذب UiO-66

الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی UiO-66 سنتز شده به روش سولوترمال، مطابق شکل ۱، هفت پیک عمده و مهم را نشان می‌دهد که بیانگر تشکیل ساختار بلوری مشخص در ماده است. این پیک‌ها در زوایای 2θ برابر با $7/11$ ، $8/28$ ، $25/57$ ، $30/74$ ، $33/18$ ، $37/46$ و $43/34$ درجه قرار دارند. بررسی فازی نشان می‌دهد که پیک‌های موجود در زوایای 2θ برابر با $7/11$ ، $8/28$ و $33/18$ مربوط به فاز مکعبی $\text{Zr}_{24}\text{O}_{128}\text{C}_{192}$ (شماره‌ی کارت مرجع: ۵۱۷۹-۷۱۰-۹۶) بوده، درحالی‌که پیک‌های موجود در زوایای 2θ برابر با $25/57$ ، $30/74$ ، $37/46$ و $43/34$ نشان‌دهنده‌ی حضور فاز تری‌کلینیک $\text{Zr}_2\text{C}_{10}\text{O}_{34}\text{H}_{30}$ (شماره‌ی کارت مرجع: ۹۶-۴۵۱-۷۹۰۱) هستند. ظهور فاز مکعبی در الگوی پراش می‌تواند بیانگر تشکیل سلول واحد بلوری کامل UiO-66 با تقارن بالا باشد که در آن خوشه‌های Zr_6 به صورت منظم در شبکه‌ی بلوری تکرار شده‌اند. این امر نشان‌دهنده‌ی تشکیل موفق چهارچوب بلوری مورد انتظار است. درمقابل، مشاهده‌ی فاز تری‌کلینیک می‌تواند ناشی از حضور یک فاز ثانویه یا ایجاد نقص‌های ساختاری در چهارچوب UiO-66 باشد. بروز چنین پدیده‌ای در منابع علمی به‌خوبی گزارش شده و با ماهیت نقص‌پذیر این ساختار سازگار است (Shearer et al., 2016). بنابراین، حضور این فاز را می‌توان به تغییرات موضعی در نظم بلوری یا کاهش تقارن ساختاری نسبت داد، بدون آنکه اصل تشکیل چهارچوب UiO-66 را نقض کند.

و همچنین محاسبه‌ی ظرفیت جذب یون سرب توسط جاذب در زمان t و در حالت تعادلی (برحسب میلی‌گرم بر گرم) به‌ترتیب از پارامترهای R ، q_t و q_e مطابق با روابط ارائه‌شده در فرمول‌های (۱)، (۲) و (۳) استفاده شد (Deng et al., 2024). این پارامترها امکان تحلیل دقیق رفتار جذب سطحی و ارزیابی عملکرد جاذب را در شرایط مختلف فراهم می‌کنند.

$$R = \left[\frac{C_i - C_t}{C_i} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_i - C_t) \times V}{m} \quad (2)$$

$$q_e = \frac{(C_i - C_e) \times V}{m} \quad (3)$$

مطابق روابط ذکرشده، پارامتر C_i بیانگر غلظت اولیه‌ی یون‌های سرب در محلول قبل از شروع فرایند جذب (برحسب میلی‌گرم بر لیتر)، پارامتر C_t بیانگر غلظت یون‌های سرب در محلول در زمان t از فرایند جذب (برحسب میلی‌گرم بر لیتر)، پارامتر C_e بیانگر غلظت یون‌های سرب در محلول پس از رسیدن سیستم به تعادل (برحسب میلی‌گرم بر لیتر)، پارامتر V بیانگر حجم محلول جذب (برحسب لیتر) و پارامتر m بیانگر جرم جاذب (برحسب گرم) است.

۳-۲- مدل‌های سینتیکی جذب

مدل‌های سینتیکی جذب برای تحلیل و درک سرعت و سازوکار انجام فرایند جذب سطحی به کار می‌روند. در این مطالعه، از مدل‌های سینتیکی شبه‌مرتب‌بندی اول (PFO)، شبه‌مرتب‌بندی دوم (PSO)، الویچ و نفوذ درون‌ذره‌ای (IPD) استفاده شده است که به‌ترتیب مطابق با روابط (۴)، (۵)، (۶) و (۷) معادلات خطی شده آن‌ها بیان شده است (Emenike et al., 2026).

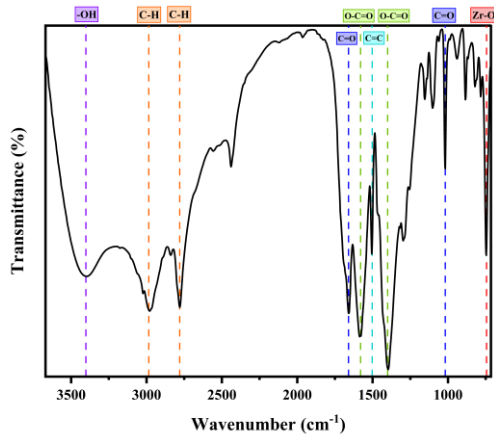
$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta} \right) \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta} \right) \ln t \quad (6)$$

$$q_t = k_{id} t^{0.5} + C \quad (7)$$

برطبق روابط ذکرشده، پارامتر k_1 بیانگر ثابت سرعت در

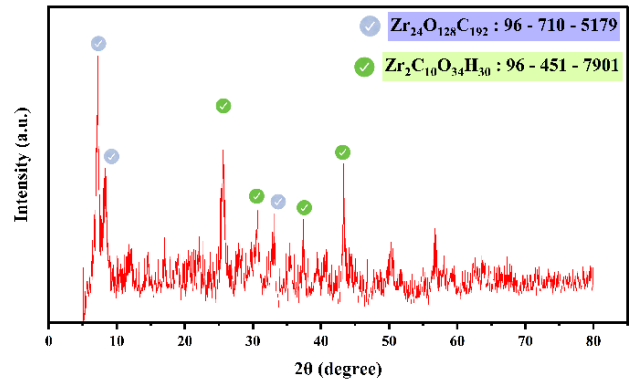


شکل ۲. تصویر طیف مادون قرمز تبدیل فوریه‌ی ماده‌ی UiO-66 سنتز شده به روش سولوترمال

