



Efficiency of natural zeolite mineral and zeolite nanoparticles in the purification of nickel-contaminated water

Mostafa Chorom,¹ , Reyhaneh Mombini² , Hamaid Reza Boostani,³ , iraj kazeminezhad⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of ABC, Tehran, Iran. Email: chorom1338@gmail.com

2. Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University, Tehran, Iran. Email: m.chorom@scu.ac.ir

3. Department of Soil Science, Darab Agricultural College, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: hr.boostani@shirazu.ac.ir

4. Department of Physics, College of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Email: i.kazeminezhad@scu.ac.ir

Article Info

Article type

Research Article

Article history:

Received

20 January 2026

Received in revised form

15 March 2026

Accepted

5 May 2026

Available online

15 June 2026

Keywords:

Micro and nano zeolite,

Water pollution,

Nickel,

Adsorption,

ABSTRACT

Objective: Wastewater treatment using the adsorption process offers dual benefits (i.e., water purification and waste management). Therefore, identifying and developing an accessible, cost-effective, and highly efficient adsorbent for the effective and easy removal of heavy metal ions is essential. Natural materials such as clay minerals, zeolites, and biosorbents are widely recognized as effective and economical adsorbents for removing low concentrations of metal ions. Zeolite minerals are porous materials whose crystalline structure acts like a molecular sieve. Due to their open channels in the lattice, they allow certain ions to pass through while adsorbing others onto their surface. This study aimed to investigate the effect of natural (micron) zeolite and zeolite nanoparticles on the removal of nickel(II) from nickel-contaminated water.

Method: In this study, zeolite nanoparticles were obtained from micro-zeolite powder using a mechanical crystalline ball milling method (600 rpm, 30 hours). XRD, PSA, and SEM analyses were performed to characterize the produced nanoparticles.

Results: The effects of zeolite adsorbent size, solution pH, and salinity on nickel removal efficiency were evaluated at different levels. The optimal pH for maximum nickel removal was found to be 6.5. The results showed that the Langmuir isotherm, with a correlation coefficient of 0.982, was a more suitable model for describing nickel adsorption by nano-zeolite from aqueous solutions. The maximum adsorption capacity for nickel was 58 mg/g, indicating the excellent potential of nano-zeolite for the removal of divalent nickel from aqueous solutions.

Conclusions: The use of inexpensive, safe, and biodegradable nano-adsorbents combined with physical methods can be a practical approach for remediating heavy metal pollution in unsafe waters.

Cite this article: Chorom, M., Mombini, R., Boostani, H. R., & Kazeminezhad, I. (2026). Efficiency of natural zeolite mineral and zeolite nanoparticles in the purification of nickel-contaminated water. *Journal of Environmental Research and Sustainable Development*, 1(1), 1-20.. <https://doi.org/10.22034/fersd.2026.1.1.1>



© © Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: : Lorestan University.



DOI: <https://doi.org/10.22034/fersd.2026.1.1.1>

1. Introduction

Water scarcity and pollution are critical global challenges, threatening ecosystems and human health. Heavy metal contamination, particularly from toxic elements like nickel (II), poses a significant environmental threat due to its non-biodegradable and bioaccumulative nature. Industrial activities such as mining, electroplating, and battery manufacturing are primary sources of nickel discharge into water bodies. Conventional treatment methods, including chemical precipitation and membrane filtration, are often expensive and ineffective for low-concentration pollutants, highlighting the need for cost-effective and efficient alternatives. Adsorption using natural materials has emerged as a promising solution. Natural

zeolites, with their porous, crystalline aluminosilicate structure, act as molecular sieves and exhibit high cation exchange capacity, making them excellent and economical adsorbents for removing heavy metal ions. Recent advancements have focused on enhancing this capacity through the synthesis of zeolite nanoparticles, which offer a higher surface area-to-volume ratio. This study aims to investigate and compare the efficiency of natural (micron) and mechanically produced zeolite nanoparticles in the purification of nickel-contaminated water, evaluating key factors such as pH, contact time, adsorbent dose, and initial metal concentration to determine optimal removal condition

2. Methodology

This study was conducted to evaluate the nickel (II) adsorption capacity of natural zeolite (clinoptilolite) and its nano-sized counterpart. The natural zeolite was procured from a commercial source and purified. Zeolite nanoparticles were synthesized from the micron-sized powder using a mechanical planetary ball milling method (600 rpm, 30 hours). The produced nanoparticles were characterized using X-Ray Diffraction (XRD) to confirm structural integrity, Particle Size Analysis (PSA) to determine size distribution, and Scanning Electron Microscopy (SEM) for morphology assessment. Batch adsorption experiments were conducted to assess the effects of various parameters on nickel removal efficiency. The experimental factors included: solution pH (optimized to 6.5), initial nickel

concentration (10-150 mg/L), adsorbent dosage (0.1-0.4 g), and contact time (5-2880 minutes). A fixed volume of 20 mL of nickel solution was used in each test. After shaking, the samples were centrifuged, and the residual nickel concentration was measured using an atomic absorption spectrophotometer. The adsorption efficiency (E_a) and equilibrium adsorption capacity (q_e) were calculated. The experimental data were analyzed by fitting to Langmuir and Freundlich isotherm models to understand the adsorption mechanism. The experimental design was a completely randomized factorial with three replications. Statistical analyses, including ANOVA, were performed using SAS 9.2, and Duncan's test was used for mean comparisons.

3. Results

Characterization analyses confirmed that zeolite nanoparticles with a size of less than 100 nm were successfully produced. XRD analysis revealed that the ball milling process did not alter the crystalline structure of the zeolite. The results showed that the optimum pH for maximum nickel removal was 6.5. Adsorption efficiency was highly dependent on initial concentration: the highest removal percentages were observed at the lowest concentration (10 mg/L) for both micro and nano zeolites (86.9% and 91.5%, respectively), but efficiency decreased sharply as the initial nickel concentration increased. Increasing the

4. Discussion

The findings of this research indicate that zeolite particle size significantly influences the adsorption process, with nano-zeolite showing superior performance. The high specific surface area of the nanoparticles provides more active sites for nickel ion binding, leading to higher uptake. The optimum pH of 6.5 is consistent with previous studies and can be attributed to the surface charge of the zeolite, which favors the adsorption of divalent cations under these conditions. The decrease in adsorption efficiency at higher initial concentrations is a typical phenomenon, as the number of available active sites becomes a limiting factor. As observed in the sample text's discussion of social networks, the structure and density of

5. Conclusion

The results of this study demonstrate that both natural micron and nano zeolites are effective adsorbents for removing nickel (II) from aqueous solutions, confirming their significant potential for water purification. The nano-zeolite, produced via mechanical ball milling, exhibited a higher maximum

adsorbent dose from 0.1 to 0.4 g significantly enhanced removal for both adsorbent types. The contact time study revealed that the adsorption process reached equilibrium around 360 minutes. Overall, the nano-zeolite consistently outperformed the micro-zeolite in terms of removal efficiency. The adsorption data fitted well to both isotherm models; however, the Langmuir model was found to be more suitable ($R^2 > 0.98$), indicating monolayer adsorption on a homogeneous surface. The maximum adsorption capacity (q_m) for nickel was 58 mg/g for nano-zeolite, compared to 47.6 mg/g for the micro-zeolite.

interactions are critical; in this context, the surface properties of the adsorbent govern the adsorption capacity. The increased adsorption with higher adsorbent doses is due to the greater surface area and availability of exchangeable sites, a point similarly supported by other studies such as Taamneh & Sharadqah (2017). The adsorption equilibrium time of 360 minutes suggests a rapid initial uptake followed by a slower phase, which is a common characteristic of chemisorption or intraparticle diffusion processes. The superior fit of the Langmuir isotherm model compared to the Freundlich model suggests that the adsorption of nickel onto the zeolite surfaces occurs as a monolayer, where all binding sites have uniform energy.

adsorption capacity than its micron counterpart. The study successfully optimized key operational parameters, including pH, contact time, and adsorbent dose, which are crucial for maximizing removal efficiency. Despite the superior performance of the nano-zeolite, the marginal increase in efficiency compared to the micro-zeolite may not justify the additional

processing costs and time in all applications. Therefore, natural micron zeolite, due to its cost-effectiveness and accessibility, is recommended as a practical and efficient adsorbent for treating heavy metal-polluted waters on a larger scale.

Author Contributions

In the preparation and writing of this article, all authors have contributed equally. All stages

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Ethical Considerations

All authors affirm that this research was conducted in accordance with ethical standards,

Funding

This research was conducted with the support of the [Institutional Name]. The authors

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

The findings align with global efforts to develop low-cost, environmentally friendly technologies for managing water resources and mitigating the risks of heavy metal contamination.

of the research, from study design and data collection to analysis of results and final writing of the article, are the result of collaboration and collective agreement of all authors.

Acknowledgements

We are very grateful to everyone who assisted us in conducting this research.

with no data fabrication, falsification, or plagiarism

would like to express their sincere gratitude and appreciation to these institutions for their valuable support.



کارایی کانی زئولیت طبیعی و نانوذرات زئولیت در پالایش آب آلوده به نیکل

مصطفی چرم^۱، ریحانه ممینی^۲، حمیدرضا بوستانی^۳، ایرج کاظمی نژاد^۴

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ABC، تهران، ایران. رایانامه: chorom1338@gmail.com

۲. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران، تهران، ایران. رایانامه: m.chorom@scu.ac.ir

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی داراب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: hr.boostani@shirazu.ac.ir

۴. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: i.kazeminezhad@scu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

هدف: پالایش فاضلاب با فرآیند جذب دارای مزایای دوگانه (یعنی تصفیه آب و مدیریت ضایعات) است، لذا شناسایی و توسعه جاذب قابل دسترس، مقرون به صرفه و بسیار مؤثر برای حذف کارآمد و آسان یون‌های فلزات سنگین ضروری است. مواد طبیعی مانند کانی‌های رسی و زئولیت‌ها و همچنین جاذب‌های زیستی به طور گسترده به عنوان جاذب‌های مؤثر و اقتصادی برای حذف غلظت کم یون‌های فلزی شناخته شده‌اند. کانی‌های زئولیت مواد متخلخلی هستند که با ساختمان کریستالی خود مانند غربال مولکولی عمل کرده و به دلیل داشتن کانال‌های باز در شبکه خود، اجازه عبور برخی از یون‌ها را در ساختار خود داده و برخی از یون‌های دیگر را جذب سطحی می‌کنند. لذا این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد زئولیت طبیعی (میکرون) و نانوذرات زئولیت در پالایش نیکل (II) از آب آلوده به نیکل انجام شد.

روش‌ها: در این پژوهش نانوذرات زئولیت به روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای کریستالی (۶۰۰ دور در دقیقه، ۳۰ ساعت) از پودر میکرو زئولیت به دست آمد و آنالیزهای XRD، PSA و SEM به منظور تعیین خصوصیات نانوذرات تولید شده، انجام گرفت.

نتایج: اثرات اندازه جاذب زئولیت، اسیدیته و شوری مختلف محلول بر میزان حذف نیکل در سطوح مختلف بررسی شد. pH، بهینه برای بالاترین میزان حذف نیکل ۶/۵ به دست آمد. نتایج نشان داد که ایزوترم لانگمویر با ضریب همبستگی ۰/۹۸۲، مدل مناسب‌تری برای نشان دادن جذب نیکل توسط نانوزئولیت از محلول‌های آبی بوده است. بیشترین ظرفیت جذب برای نیکل ۵۸ mg/g به دست آمد که این میزان جذب نشان‌دهنده پتانسیل بسیار عالی نانوزئولیت در حذف نیکل دو ظرفیتی از محلول‌های آبی می‌تواند باشد.

نتیجه‌گیری: استفاده از نانوجاذب‌های ارزان قیمت، بی‌خطر و زیست تخریب پذیر همراه با روش‌های فیزیکی می‌تواند در پالایش آلودگی عناصر سنگین در آب‌های ناسالم راه کار عملی باشد.

کلیدواژه‌ها:

میکرو و نانو زئولیت،

آلودگی آب،

نیکل،

جذب سطحی

استناد: استناد: چرم، م.، ممینی، ر.، بوستانی، ح. ر.، & کاظمی نژاد، ا. (۱۴۰۵). کارایی کانی زئولیت طبیعی و نانوذرات زئولیت در پالایش آب آلوده به نیکل. نشریه

تحقیقات محیط زیستی و توسعه پایدار، ۱(۱)، ۲۰-۱. <https://doi.org/10.22034/fersd.2026.1.1.1>



<https://doi.org/10.22034/fersd.2026.1.1.1>



© نویسنده‌گان.

ناشر: انتشارات دانشگاه لرستان.

۱. مقدمه

منابع آب شیرین تنها ۳٪ از کل منابع آب بر روی کره زمین را تشکیل می‌دهد که تقریباً ۱,۸٪ آن در جنوبگان است. با این وجود، در سراسر جهان، بسیاری آب شیرین را به راحتی هدر می‌دهند. بر اساس اعلام سازمان ملل متحد حدود ۱,۲ میلیارد نفر از مردم جهان (۱۸ درصد جمعیت جهانی) از کمبود یا فقدان دسترسی به آب شیرین، رنج می‌برند. آلودگی آب توسط فلزات سنگین به دلیل ماهیت سمی و زیست انباشته یون های فلزی یک موضوع زیست محیطی جهانی است. برای ارضای مقررات زیست محیطی سخت گیرانه تر، طیف گسترده ای از فناوری های تصفیه مانند اکسیداسیون یا کاهش شیمیایی، رسوب شیمیایی، تبادل یونی، فناوری غشاء، فیلتراسیون و تصفیه الکتروشیمیایی و غیره برای حذف یون های فلزی توسعه داده شده اند. نتایج بررسی مقالات سال های اخیر نشان می دهد که روش حذف یون های فلزات سنگین در پس آنها توسط جاذب های ارزان قیمت قابل دسترس بیشترین کاربرد را پیدا کرده است (Irannajad M. & Haghighi H. K. 2021). فلز سنگین به هر عنصر فلزی اطلاق می شود که دارای وزن اتمی بین ۶۳,۵ تا ۲۰۰,۶ و وزن مخصوص بیشتر از ۵,۰ باشد (Charkhi, A., 2010). فلزات سنگین اجزای طبیعی پوسته زمین هستند و می توانند از طریق زباله های صنعتی و مصرفی یا حتی از باران اسیدی که سبب انحلال خاک ها می شود وارد منابع آبی شوند (Lang Q., Lu P., Yang X., Valtchev, V, 2024). تخلیه فلزات سنگین توسط تعدادی از صنایع از جمله معدن، نساجی، آبکاری، تکمیل فلزات، باتری سازی، صنایع سرامیک و شیشه در آب و فاضلاب به عنوان یک مشکل جدی برای بشر به شمار می رود که توجه جهانی را به خود جلب کرده است. فلزات سنگین زیست تخریب پذیر نیستند و تمایل دارند در موجودات زنده انباشته شوند و در نتیجه باعث بیماری ها و اختلالات مختلف می شوند. نیکل (II) یکی از آلاینده های مهم در محیط زیست محسوب می شود که ممکن است از طریق صنایع مختلفی از قبیل صنایع آبکاری، رنگدانه ها، سرامیک و ساخت باتری وارد محیط های آبی گردد (Zheng