۳-۳- بررسی درصد حذف و میزان جذب سرب از محلول آبی به وسیله‌ی ماده‌ی جاذب UiO-66

شکل ۳-الف تغییرات درصد حذف یون‌های Pb^{2+} از محلول آبی توسط ماده‌ی جاذب UiO-66 را در طول زمان تماس نشان می‌دهد. در دقایق ابتدایی، تماس بین UiO-66 و یون‌های Pb^{2+} ، به‌ویژه در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۲۰ دقیقه، افزایش سریع درصد حذف مشاهده می‌شود که این رفتار ناشی از وجود تعداد زیادی سایت فعال آزاد بر روی سطح جاذب و انتقال سریع یون‌های Pb^{2+} از فاز محلول به سطح UiO-66 است. در این مرحله، مقاومت انتقال جرم ناچیز بوده و فرایند جذب عمدتاً بر روی سطح خارجی جاذب انجام می‌شود. با افزایش زمان تماس از ۳۰ دقیقه به بعد، نرخ افزایش درصد حذف به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد و منحنی به تدریج به سمت حالتی پایدار حرکت می‌کند. این رفتار بیانگر اشباع تدریجی سایت‌های فعال و محدود شدن نفوذ یون‌های Pb^{2+} به داخل منافذ UiO-66 است. در زمان‌های بالاتر از ۶۰ دقیقه، تغییرات درصد حذف بسیار ناچیز است که نشان‌دهنده‌ی رسیدن سیستم به تعادل جذب است. بیشینه‌ی درصد حذف برابر با ۱۱/۴۴ درصد به دست آمده که می‌تواند ناشی از مقدار محدود ماده‌ی جاذب مورد استفاده در آزمایش باشد.

شکل ۳-ب تغییرات ظرفیت جذب (q_t) ماده‌ی جاذب UiO-66 را برحسب زمان تماس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دقایق اولیه، به‌ویژه تا ۲۰ دقیقه، مقدار q_t به سرعت افزایش می‌یابد و به مقدار ۶۳/۷۸ میلی‌گرم بر گرم می‌رسد. این



شکل ۱. تصویر الگوی پراش پرتو ایکس ماده‌ی UiO-66 سنتز شده به روش سولوترمال

۳-۲- بررسی آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه‌ی ماده‌ی جاذب UiO-66

طیف FT-IR نمونه‌ی UiO-66 سنتز شده در شکل ۲ ارائه شده است. پیک مشخص در 748 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوند Zr-O اختصاص دارد که بیانگر تشکیل چهارچوب فلزی-آلی از پیش ماده‌ی $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ است (Garkani Nejad et al., 2023; Sun et al., 2019; Zhao et al., 2021). باندهای واقع در 1640 cm^{-1} و 1600 cm^{-1} به ارتعاشات کششی پیوند C=O مربوط می‌شوند (Ahmadipouya et al., 2021). باندهای شاخص در 1580 cm^{-1} و 1400 cm^{-1} به ترتیب به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن گروه کربوکسیلات (O-C=O) لیگاند آلی نسبت داده شده‌اند (Xu et al., 2024). همچنین، پیک مشاهده شده در 1503 cm^{-1} مطابق با ارتعاش پیوند C=C در حلقه‌ی بنزن است (Yang et al., 2017). حضور پیک‌های 2985 cm^{-1} و 2780 cm^{-1} نشان‌دهنده‌ی ارتعاشات کششی C-H فرمیلی و آلکیلی ناشی از باقی‌مانده‌ی DMF و فرآورده‌های هیدرولیز آن است (Aghajanzadeh et al., 2018; Yao et al., 2025). باند پهن در 3402 cm^{-1} نیز به گروه‌های هیدروکسیل (-OH) نسبت داده می‌شود (Das et al., 2023).

مختلف در برابر فلزات سنگین براساس مطالعات اخیر گزارش شده و با نتایج مطالعه حاضر مقایسه شده است.

جدول ۱. بررسی و مقایسه‌ی ظرفیت جذب چهارچوب‌های

فلزی - آلی مختلف به‌عنوان جاذب در برابر فلزات سنگین

منبع	ظرفیت جذب (mg/L)	نوع فلز سنگین	افزودنی	چهارچوب فلزی - آلی
(Luo et al., 2015)	۱۵/۷۸	Pb(II)	-	MIL-101
(Bakhtiari et al., 2015)	۳۴	Cu(II)	کربن نانومتخلخل	ZIF-8
(Paz et al., 2022)	۴۴/۲	Pb(II)	نانوذرات Fe ₃ O ₄	MOF-808
(Tokaloğlu et al., 2017)	۷۳	Pb(II)	-	MOF-545
(Shao et al., 2025)	۹۰	Pb(II)	-	Zn-MOFs
مطالعه‌ی حاضر	۱۱۴/۴۶	Pb(II)	-	UiO-66

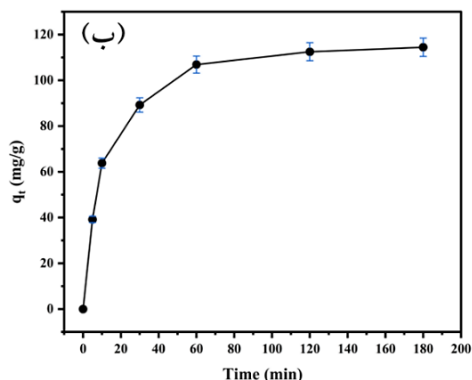
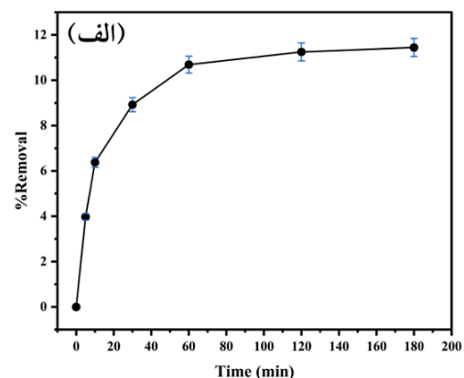
۳-۴- بررسی ریخت‌شناسی سطحی ماده‌ی جاذب UiO-66

قبل و بعد از جذب سرب از محلول آبی

همان‌طور که در تصویر ۴-الف مشاهده می‌شود، ریخت‌شناسی نمونه‌ی UiO-66 سنتز شده پیش از جذب یون‌های Pb²⁺ از محلول آبی با استفاده از FE-SEM و در بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر بررسی شده است. این تصویر نشان‌دهنده‌ی ساختاری با تجمع ذرات در ابعاد میکرومتری است که دارای زبری سطح و ناهمگنی قابل‌توجهی است. ابعاد مشاهده شده بیانگر اندازه‌ی تجمعات ثانویه است و نه لزوماً اندازه‌ی اولیه‌ی کریستالیت‌ها. با این حال، این تصویر به‌خوبی ریخت‌شناسی کلی، زبری سطح و توزیع ساختاری نمونه‌ی سنتز شده را نشان می‌دهد.

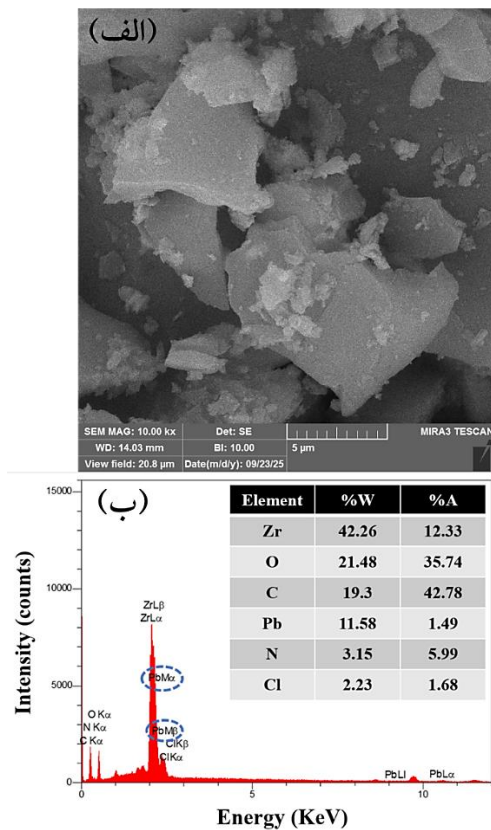
تصویر ۴-ب نتایج آنالیز EDS مربوط به همین نمونه را نشان می‌دهد که حضور عناصر اصلی O, C, Zr, Cl و N را تأیید می‌کند. این نتایج با ساختار شیمیایی UiO-66 سنتز شده سازگاری دارد و بیانگر تشکیل موفق چهارچوب فلزی - آلی است.

افزایش سریع بیانگر تمایل بالای UiO-66 به جذب یون‌های Pb²⁺ و دسترسی آسان یون‌ها به سایت‌های فعال سطحی جاذب است. با افزایش زمان تماس و کاهش تعداد سایت‌های فعال خالی، سرعت جذب کاهش و افزایش q_t به صورت تدریجی ادامه می‌یابد. در بازه‌ی زمانی ۶۰ تا ۱۲۰ دقیقه، منحنی به حالت تقریباً پایدار می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی برقراری تعادل بین فرایندهای جذب و واجذب است. ظرفیت جذب تعادلی مقدار ۱۱۴/۴۶ میلی‌گرم بر گرم به دست آمده که نشان‌دهنده‌ی توان بالای UiO-66 در جذب یون‌های Pb²⁺ حتی در مقدار کم جاذب است. این ظرفیت جذب بالا، علی‌رغم درصد حذف محدود، بیانگر عملکرد مناسب UiO-66 به‌عنوان جاذبی کارآمد برای حذف یون‌های Pb²⁺ از محلول‌هایی با غلظت بالا است.

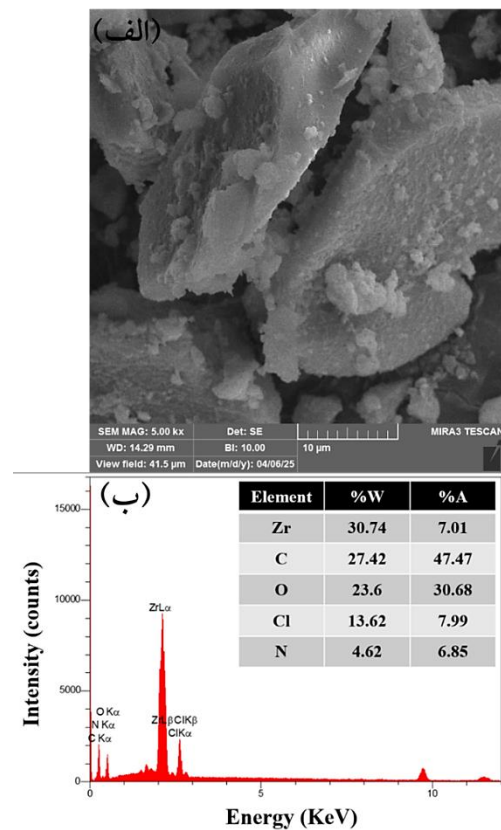


شکل ۳. بررسی جذب یون‌های سرب از محلول آبی به‌وسیله‌ی ماده‌ی جاذب UiO-66: (الف) نمودار درصد حذف و (ب) نمودار ظرفیت جذب جاذب (شرایط آزمایش جذب: غلظت یون‌های سرب برابر ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، جرم جاذب برابر ۰/۲ گرم، سرعت هم‌زدن برابر ۳۰۰ دور بر دقیقه، دمای محلول برابر ۲۵ درجه‌ی سلسیوس و pH محلول برابر ۷)