X., Alam Q., Zhou Y., Du D., Guanlin Li, Zhu W, 2024). با توجه به رشد روز افزون جمعیت و بحران کمبود آب، آلودگی آب و تصفیه آن و در نتیجه تأمین آب سالم از مشکلات اساسی جوامع انسانی محسوب می شود. از جمله آلاینده های آب می توان به فلز سمی نیکل اشاره کرد. تاکنون روش های مختلفی برای حذف عناصر و ترکیبات سمی از آب و پساب های آلوده ارائه شده است. اکثر این روش ها بسیار گران و برای فلزات با غلظت پایین بی اثر می باشند که از میان این روش ها، روش جذب سطحی روشی بسیار موثر، اقتصادی و ساده می باشد (Velarde, L. M, Nabavi, Edwin, E, Marta-Lena, A, Farid, A, 2023). در سال های اخیر، زئولیت های طبیعی بدلیل ظرفیت تبادل یونی انتخابی، بلورینگی بالا و هزینه پایین توجهات بسیاری را در زمینه حذف فلزات سنگین و سایر آلودگی های زیست محیطی را از آب به خود جلب کرده اند (Kumari S., Chowdhry J., Kumar M., Chandra Garg M, 2024 & Shaila, K. D., Panhekar, P.V, Patil and Shridhar, S, 2015). مطالعات بر روی جذب فلزات سنگین توسط زئولیت های طبیعی هنوز برای محققان جذاب است. زئولیت کانی شناخته شده ای است که برای از بین بردن آلودگی های محیطی استفاده می شود. اخیراً سنتز مواد زئولیتی و نانوزئولیت ها برای حذف فلزات سنگین از محلول های آبی گسترش یافته است (Aguilara J. Martínezb, V., Bustamanteb G., Francisco J., Tapiab A., Martínez-Mezab G., Vílchez-Vargasc R., ona K, 2020 & Payra, P. and Dutta, P.adk, 2003).

زئولیت ها آلومینوسیلیکات های کریستالی بسیار متخلخل با چارچوب های سه بعدی متصل به چهار وجهی (حاوی منافذی هستند که می توانند مولکول هایی تا اندازه ۱ نانومتر را جذب کنند و هندسه منافذ می تواند شامل قفس ها و یا کانال های هستند که بار اضافی آنها با کاتیون های Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} به تعادل رسیده اند. ساختارهای زئولیت معمولاً از نظر اندازه، هندسه و اتصال فضای منافذ توصیف می شوند. قابلیت تبادل کاتیونی آنها یکی از مفیدترین خواص آنهاست و تعیین کننده توانایی آنها

وینگنفلدر و همکاران پژوهش‌هایی را روی چهار عنصر آهن، روی، کادمیوم و سرب انجام دادند و اثر جاذب ژئولیت را بر میزان جذب آن‌ها بررسی کردند و مشاهده نمودند که حداکثر میزان جذب توسط ژئولیت برای عنصر سرب در پ-هاش برابر با ۶ و برای کادمیوم در پ-هاش برابر با ۸ صورت گرفته است (Wingenfelder, U., Gerhardfurrer, C., and Schulin, R, 2005). در مطالعه‌ای دیگر تامنه و شردخاه کارایی ژئولیت طبیعی در کادمیوم و مس از محلول‌های آبی به صورت آزمایش‌های پیمانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند، غلظت‌هایی بین ۶۰۰-۸۰ میلی گرم بر لیتر فلزات Cd و Cu تهیه شد و تأثیر جاذب ژئولیت روی جذب این عناصر سنگین مورد بررسی قرار گرفت (Taamneh, Y., & Sharadqah, S, 2017). بیشترین میزان جذب در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر برای کادمیوم (۹۴٪) و مس (۸۵٪) به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه میزان جذب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار جاذب و نیز افزایش زمان تماس میزان جذب افزایش یافته تا به یک مقدار ثابتی رسید. همچنین در مطالعه‌ای از نانوذرات ژئولیت جهت حذف فلز آرسنات از فاضلاب استفاده شده است. در این پژوهش اثرات پارامترهای مختلفی هم چون: پ-هاش، میزان دز جاذب و زمان تماس در حذف آرسنات از فاضلاب مورد آزمایش پیمانه‌ای قرار گرفت. نتایج نشان داد که راندمان حذف آرسنات از فاضلاب در شرایط مطلوب بیش از ۹۹ درصد می‌باشد (Malkoc, E. and Nuhoglu, Y, 2006). مقالات بسیار کمی برای جذب یون های $I(Ni)$ با استفاده از جاذب های نانومواد، کامپوزیت و نانوکامپوزیت منتشر شده است و این جاذب ها قابلیت جذب خوبی برای یون های $II(Ni)$ نشان داده اند و بنابراین تحقیقات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است. Hosseini S.S., Esmhosseini, M., Khezri S., Taloki F. 2017. G. , Khosravi c, A. 2017. لذا این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد ژئولیت طبیعی (میکرون) و نانوذرات ژئولیت در پالایش نیکل از خاک آلوده به نیکل انجام شد.

در حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی و پساب‌ها است. (Fu, F. and Wang, Q, 2011 & Roostan, Z., Rashidi, R., Borghei, M). بررسی مقالات در زمینه جذب عناصر سنگین توسط ژئولیت نشان می‌دهد که شرایط تجربی مختلفی مانند pH محلول، زمان تماس بین یون فلزی و جاذب، دما و دوز جاذب معمولاً در طول مطالعه جذب مورد به طور قابل توجهی بر فرآیند جذب تأثیر می‌گذارد. (Abdelwahab O., Thabet W, 2023) استفاده از کلینوپتیلولیت طبیعی به دست آمده از منطقه Biga-Canakkale ترکیه را برای حذف یون های فلزات سنگین از محلول آبی بررسی کردند. داده های ایزوترم جذب تعادلی، جنبشی و ترمودینامیکی جاذب های مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که مدل های ایزوترم جذب لانگمویر و فروندلیچ مطابقت خوبی با داده های تجربی نشان دادند ایزوترم جذب تعادلی، جنبشی و ترمودینامیکی جاذب های مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که مدل های ایزوترم جذب لانگمویر و فروندلیچ مطابقت خوبی با داده های تجربی نشان دادند (Argun M. E, 2008). داده‌های جنبشی برای جذب یون‌های $III(Ni)$ معمولاً از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم پیروی می‌کنند و فرآیند جذب در بیشتر موارد گرماگیر و خود به خود بود (Charkhi, A., Kazemian, H., Kazemeini, M, 2010). همچنین در تحقیقی جذب تکی و رقابتی فلزات سنگین روی، کادمیوم و سرب از محلول‌های حاوی دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر این سه فلز توسط ژئولیت معدن سمنان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر رقابت جذب کادمیوم را در مقایسه با دو فلز دیگر بیشتر کاهش داد و جذب روی و سرب یکسان بود. در غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام جذب سرب بیشتر از روی و کادمیوم شد. لذا به نظر می‌رسد که ترتیب جذب فلزات سنگین توسط ژئولیت تابعی از غلظت اولیه این فلزات باشد (Orjioko, M.N., Uchechukwu, O. Igwe, S.N, 2015).