در جدول ۱، ظرفیت جذب چهارچوب‌های فلزی - آلی



شکل ۵. (الف) تصویر FE-SEM نمونه‌ی UiO-66 با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر و (ب) آزمون EDS نمونه پس از جذب سرب از محلول آبی



شکل ۴. (الف) تصویر FE-SEM نمونه‌ی UiO-66 با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر و (ب) آزمون EDS نمونه پیش از جذب سرب از محلول آبی

۳-۵- بررسی مدل‌های سینتیکی جذب سرب از محلول آبی به‌وسیله‌ی ماده‌ی جاذب UiO-66

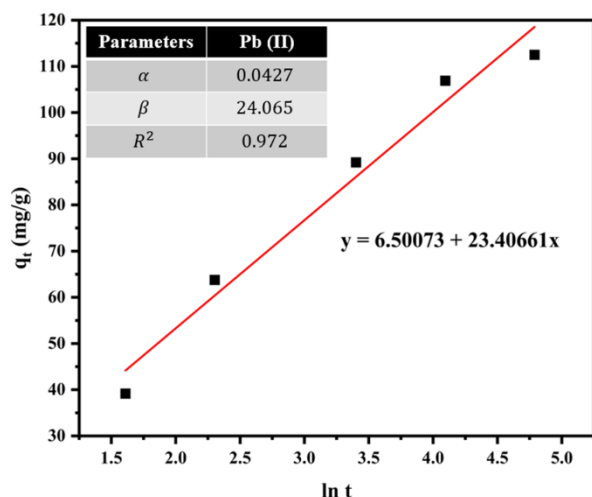
به منظور بررسی سازوکار و سینتیک جذب یون‌های Pb^{2+} بر روی ماده‌ی جاذب UiO-66، داده‌های تجربی با مدل‌های سینتیکی مختلف شامل شبه‌مرتبه‌ی اول، شبه‌مرتبه‌ی دوم، الویچ و نفوذ درون‌ذره‌ای برازش شدند.

مطابق با شکل ۶، مشاهده می‌شود که نمودار خطی $\log(q_e - q_t)$ برحسب زمان نشان‌دهنده‌ی برازش مناسب داده‌ها با مدل سینتیکی شبه‌مرتبه‌ی اول است ($R^2 = 0.976$). مقدار ثابت سرعت این مدل سینتیکی نیز محاسبه شد ($K_1 = 0.31 \text{ min}^{-1}$). با این حال، مقدار ظرفیت جذب محاسبه‌شده ($q_e = 69.35 \text{ mg/g}$) با مقدار تجربی ($q_e = 114.46 \text{ mg/g}$) اختلاف قابل‌توجهی با مقدار تجربی (cal. exp.) دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که مدل شبه‌مرتبه‌ی اول توانایی محدودی در توصیف کامل فرایند جذب Pb^{2+} توسط UiO-66 دارد.

تصویر ۵-الف نمایی از ریخت‌شناسی نمونه‌ی UiO-66 پس از فرایند جذب یون‌های Pb^{2+} از محلول آبی را نشان می‌دهد که با استفاده از FE-SEM و در بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر تهیه شده است. در تصویر ۵-ب، نتایج آنالیز EDS نمونه‌ی مربوطه ارائه شده است.

مطابق نتایج EDS، حضور واضح عنصر سرب (Pb) پس از جذب از محلول آبی مشاهده می‌شود که بیانگر کارایی مناسب UiO-66 در حذف یون‌های Pb^{2+} از محیط آبی است. علاوه بر این، ظهور پیک‌های مشخص سرب در طیف EDS حاکی از برهم‌کنش و اتصال پایدار یون‌های Pb^{2+} با ساختار UiO-66 است.

پارامترهای مرتبط با سرعت اولیه جذب ($\text{mg/g}\cdot\text{min}$) $\alpha = 0.0427$ و انرژی فعال‌سازی و درجه‌ی ناهمگنی سطح $\beta = 24.065 \text{ g/mg}$ نشان می‌دهد که جذب یون‌های Pb^{2+} روی UiO-66 فرایندی ناهمگن است و انرژی فعال‌سازی جذب در طول زمان تغییر می‌کند. این موضوع با ماهیت سطح متخلخل و ناهمگن UiO-66 سازگار است.

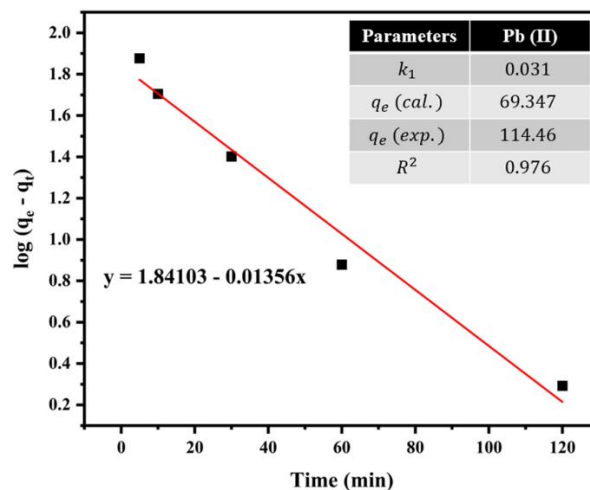


شکل ۸. نمودار خطی مدل سینتیکی الویچ فرایند جذب یون‌های سرب توسط ماده‌ی جاذب UiO-66

مطابق شکل ۹، نمودار q_t برحسب $t^{0.5}$ شامل دو ناحیه‌ی خطی مجزا است که بیانگر چندمرحله‌ای بودن فرایند جذب براساس مدل سینتیکی نفوذ درون‌ذره‌ای است.

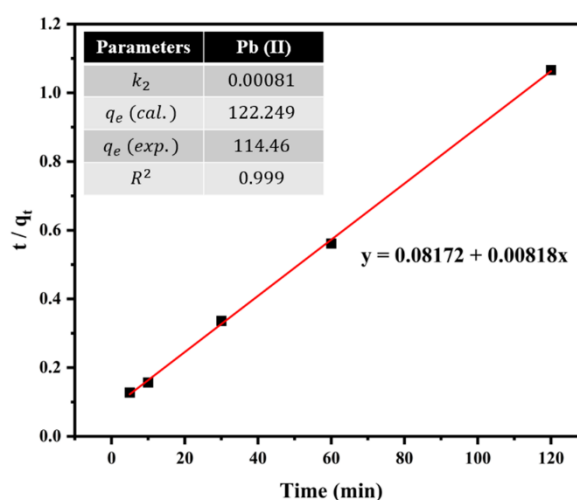
مرحله‌ی اول به انتقال جرم خارجی اختصاص دارد و با شیب نسبتاً بالا ($K_{id} = 16/556 \text{ mg/g}\cdot\text{min}^{0.5}$) مشخص می‌شود. این مرحله بیانگر انتقال سریع یون‌های Pb^{2+} از محلول آبی به لایه‌ی مرزی اطراف ذرات جاذب و سپس به سطح خارجی آن‌ها است. ضریب هم‌بستگی بالای این مرحله ($R^2 = 0.976$) نشان می‌دهد که انتقال جرم خارجی نقش مهمی در سینتیک کلی فرایند جذب ایفا می‌کند.

مرحله‌ی دوم مربوط به نفوذ درون حفرات بوده و با شیب به مراتب کمتر در مقایسه با مرحله‌ی اول ($1/354 \text{ mg/g}\cdot\text{min}^{0.5}$) مشخص می‌شود. این مرحله نشان‌دهنده‌ی نفوذ تدریجی یون‌های Pb^{2+} از سطح خارجی به درون شبکه‌ی متخلخل ماده‌ی جاذب UiO-66 و دسترسی آن‌ها به سایت‌های فعال جذب است. ضریب هم‌بستگی نسبتاً بالای این مرحله ($R^2 = 0.962$) نیز مؤید مشارکت مؤثر نفوذ درون‌ذره‌ای در فرایند جذب است.



شکل ۶. نمودار خطی مدل سینتیکی شبه‌مرتبه‌ی اول فرایند جذب یون‌های سرب توسط ماده‌ی جاذب UiO-66

مطابق با شکل ۷، ضریب هم‌بستگی بسیار بالا ($R^2 = 0.999$) و نزدیکی مقدار ظرفیت جذب محاسبه‌شده ($122/249 \text{ mg/g}$) به مقدار تجربی ($q_e, \text{exp.} = 114/46 \text{ mg/g}$) نشان می‌دهد که مدل سینتیکی شبه‌مرتبه‌ی دوم به‌خوبی رفتار سینتیکی سیستم را توصیف می‌کند. مقدار ثابت سرعت این مدل سینتیکی نیز محاسبه شد ($K_2 = 0/00081 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$). این نتایج بیانگر آن است که فرایند جذب Pb^{2+} عمدتاً از نوع جذب شیمیایی بوده و شامل برهم‌کنش‌های قوی بین یون‌های Pb^{2+} و گروه‌های عاملی موجود در ساختار UiO-66 است.



شکل ۷. نمودار خطی مدل سینتیکی شبه‌مرتبه‌ی دوم فرایند جذب یون‌های سرب توسط ماده‌ی جاذب UiO-66

مطابق شکل ۸، مدل سینتیکی الویچ نیز با ضریب هم‌بستگی بالا ($R^2 = 0.972$) برازش مناسبی از داده‌ها را ارائه داد. مقادیر

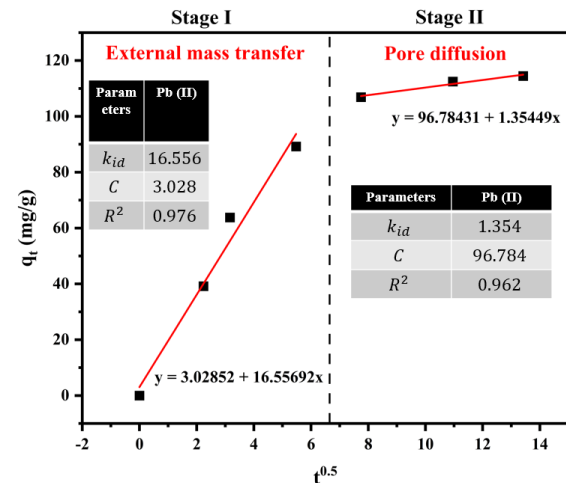
همبستگی ۰/۹۹۹ بهترین توصیف را از رفتار سینتیکی سیستم ارائه می‌دهد.

۵- سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان این تحقیق صمیمانه از همکاری پژوهشگاه مواد و انرژی کرج در تأمین تجهیزات و فضاهای آزمایشگاهی در مسیر اجرای این پژوهش تشکر می‌کنند.