۲. مواد و روش‌ها

زئولیت از نوع کلینوپتیلولیت از شرکت کانسار تهران تهیه و برخی خصوصیات آن اندازه گیری شد. برای جداسازی ناخالصی کانی زئولیت مقدار ۴۰۰ گرم زئولیت را در بشر ریخته و سپس ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آنها اضافه کرده و با همزن شیشه‌ای خوب مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد، محلول رویی شفاف بالای نمونه دور ریخته شد و مجدداً ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آنها اضافه و به مدت ۲۴ ساعت دیگر در دمای اتاق نگهداری شد. محلول رویی دور ریخته شد و مراحل قبل دو بار دیگر تکرار شد. نهایتاً نمونه از کاغذ صافی عبور داده شد و کانی در دمای ۷۰ درجه سلیسوس به مدت ۳ روز تا خشک

مراحل آزمون دستیابی به نانوزئولیت

در ابتدا ۳۰ گرم نمونه با سرعت چرخش ۳۵۰ دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ برابر و زمان ۱۰ ساعت آسیاب شد و برای بررسی اندازه و یکنواختی ذرات تصویر SEM نمونه پودر شده مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه اندازه ذرات با شرایط آسیاب ذکر شده، بار دیگر ۳۰ گرم نمونه پودری با شرایط سرعت چرخش ۳۵۰ دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ برابر و زمان ۲۰ ساعت آسیاب شد و برای بررسی اندازه ذرات تصویر SEM نمونه پودر شده مجدد مورد بررسی قرار گرفته شد همچنین جهت مشخص کردن توزیع اندازه ذرات آزمون PSA انجام شد. برای دستیابی به ذرات زئولیت نانو شده دلخواه این بار ۳۰ گرم نمونه پودری با شرایط سرعت چرخش ۳۵۰ (بیشترین سرعت دستگاه) دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ برابر و زمان ۴۰ ساعت آسیاب شد که با بررسی PSA، درصد ذرات نانو شده بررسی شدند. پس از دسترسی به نتایج بر آن شدیم که تهیه نانوذرات را با آسیابی با سرعت بالاتر نیز بررسی کنیم، لذا از دستگاه آسیاب سیاره‌ای (مدل: NARYA-MPM*250 H) واقع در دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران استفاده شد. ۳۰ گرم نمونه پودری با شرایط سرعت چرخش ۶۰۰ دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ برابر و زمان ۱۰ ساعت آسیاب شد نانوزئولیت تولیدی در این مرحله در اثر آسیاب کاری به خاکستر سیاهی تبدیل شده بود که با بررسی توزیع اندازه ذرات، درصد ذراتی که نانو مقیاس شده بود، مورد پذیرش قرار

شدن در آن نگهداری شدند. روش‌های مختلفی جهت سنتز نانوزئولیت‌ها گزارش شده است که همگی بر مبنای روش‌های شیمیایی و فیزیکی می‌باشند. استفاده از عملیات مکانیکی مانند آسیاب سیاره‌ای گلوله‌ای یک روش جایگزین مناسب جهت کاهش اندازه ذرات زئولیت می‌باشد که مقرون به صرفه است (Borandegi, M., Nezamzadeh, A, 2015).

با توجه به اینکه یکی از اهداف ما در این پژوهش ایجاد نانو ذرات زئولیت بدون تغییر ساختار و صرفاً کوچک شدن اندازه ذرات بوده، لذا استفاده از روش مکانیکی آسیاب سیاره‌ای، می‌تواند روشی مناسبی برای تولید نانو ذرات زئولیت باشد). (Kumari S., Chowdhry J., Kumar M., Chandra Garg M, 2024)

گرفت. برای بررسی مینرالوژی و اندازه ذرات نانوزئولیت‌های بدست آمده، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، برای تعیین توزیع اندازه ذرات از آنالیز PSA و جهت مشخص کردن ساختار کانی شناسایی از دستگاه Philips Analytical X-Ray B.V مدل (PW1840) استفاده شد.

– اثر زمان تماس بر مقدار جذب نیکل

جهت مطالعه اثر زمان تماس محلول نیکل با زئولیت در اندازه‌های میکرو و نانو بر راندمان جذب نیکل، مقدار ۰/۲ گرم از هر جاذب را به ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیکل با پ‌هاش بهینه ($\text{pH}=6/5$) افزوده و برای مدت زمان های ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۳۶۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه در دمای اتاق بر روی دستگاه تکان دهنده با دور ۱۵۰، نگهداری شد. پس از آن بلافاصله سانتریفوژ، صاف و مقدار نیکل آن توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin-320 اندازه‌گیری شد (Argun M. E, 2008)

– اثر غلظت نیکل

به منظور مطالعه اثر غلظت اولیه نیکل بر راندمان جذب نیکل توسط زئولیت در اندازه‌های میکرو و نانو، مقدار ۲۰ میلی‌لیتر محلول نیکل با غلظت‌های اولیه ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر به ۰/۲ گرم از هر جاذب افزوده شد و برای مدت زمان بهینه (۲۴ ساعت) در دمای اتاق تکان داده شدند. پس از آن بلافاصله سانتریفوژ، صاف و غلظت نیکل در عصاره استخراجی توسط دستگاه جذب اتمی اندازه

گیری شد (Argun M. E, 2008 & Fu, F. and Wang, Q, 2011)

(2011)

جهت بررسی ایزوترم جذب نیکل از دو مدل لانگمویر و فرندلیچ استفاده شد. شکل خطی معادلات به صورت زیر می باشد:

$$\text{Log } Q_e = \text{Log } K_f + 1/n \text{ Log } C_e$$

$$1/Q_e = 1/Q_m + 1/C_e (1/k_l Q_m)$$

که در این معادلات K_f و n ثابت‌های معادله فرندلیچ، k_l ثابت معادله لانگمویر در ارتباط با انرژی جذب (L.mg^{-1}) و Q_m حداکثر جذب سطحی نیکل به صورت تک لایه‌ای (mg.g^{-1}) می‌باشد (Argun M. E, 2008 & Zheng X., Alam Q., Zhou Y., Du D., Guanlin Li, Zhu W, 2024). (طرح آزمایش به صورت فاکتوریل با سه تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. محاسبات آماری و برازش مدل‌ها توسط نرم افزار SAS 9.2 (32) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. رسم گراف‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2010 انجام شد.

۳. نتایج و بحث

زئولیت مورد استفاده با نام تجاری (Z-A) و از نوع کلینوپتیلولیت و دارای خصوصیات عنصری اندازه گیری شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

- اثر مقدار جاذب

به منظور بررسی اثر مقدار جاذب زئولیت در دو اندازه میکرو و نانو بر میزان حذف نیکل از محلول آبی، سه سطح جاذب شامل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ گرم از هر جاذب در نظر گرفته شد و به آن‌ها مقدار ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیکل افزوده و برای مدت زمان بهینه (۲۴ ساعت) در دمای اتاق بهم زده شدند. پس از آن بلافاصله سانتریفوژ، صاف و غلظت نیکل در عصاره استخراجی توسط دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد (Fabrianto, J., Natasia Kosasih, A., Sunarso, J. and Ju, Y.H, 2009).

جهت محاسبه درصد حذف عنصر (بازده جذب) توسط جاذب از محلول نیکل (E_a) و ظرفیت جذب تعادلی (Q_e) از روابط زیر استفاده شد:

$$E_a = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \text{رابطه ۱)}$$

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times v}{m} \quad \text{رابطه ۲)}$$

که در این معادلات، E_a بازده جذب برحسب درصد، Q_e مقدار یون جذب سطحی شده توسط جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، C_0 غلظت اولیه نیکل در محلول (میلی‌گرم در لیتر)، C_e غلظت تعادلی یون نیکل در محلول (میلی‌گرم در لیتر)، m جرم جاذب (گرم)، و v حجم محلول (لیتر) است.

جدول ۱: آنالیز عنصری زئولیت طبیعی مورد استفاده

پارامتر	مقدار (درصد)
SiO ₂	68.95
Al ₂ O ₃	11.14
Fe ₂ O ₃	0.97
CaO	4.83
Na ₂ O	0.95
K ₂ O	0.9
MgO	0.79
TiO ₂	0.2
MnO	0.01
P ₂ O ₃	0.01
SO ₃	0.7
L.O.I	10.6

AL در ساختار زئولیت‌ها بسیار متغیر و نسبت Si/Al ممکن است برابر با ۱ تا بی‌نهایت باشد (Noroozifar, M., Khorasani-Motlagh, M., Naderpour, H, 2014).

زئولیت دارای ۶۸/۹۵ درصد SiO₂ و ۱۱/۱۴ درصد Al₂O₃، ساختار زئولیت مورد استفاده را شامل می‌شود. که این نشان دهنده‌ی آلومینوسیلیکاته بودن زئولیت است. مقدار

برخی از خصوصیات شیمیایی نمونه زئولیت مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: برخی خصوصیات شیمیایی نمونه زئولیت مورد استفاده

واحد	مقدار	پارامتر
meq/l	27.9	Na
meq/l	12.9	K
meq/l	1.8	Mg
meq/l	10.2	Ca
Cmol _c /kg	91.6	CEC
-	9.06	pH
dS/m	3.12	EC(1:10)

ظرفیت تبادل کاتیونی زئولیت مورد استفاده ۹۱/۶ سانتی-مول بر کیلوگرم بود که بیانگر ظرفیت تبادل کاتیونی بالای زئولیت می باشد. ناخالصی های موجود در زئولیت ها موجب کاهش CEC آن ها می شود. مشخصات زئولیت در جدول ۳ نشان می دهد که زئولیت مورد استفاده حاوی ۶۶ درصد کلینوپتیولیت است و بقیه کانی های موجود ناخالصی زئولیت را نشان می دهند.

pH زئولیت مورد نظر در نسبت یک به ده (زئولیت به آب مقطر) ۰.۶۹ است. در واقع زئولیت ها اسیدی نیستند و قلیایی هستند. شوری زئولیت در نسبت یک به ده برابر ۳,۱۲ دسی-زیمنس بر متر بود که دلیل این شوری وجود یون های مختلف موجود در ساختار زئولیت مانند سدیم و کلسیم است و یا به منشأ تشکیل آن مربوط می شود.

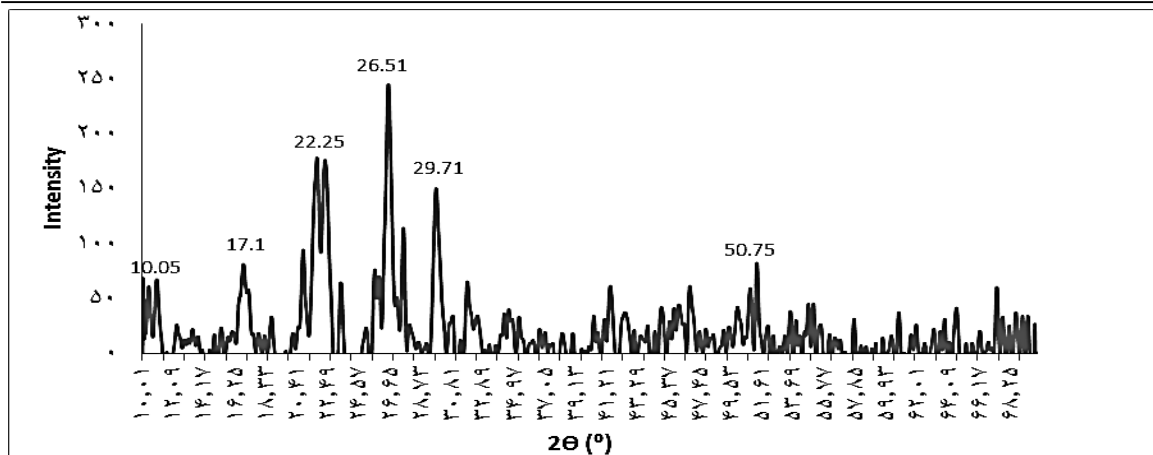
جدول ۳: مشخصات زئولیت مورد استفاده

کانی	کلینوپتیولایت	مونت موریلونایت	آنورتایت	اورتوکلاز	موردنایت	کوارتز	دولومیت
درصد	۶۶	۵	۶	۸	۸	۱	۴

– پراش پرتو ایکس نمونه پودری زئولیت

نشان داد که پیک های زئولیت به دست آمده پس از آسیاب به ترتیب ۲۶/۵۱، ۲۲/۲۵، ۲۹/۷۱، ۱۷/۱، ۵۰/۷۷ و ۱۰/۰۵ (بر حسب درجه) بوده که تقریباً برابر پیک های ساختار زئولیت طبیعی بود و در مقایسه با آنالیز XRD زئولیت اصلی قله ای مربوط به فاز ناخالصی مشاهده نشد. پس می توان نتیجه گرفت که آسیاب گلوله ای سیاره ای تغییری در ساختار کانی زئولیت ایجاد نکرده است.

با توجه به اینکه یکی از اهداف ما در تولید نانوذرات این بود که ساختار کانی به دلیل استفاده از آسیاب سیاره ای و به روش خشک تغییر نکند لذا به بررسی تصویر XRD به دست آمده از نمونه پودری با شرایط آسیاب کاری با زمان ۲۰ ساعت، نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ و سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه پرداخته شد. الگوی XRD نمونه پودری زئولیت در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج پیک های XRD گرفته شده از نمونه سنتز شده با آسیاب گلوله ای در مقایسه با زئولیت طبیعی

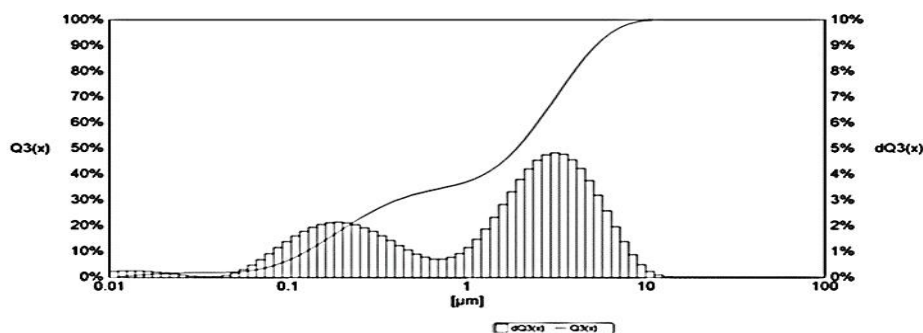


شکل ۱: پراش ایکس نمونه پودری زئولیت (زمان ۲۰ ساعت، سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ برابر)

و صرف وقت و هزینه کمتر، این روش آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مورد قبول واقع شد (شکل ۲). در پژوهشی که توسط (نوروزی‌فر و همکاران، ۲۰۱۴)، با هدف ساخت و بررسی نانوذرات زئولیت بر روی جذب آرسنیک از فاضلاب انجام شد، برای تولید نانوذرات زئولیت از روش آسیاب سیاره‌ای خشک و مرطوب استفاده کردند به این ترتیب که در مرحله آسیاب خشک ۵۰ گرم از زئولیت طبیعی در مدت زمان ۱۰ دقیقه و در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه آسیاب شد سپس برای مرحله آسیاب مرطوب پودر به دست آمده از آسیاب خشک با ۵۰ میلی لیتر آب ترکیب شده و برای مدت ۳ ساعت و در سرعت چرخش ۴۵۰ (rpm) آسیاب شد. تصویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل یکنواختی از زئولیت با اندازه ذرات کوچکتر از ۸۰ نانومتر به دست آمد (Payra, P. and Dutta, P.adk.2003).