منابع

1. Aboahaly, M. (2026). Carbon nanotubes and its derivative composites for heavy metal adsorption. In *Composites and Biocomposites for Heavy Metal Adsorption* (pp. 107-124). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31528-2.00015-9>
2. Aghajanzadeh, M., Zamani, M., Molavi, H., Khieri Manjili, H., Danafar, H., & Shojaei, A. (2018). Preparation of metal-organic frameworks UiO-66 for adsorptive removal of methotrexate from aqueous solution. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 28(1), 177-186. <https://doi.org/10.1007/s10904-017-0709-3>
3. Ahmadipouya, S., Haris, M. H., Ahmadijokani, F., Jarahiyan, A., Molavi, H., Moghaddam, F. M., Rezakazemi, M., & Arjmand, M. (2021). Magnetic Fe₃O₄@ UiO-66 nanocomposite for rapid adsorption of organic dyes from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 322, 114910. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114910>
4. Akmal, M., Iqbal, M. A., Mawat, T. H., AL-Sharifi, H. K., Iram, G., Majeed, A., Yaqoob, M., & Atif, M. (2025). Synthesis of metal organic frameworks (MOFs) mechanochemically. *Inorganic Chemistry Communications*, 175, 114105. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114105>
5. Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
6. An, J., Dai, X., Liu, Y., Huang, K., & Zhang, D. (2025). Design and process optimization of a new reaction chamber for microwave synthesis of MOFs materials. *Heliyon*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41304>
7. Aziz, K. H. H., Mustafa, F. S., Hamarawf, R. F., & Omer, K. M. (2025). Adsorptive removal of toxic heavy metals from aquatic environment by metal organic framework (MOF): A review. *Journal of Water Process Engineering*, 70, 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106867>
8. Bakhtiari, N., Azizian, S., Alshehri, S. M., Torad, N. L., Malgras, V., & Yamauchi, Y. (2015). Study on adsorption of copper ion from aqueous solution by MOF-derived nanoporous carbon. *Microporous and Mesoporous Materials*, 217, 173-177. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.06.022>
9. Bhandari, P. M., Vyas, A. K., Katariya, D. K., & Khunt, R. C. (2025). Facile sonochemical synthesis and characterization of amino acid-based metal-organic frameworks for enhanced dye adsorption. *Journal of Molecular Structure*, 1326, 141058. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.141058>
10. Cavka, J. H., Jakobsen, S., Olsbye, U., Guillou, N., Lamberti, C., Bordiga, S., & Lillerud, K. P. (2008). A new zirconium inorganic building brick forming metal organic frameworks with exceptional stability. *Journal of the American Chemical Society*, 130(42), 13850-13851. <https://doi.org/10.1021/ja8057953>
11. Chattopadhyay, K., Mandal, M., & Maiti, D. K. (2026). Synthesis, application, and efficiency of metal-organic frameworks for heavy metal adsorption. In *Composites and Biocomposites for*



شکل ۹. نمودار خطی مدل سینتیکی نفوذ درون‌ذره‌ای فرایند جذب یون‌های سرب توسط ماده‌ی جاذب UiO-66

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ماده‌ی UiO-66 که نوعی چهارچوب فلزی-آلی زیرکونیومی (Zr-MOF) است به روش سولوترمال سنتز و سپس مشخصه‌یابی شد. از این ماده به‌عنوان جاذب برای حذف یون‌های Pb²⁺ از محلول آبی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که:

- در محلول جذب با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یون‌های Pb²⁺ و در شرایط pH خنثی، استفاده از ۰/۲ گرم جاذب UiO-66 به حذف ۱۱/۴۴ درصد از یون‌های Pb²⁺ منجر شد.
- ظرفیت جذب جاذب UiO-66 برای یون‌های Pb²⁺ در محلولی با غلظت اولیه‌ی ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برابر ۱۱۴/۴۶ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد که این امر بیانگر کارایی بالای این ماده در حذف یون‌های Pb²⁺ حتی در مقدار کم جاذب است.
- براساس آنالیز EDS تصویر FE-SEM جاذب UiO-66 پس از جذب یون‌های Pb²⁺ از محلول آبی، مقدار ۱۱/۵۸ درصد وزنی از ترکیب نمونه مربوط به یون‌های Pb²⁺ جذب شده است که موفقیت فرایند جذب را نشان می‌دهد.
- بررسی مدل‌های سینتیکی جذب یون‌های Pb²⁺ توسط UiO-66 بیانگر آن است که فرایند جذب در سه مرحله‌ی انتقال جرم خارجی، نفوذ درون‌حفرات و جذب شیمیایی انجام می‌شود. همچنین، جذب شیمیایی مرحله‌ی کنترل‌کننده‌ی فرایند است و مدل شبه‌مرتب‌بندی دوم با ضریب