-تعیین توزیع اندازه ذرات

پودر کلینوپتیلولیت را با خرد کردن در هاون چینی و الک کردن (عبور از الک ۲۰۰ مش) به ذرات میکرو (MCP) تبدیل شد. مقدار ۱۰۰ گرم از نمونه تهیه شده به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران، جهت استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای و انجام آزمایشات کانی شناسی انتقال داده شد. پودر نانوذرات کلینوپتیلولیت (NCP) به روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای (۶۰۰ دور در دقیقه، ۳۰ ساعت) از پودر MCP به دست آمد. نتایج توزیع اندازه ذرات (PSA) با مشخص کردن درصد اندازه ذرات نشان داد که با استفاده از دستگاه آسیاب سیاره‌ای با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه در مدت زمان ۳۰ ساعت و نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ برابر، ۴۰ درصد ذرات دارای قطری کمتر از ۱۰۰ نانومتر بودند. در نتیجه به دلیل دستیابی به اندازه ذرات زئولیت مورد نظر

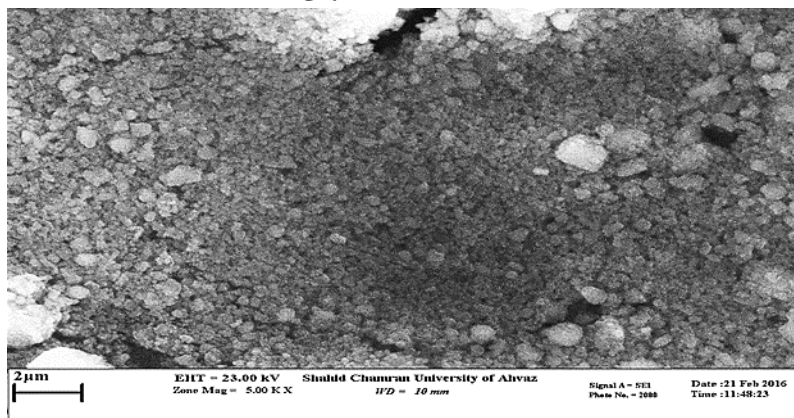


شکل ۲: نمودار توزیع اندازه ذرات در زمان ۳۰ ساعت، و سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ برابر

– بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی

بعد از مشخص شدن توزیع اندازه ذرات توسط PSA، به منظور بررسی اندازه و ریخت شناسی ذرات و همچنین تعیین متوسط اندازه ذرات تولید شده از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی

روشی (SEM) استفاده شده است (شکل ۳). نتایج نشان داد که در زمان ۳۰ ساعت آسیاب ذرات تقریباً شکل کروی دارند هر چه مدت زمان آسیاب بیشتر باشد اندازه ذرات ریزتر و همگن بودن ذرات بیشتر می شود که با نتایج بدست آمده از آنالیز PSA همخوانی دارد.



شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی: سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه، نسبت وزنی گلوله به پودر ۳۰ برابر با زمان آسیاب کاری ۳۰ ساعت

– تأثیر پ هاش بر جذب نیکل توسط زئولیت در محلول های آبی

پ هاش محلول یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر میزان جذب یون های فلزات سنگین توسط جذب کننده می باشد. لذا در پ هاش های مختلف میزان جذب نیکل توسط میکرو و نانو زئولیت اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که بهترین پ هاش برای جذب نیکل دو ظرفیتی از محلول های آبی در غلظت های مختلف آن توسط هر دو نوع اندازه زئولیت ۶.۵ بود. سینگ و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند جذب نیکل توسط زئولیت را به عنوان تابعی از غلظت اولیه فلز و pH بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که جذب نیکل (II) به غلظت اولیه جذب شونده و pH وابسته می باشد. آنها گزارش کردند که با افزایش pH از ۳ به ۵، مقدار کارایی جذب نیکل توسط زئولیت از حدود ۲۰ به حدود ۴۵ میلی گرم بر گرم افزایش یافت. نتایج مطالعات آن ها نشان داد که زئولیت، برای حذف فلزات سنگین بسیار مؤثرتر از کربن فعال می باشد (Singh, S., Verma, L. K., Sambi, S.S. and Sharma, S.K, 2008). همچنین در مطالعه حسینی و همکاران (۲۰۱۷) به حذف یون دو ظرفیتی نیکل از محلول های آبی با استفاده از زئولیت طبیعی و بررسی ایزوترم های جذب آن پرداختند. آنان پ هاش را عاملی مهم و تأثیرگذار در افزایش جذب نیکل

توسط کلینوپتیلولیت طبیعی معرفی کردند. با ثابت قرار دادن سایر شرایط (غلظت اولیه نیکل ۵۰ میلی گرم بر لیتر، مقدار جاذب ۰.۱ گرم و زمان تماس ۹۰ دقیقه) در pH های مختلف در رنج ۲ تا ۸، درصد جذب نیکل توسط زئولیت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که درصد حذف نیکل با افزایش pH از ۴ تا حدود ۷ بسیار افزایش یافت، که بیشترین میزان حذف یون نیکل بعد از رسیدن به pH ۶.۵ تا ۷.۵ بوده و پس از آن میزان جذب به آرامی کاهش یافت (Hosseini S.S., Esmhosseini, M., Khezri S., Taloki F. G., Khosravi c.A, 2017).

– اثر غلظت اولیه نیکل بر حذف نیکل از محلول های آبی توسط زئولیت

بدلیل اینکه بررسی مقایسه اثر اندازه ذرات جاذب زئولیت در محلول های آبی حاوی نیکل هدف اصلی تحقیق است لذا حجم های مساوی از آب مقطر (۲۰ میلی لیتر) با غلظت های متفاوتی از نیکل تهیه شده و به هر تیمار آبی ۰/۲ گرم از زئولیت در دو اندازه میکرو و نانو اضافه و مقدار نیکل جذب شده پس از ۲۴ ساعت شیکر شدن اندازه گیری شد. جدول تجزیه واریانس (۴) اثرات اصلی و متقابل غلظت نیکل محلول های آبی و نوع زئولیت بر جذب نیکل را نشان می دهد.

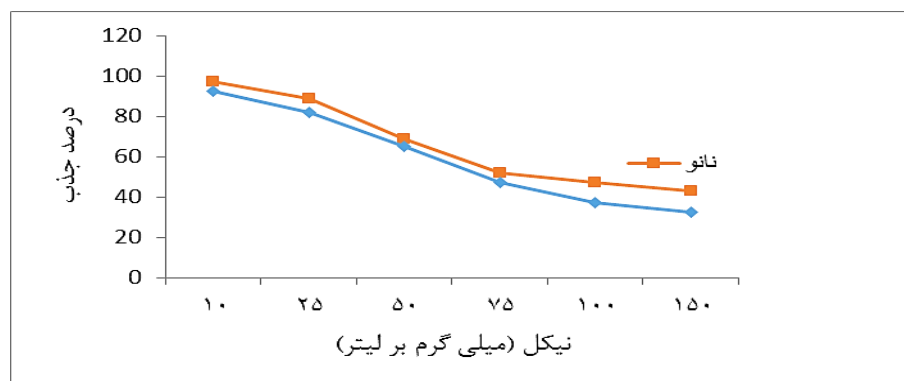
جدول ۴: تجزیه واریانس اثر غلظت نیکل و ژئولیت بر جذب نیکل از محلول‌های آبی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
جذب نیکل		
غلظت نیکل	۵	۵۴۱۴.۵۵**
ژئولیت	۱	۴۱.۹۳**
غلظت نیکل*ژئولیت	۵	۶۹.۵۲**
خطای آزمایش	۲۴	۰.۰۴
ضریب تغییرات		۰.۷۳

*: معنی‌دار در سطح پنج درصد، **: معنی‌دار در سطح یک درصد، NS: غیر معنی‌دار

این افزایش جذب در غلظت‌های بالاتر نیکل این باشد که در نانو ژئولیت سطوح بیشتری برای جذب بیشتر یون نیکل در این غلظت وجود داشته باشد. همان طور که مشاهده می‌شود تقریباً درصد جذب در تمام غلظت‌های نیکل برای جاذب میکرو و نانوزئولیت بسیار نزدیک به هم بوده است که احتمالاً به این دلیل است که فقط ۲۰ درصد ذرات نانو شده و بقیه در حد میکرو بودند لذا ممکن است در ذرات میکرو شده هم مقداری ژئولیت به صورت نانو یافت شود، این نزدیکی اندازه ذرات ممکن است سبب نزدیکی درصد جذب، جاذب‌ها شده باشد (Taffarel, S. R., & Rubio, J. 2010) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت جذب‌شونده، درصد جذب به طور قابل توجهی کاهش یافته است که دلیل این امر می‌تواند به خاطر پر شدن سطوح جذب‌کننده ژئولیت باشد. قابل ذکر است که در این پژوهش غلظت اولیه ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیکل به عنوان غلظت اولیه، برای معادلات ایزوترم‌های جذب انتخاب شده است.

نتایج جدول تجزیه واریانس (۴) نشان داد اثر متقابل ژئولیت و غلظت‌های نیکل در حذف نیکل در سطح آماری ۰/۰۱ معنی‌دار بود. شکل (۴) درصد حذف نیکل توسط ژئولیت در مقابل غلظت-های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر نیکل را نشان می‌دهد. بیشترین درصد جذب نیکل در غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر نیکل برای میکرو و نانوزئولیت به ترتیب ۹۲.۶ و ۹۱.۵ درصد بود، در غلظت ۲۵ میلی گرم بر لیتر نیکل، درصد جذب با شیب کمی کاهش یافت و به ترتیب بالا ۸۶.۵ و ۹۲.۱ درصد بدست آمد. از غلظت ۲۵ به بعد با شیب تندی درصد جذب کاهش یافت بطوریکه در غلظت ۵۰ به ۵۵٪ درصد جذب برای هر دو جاذب رسید. از غلظت ۵۰ تا ۱۵۰ درصد جذب باز هم کاهش یافت اما این کاهش با شیب کمتری بود تا در غلظت ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر برای کاربرد میکروژئولیت، درصد جذب به ۳۲.۴ درصد و برای کاربرد نانوزئولیت با کمی افزایش درصد جذب نسبت به غلظت ۱۰۰ پی‌پی‌ام به ۳۹.۳ درصد رسید. که ممکن دلیل



شکل ۴: اثر متقابل ژئولیت و غلظت‌های اولیه نیکل بر بازده جذب نیکل (pH برابر ۶.۵، حجم محلول ۲۰ میلی لیتر، مقدار جاذب ۰.۲ گرم و زمان تماس ۲۴ ساعت)

از آنجایی که غلظت جذب شونده در حال افزایش است لذا درصد جذب مرتب کاهش پیدا می کند. به طور مشابه در مطالعه (حسینی و همکاران، ۲۰۱۷) به بررسی ایزوترم های جذب نیکل از محلول های آبی توسط ژئولیت طبیعی پرداختند. نتایج به صورت ناپیوسته و با تغییر پارامترهایی مانند پهاش، دوز جاذب، زمان تماس، دما و غلظت اولیه یون نیکل صورت گرفت. درصد حذف نیکل توسط ژئولیت طبیعی در غلظت های ۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر برای غلظت های ۵ و سپس ۲۵ برابر بیشترین میزان جذب (۸۵ درصد) بوده که با افزایش غلظت نیکل تا ۲۰۰ این روند کاهش حذف نیکل به صورت نزولی اما با شیب کند ادامه یافت تا در غلظت ۲۰۰ به ۶۷ درصد رسید. به طور مشابه در مطالعه ای (Shaila, K. D., Panhekar, P.V, Patil and Shridhar, S, 2015) برای به دست آوردن غلظت بهینه، مطالعات آزمایشگاهی جهت حذف کادمیوم و مس با استفاده از ژئولیت طبیعی انجام شد. غلظت ها در محلول های آبی به طور جداگانه برای یون های کادمیوم و مس در گستره ۱۰۰ تا ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر تهیه شد و درصد حذف یون ها توسط جاذب ژئولیت با ثابت بودن سایر شرایط (جرم جاذب ۵ گرم، حجم محلول ۲۵۰ میلی لیتر، پهاش ۶ و زمان ۲۴ ساعت) اندازه گیری شد. نتایج نشان

داد که در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر بیشترین درصد جذب برای کادمیوم و مس به ترتیب ۹۳٪ و ۸۲٪ بدست آمد که با افزایش غلظت، این نمودار به صورت نزولی کاهش یافت تا اینکه در غلظت ۶۰۰ میلی گرم بر لیتر به ۴۵ درصد برای کادمیوم و ۲۷ درصد برای مس رسید. نویسنده دلیل این امر را به پر شدن رسیدن مکان های جذب سطحی به حداکثر میزان جذب خود نسبت داده است (Shaila, K. D., Panhekar, P.V, Patil and Shridhar, S, 2015).

اثر تیمار زمان تماس بر جذب نیکل از محلول های آبی توسط ژئولیت

با توجه به جدول تجزیه واریانس (۵) می توان نتیجه گرفت که اثر اصلی تیمار ژئولیت بر جذب نیکل از محلول های آبی و نیز اثر اصلی زمان هم زدن (۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۳۶۰، ۷۲۰ و ۱۴۴۰ دقیقه) بر جذب نیکل در سطح آماری 0.01 معنی دار شد. همچنین اثر متقابل تیمارهای ژئولیت و زمان تماس نیز در سطح 0.۰۱ معنی دار شده است، به این معنا که افزایش زمان تماس و نیز وجود ژئولیت به صورت معنی داری سبب افزایش حذف نیکل از محلول های آبی شده است.

جدول ۵: تجزیه واریانس تیمارهای ژئولیت و زمان تماس بر جذب نیکل از محلول های آبی

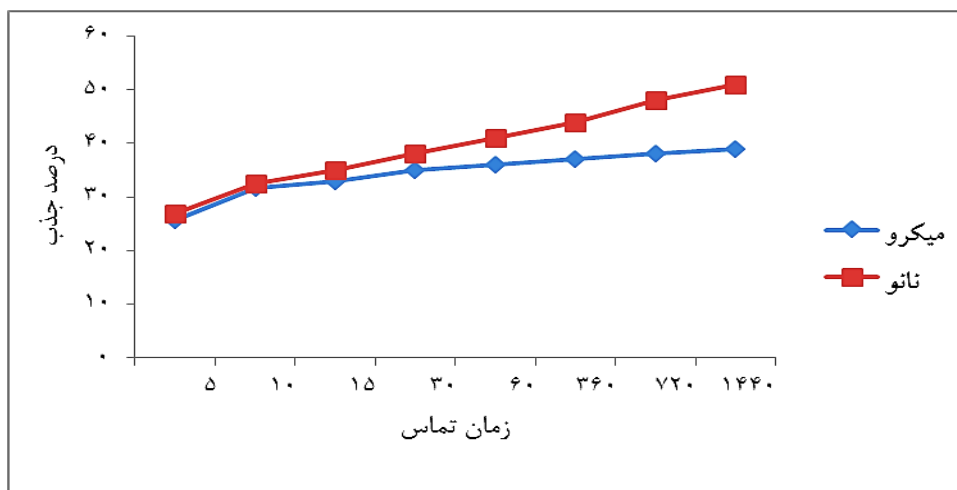
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
زمان تماس	۷	۷۵ ^{**} .۹۱
ژئولیت	۱	۳۶ ^{**} .۴۷
زمان تماس × ژئولیت	۷	۱۴ ^{**} .۳۲
خطای آزمایش	۳۲	۰.۷۰
ضریب تغییرات		۵۸.۰

** معنی دار در سطح پنج درصد، *** معنی دار در سطح یک درصد، NS: غیر معنی دار

یکی دیگر از فاکتورهای بسیار تأثیرگذار در حذف نیکل از محلول های آبی عامل مدت زمان شیکر شدن محلول حاوی نیکل با جاذب ژئولیت می باشد. شیکر شدن در دمای ۲۴ درجه و سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه انجام شد. با توجه به شکل (۵) با کاربرد جاذب میکرو و نانوزئولیت جهت حذف نیکل از محلول های آبی با افزایش زمان تماس درصد جذب افزایش یافت. زمان تعادل (تقریباً بیشترین درصد جذب) برای دو جاذب میکرو و نانوزئولیت در زمان