- community health implication. *Scientific Reports*, 10(1), 8434. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65359-5>
26. Li, J., Lin, G., Liang, H., Wang, S., Hu, T., & Zhang, L. (2025). Adsorptive removal of Pb (II) using magnetic MOFs-modified chitosan composite: Preparation, performance and mechanism. *Separation and Purification Technology*, 362, 131850. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131850>
 27. Li, X., Chen, K., Guo, R., & Wei, Z. (2023). Ionic liquids functionalized MOFs for adsorption. *Chemical Reviews*, 123(16), 10432-10467. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00248>
 28. Lingamdinne, L. P., Kulkarni, R., Ryu, Y., Kim, S. H., Yoon, M. S., Won, S. J., Koduru, J. R., & Chang, Y.-Y. (2025). Efficient synthesis of zeolite-A from bottom ash for sustainable heavy metal removal from real environmental samples. *New Journal of Chemistry*, 49(35), 15457-15469. <https://doi.org/10.1039/D5NJ02470F>
 29. Liu, T., Zhang, Y., Liu, Y., & Chen, B. (2025). Multi-indicator assessment of heavy metal pollution in Qinzhou Harbour sediments: Unraveling ecological and human health risks. *Marine Pollution Bulletin*, 211, 117442. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117442>
 30. Luo, X., Ding, L., & Luo, J. (2015). Adsorptive removal of Pb (II) ions from aqueous samples with amino-functionalization of metal-organic frameworks MIL-101 (Cr). *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60(6), 1732-1743. <https://doi.org/10.1021/je501115m>
 31. Meng, K., Dong, Y., Liu, J., Xie, J., Jin, Q., Lu, Y., & Lin, H. (2025). Advances in selective heavy metal removal from water using biochar: A comprehensive review of mechanisms and modifications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 116099. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116099>
 32. Merroune, A., Ait Brahim, J., Achiou, B., Kada, C., Mazouz, H., & Beniazza, R. (2024). Closed-loop purification process of industrial phosphoric acid: Selective recovery of heavy metals and rare earth elements via solvent extraction. *Desalination*, 580, 117515. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117515>
 33. Mohamed, S. M. I., Yilmaz, M., Güner, E. K., & El Nemr, A. (2024). Synthesis and characterization of iron oxide-commercial activated carbon nanocomposite for removal of hexavalent chromium (Cr⁶⁺) ions and Mordant Violet 40 (MV40) dye. *Scientific Reports*, 14(1), 1241. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51587-6>
 34. Paz, R., Viltres, H., Gupta, N. K., Romero-Galarza, A., & Leyva, C. (2022). Magnetic MOF-808 as a novel adsorbent for toxic metal removal from aqueous solutions. *Environmental Science: Advances*, 1(2), 182-191. <https://doi.org/10.1039/D2VA00010E>
 35. Qi, X., Peng, J., Zhang, X., Cai, H., Huang, Y., Qiao, J., Guo, Y., Guo, X., & Wu, Y. (2023). Computer chip-inspired design of nanocellulose/carbon dots hydrogel as superior intensifier of nano-sized photocatalyst for effective Cr (VI) removal. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130689>
 36. Ramezani, S., Moghaddas, J., & Ghovvati, M. (2026). Smart silica aerogel for the efficient removal of heavy metals from real industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(2), 142. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06942-z>
 37. Safaei, M., Foroughi, M. M., Ebrahimipour, N., Jahani, S., Omid, A., & Khatami, M. (2019). A review on metal-organic frameworks: Synthesis and applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 401-425. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.06.007>
 38. Shabbirahmed, A. M., Jacob, A., Dey, P., Somu, P., & Haldar, D. (2025). Biomass as eco-friendly adsorbents for the removal of emerging pollutants from wastewater: A review. *Discover Applied Sciences*, 7(7), 771. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07463-7>
 39. Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., Sabzehmeidani, M. M., & Takalo, M. (2025). Platanus orientalis L. leaves residue-derived biochar: investigating the effects of *Heavy Metal Adsorption* (pp. 273-290). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31528-2.00006-8>
 40. Collin, M. S., Venkatraman, S. K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Stacey, R. S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., & Tovar, G. I. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
 41. Dabrowski, A., Hubicki, Z., Podkościelny, P., & Robens, E. (2004). Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere*, 56(2), 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.03.006>
 42. Das, S., Yang, D., Conley, E. T., & Gates, B. C. (2023). 2-Propanol Dehydration on the Nodes of the Metal-Organic Framework UiO-66: Distinguishing Catalytic Sites for Formation of Propene and Di-isopropyl Ether. *ACS Catalysis*, 13(21), 14173-14188. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c03500>
 43. Deng, S., Ren, B., Hou, B., Deng, X., Deng, R., Zhu, G., & Cheng, S. (2024). Adsorption of Sb (III) and Pb (II) in wastewater by magnetic γ -Fe₂O₃-loaded sludge biochar: Performance and mechanisms. *Chemosphere*, 349, 140914. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140914>
 44. Eleraky, M. I., Razek, T. M., Hasani, I. W., & Fahim, Y. A. (2025). Adsorptive removal of lead, copper, and nickel using natural and activated Egyptian calcium bentonite clay. *Scientific Reports*, 15(1), 13050. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95184-7>
 45. Emenike, E. C., Okoro, H. K., Al-Senani, G. M., Al-Qahtani, S. D., Iwuozor, K. O., Egbemhenge, A. U., Emeghai, J., & Adeniyi, A. G. (2026). Adsorptive removal of Cr (VI) and Pb (II) using biochar from biomass and plastic waste: characterization and performance evaluation. *Biomass and Bioenergy*, 207, 108722. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108722>
 46. Garkani Nejad, F., Beitollahi, H., & Sheikhshoae, I. (2023). A UiO-66-NH₂ MOF/PAMAM dendrimer nanocomposite for electrochemical detection of tramadol in the presence of acetaminophen in pharmaceutical formulations. *Biosensors*, 13(5), 514. <https://doi.org/10.3390/bios13050514>
 47. Han, S., Li, W., Xi, H., Yuan, R., Long, J., & Xu, C. (2022). Plasma-assisted in-situ preparation of graphene-Ag nanofiltration membranes for efficient removal of heavy metal ions. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127012>
 48. Hosseini, S. S., Hamadi, A., Foroutan, R., Peighambari, S. J., & Ramavandi, B. (2022). Decontamination of Cd²⁺ and Pb²⁺ from aqueous solution using a magnetic nanocomposite of eggshell/starch/Fe₃O₄. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102911. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102911>
 49. Huang, L., Zhou, Y., Duan, X., & Kong, Z. (2025). Hierarchically porous UiO-66 modified-2SH groups for efficient removal of Pb (II) and Cu (II). *Materials Science and Engineering: B*, 313, 117928. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117928>
 50. Jalilian, M., Parvizi, P., & Zangeneh, M. R. (2025). Advances in graphene-based nanomaterials for heavy metal removal from water: Mini review. *Water Environment Research*, 97(3), e70062. <https://doi.org/10.1002/wer.70062>
 51. Jia, L., Wu, W., Zhang, J., & Wu, H. (2021). Insight into heavy metals (Cr and Pb) complexation by dissolved organic matters from biochar: Impact of zero-valent iron. *Science of The Total Environment*, 793, 148469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148469>
 52. Kadirbayeva, A. A., Ishanova, M. N., & Minakouski, A. (2026). Comparative activation of Darbaza bentonite for heavy metal removal from industrial wastewaters: Structural characterization and kinetic insights. *Desalination and Water Treatment*, 101629. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101629>
 53. Kinuthia, G. K., Ngure, V., Beti, D., Lugalia, R., Wangila, A., & Kamau, L. (2020). Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya:

52. Zhao, J., Xu, L., Su, Y., Yu, H., Liu, H., Qian, S., Zheng, W., & Zhao, Y. (2021). Zr-MOFs loaded on polyurethane foam by polydopamine for enhanced dye adsorption. *Journal of Environmental Sciences*, 101, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.08.021>
53. Zhou, Y., Li, F., He, Y., Qiu, Y., Zhou, Z., Bai, H., Jiang, F., Wang, S., & Yang, X. (2024). Lanthanum (III)-2, 5-Pyrazinedicarboxylate framework as an antibacterial adsorbent for highly efficient and selective capture of Pb (II) and Cd (II) from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 345, 127329. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127329>
54. Ziaei-Rad, Z., Adl, M., Pazouki, M., & Allahverdi, A. (2025). Isolating and Identifying Chromium-Reducing Fungus from Pistachio Shells: Investigation on Capacity of Dead and Live Fungi for Cr(VI) Removal. *International Journal of Engineering*, 38(11), 2574-2587. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.11b.09>
- synthesis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(10), 15305-15310. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06320-8>
40. Shao, Z., Di, K., Ding, L., You, F., Fan, C., & Wang, K. (2025). Amino-enriched Zn-MOFs with self-reduction for energy-free simultaneous removal and electrochemical detection of heavy metal ions in the aquatic environment. *Analytica Chimica Acta*, 1333, 343408. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343408>
41. Shearer, G. C., Chavan, S., Bordiga, S., Svelle, S., Olsbye, U., & Lillerud, K. P. (2016). Defect engineering: tuning the porosity and composition of the metal-organic framework UiO-66 via modulated synthesis. *Chemistry of Materials*, 28(11), 3749-3761. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00602>
42. Sun, G. L., Reynolds, E. E., & Belcher, A. M. (2020). Using yeast to sustainably remediate and extract heavy metals from waste waters. *Nature Sustainability*, 3(4), 303-311. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0478-9>
43. Sun, X., Hu, D., Yang, L. Y., Wang, N., Wang, Y.-G., & Ouyang, X. k. (2019). Efficient adsorption of Levofloxacin from aqueous solution using calcium alginate/metal organic frameworks composite beads. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 91(2), 353-363. <https://doi.org/10.1007/s10971-019-05001-7>
44. Takalo, M., Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., & Sabzehmeidani, M. M. (2025). Investigation and Comparison of the Effect of Pyrolysis Temperature on the Microstructure and Properties of Biochar Derived from *Platanus orientalis* L. Leaves. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 14(3), 1-10. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.541645.1335>
45. Tokaloğlu, Ş., Yavuz, E., Demir, S., & Patat, Ş. (2017). Zirconium-based highly porous metal-organic framework (MOF-545) as an efficient adsorbent for vortex assisted-solid phase extraction of lead from cereal, beverage and water samples. *Food chemistry*, 237, 707-715. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.005>
46. Wang, C., He, Y., Xie, J., Wang, S., Chen, Y., Yang, X., Pei, Y., Shi, N., Chiou, M.-F., & Xie, L. (2025a). Enhanced conductivity and energy storing performances of 3D bimetallic conductive metal-organic frameworks based on linear π -conjugated thiazole for supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 167834. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.167834>
47. Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijneveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., van Vliet, M. T., & Strokol, M. (2024). A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communications*, 15(1), 880. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>
48. Wang, Y., Zhao, Y., Gao, Y., Meng, L., Liu, H., & Xie, H. (2025b). Solvothermal synthesis of ternary metal-organic framework electrode material for high-performance hybrid supercapacitors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(2), 94. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-14176-x>
49. Xu, L., Chen, P., Zhang, X., Lan, D. L., Liu, Y., Lai, W., Shehzad, H., Zhou, L., & Ouyang, J. (2024). Synthesis of Zr-based metal-organic framework/MWCNTs composite for adsorption of enrofloxacin from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 334, 126004. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126004>
50. Yang, P., Liu, Q., Liu, J., Zhang, H., Li, Z., Li, R., Liu, L., & Wang, J. (2017). Interfacial growth of a metal-organic framework (UiO-66) on functionalized graphene oxide (GO) as a suitable seawater adsorbent for extraction of uranium (VI). *Journal of materials chemistry A*, 5(34), 17933-17942. <https://doi.org/10.1039/C6TA10022H>
51. Yao, W., Chen, Y., Tian, X., Wang, H., & Wang, J. (2025). Porous Environmental Polarity as a Critical Descriptor for Efficient Proton Conductivity in Metal-Organic Frameworks. *Langmuir*, 41(36), 25058-25065. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c03909>