تماس ۳۶۰ دقیقه و به ترتیب دارای درصدهای جذب 36.5 و 47.3 بود. برای کاربرد میکروژئولیت در زمان ۷۲۰ دقیقه و برای نانوزئولیت در ۱۴۴۰ دقیقه کاهش جذب مشاهده شد. ولی در این پژوهش زمان تماس ۲۴ ساعت را میانگین در نظر گرفته شد زیرا که هدف اصلی این بود که نشان دهیم زمان تماس چه اثری بر درصد جذب نیکل دارد. به طور مشابه در مطالعه (حسینی و همکاران، ۲۰۱۷) با بررسی اثر زمان تماس بر روی جذب

نیکل (II) ظرفیتی در زمان‌های ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ دقیقه نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس جذب یون نیکل افزایش یافت و از زمان تماس ۶۰ دقیقه به بعد، تقریباً به حالت تعادل رسید و زمان تعادل معادله برای دستیابی به حداکثر جذب (درصد جذب ۸۵ درصد) ۶۰ دقیقه بدست آمد (Hosseini S.S., Esmhosseini, M., Khezri S., Taloki F. G., Khosravi c.A., 2017)



شکل ۵: اثر متقابل ژئولیت و زمان تماس بر بازده جذب نیکل (pH برابر ۶٫۵، غلظت اولیه نیکل ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، حجم محلول ۲۰ میلی لیتر و مقدار جاذب ۲٫۰ گرم)

زمان ۲۴ ساعت) درصد حذف هر دو یون با افزایش زمان تماس از صفر تا ۷۰ دقیقه افزایش یافت که این افزایش حذف برای یون کادمیوم بیشتر از مس بود که در نتیجه جذب تعادلی برای هر دو یون در زمان تماس ۲۰ دقیقه بدست آمد.

اثر مقدار جاذب (ژئولیت) بر جذب نیکل از محلول‌های آبی

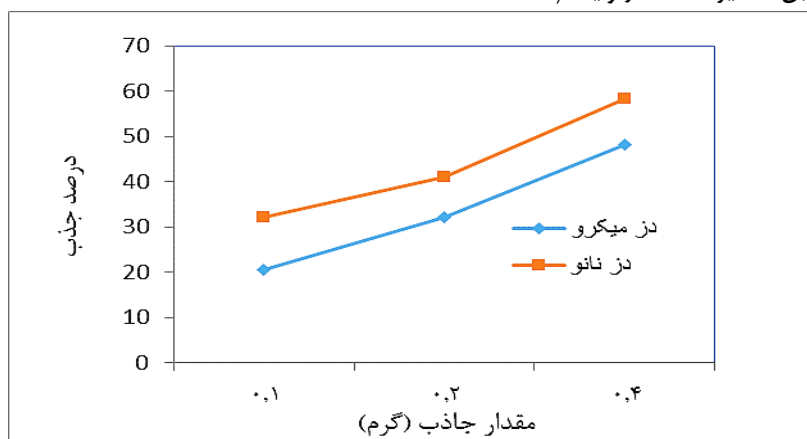
همانگونه که در جدول تجزیه واریانس (۶) مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که اثر تیمار جاذب‌های ژئولیت و نیز مقدار جاذب (۰٫۱، ۰٫۲ و ۰٫۴) با میزان جذب نیکل (II) ظرفیتی از محلول‌های آبی در سطح آماری ۰٫۰۱ معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل تیمارهای ژئولیت و مقدار جاذب نیز در سطح ۰٫۰۱ معنی‌دار شده است.

در مطالعه نظام‌زاده و کبیری (۲۰۱۳) به بررسی حذف نیکل (II) از محلول‌های آبی به وسیله نانوذرات کلینوپتیلولیت اصلاح شده با دی‌متیل‌گلی‌اکسید پرداخته شد. بررسی زمان تماس بر روی درصد حذف نیکل از محلول‌های آبی در زمان‌های ۲۰ تا ۱۴۰۰ دقیقه در دمای اتاق صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که حذف نیکل با نانوذرات کلینوپتیلولیت اصلاح شده با دی‌متیل‌گلی‌اکسید با افزایش زمان تماس افزایش یافت. زمان تعادل از حدود بعد از زمان تماس ۳۶۰ دقیقه بدست آمد. به طور (مشابه نوری فر و همکاران، ۲۰۱۴) و بوردنقی و نظام زاده (۲۰۱۵) به این نتیجه دست یافتند. نتایج حذف سایر فلزات سنگین با نتایج فوق همخوانی داشته است. در پژوهش تامنه و شردخاه (۲۰۱۷) با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها (غلظت اولیه ۷ میلی گرم بر لیتر، جرم جاذب ۵ گرم، حجم محلول ۲۵ میلی لیتر، پهاش ۶ و

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات جذب نیکل
مقدار جاذب	۲	۰.۹**550.
ژئولیت	۱	۸۴**88.
مقدار جاذب × ژئولیت	۲	۸۴**46.
خطای آزمایش	۱۲	۰.۰۴۰۰
ضریب تغییرات		0.14

※: معنی دار در سطح پنج درصد، ※※: معنی دار در سطح یک درصد، NS: غیر معنی دار

اثر متقابل مقدار جاذب ژئولیت بر بازده جذب نیکل در
شکل (۶) نشان داده شده است. شکل زیر درصد حذف نیکل
از محلول های آبی در مقابل مقادیر مختلف ژئولیت (۰.۱، ۰.۲، ۰.۴)



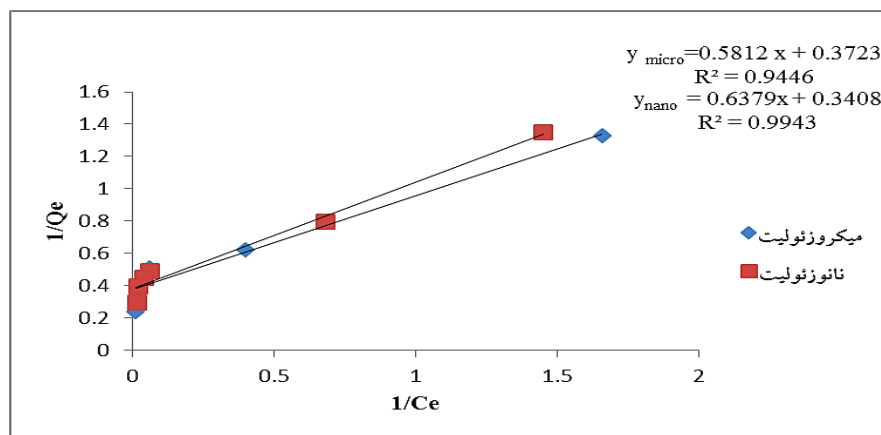
شکل ۶: اثر متقابل مقدار جاذب ژئولیت بر بازده جذب نیکل (pH برابر ۶/۵، غلظت اولیه نیکل ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، حجم محلول ۲۰ میلی لیتر و زمان تماس ۲۴ ساعت)

شد. نتایج حذف سایر فلزات سنگین با نتایج فوق همخوانی داشته است. در پژوهش تامنه و شردخاه (۲۰۱۷) با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها درصد حذف یون های مس و کادمیوم با افزایش مقدار جاذب از صفر تا ۸۰ میلی گرم افزایش یافت این افزایش تا ۳۰ میلی گرم جاذب (معادل ۷ میلی گرم بر لیتر) برای کادمیوم بیشتر از مس بود ولی از این مقدار به بعد برای هر دو یون کادمیوم و مس ثابت و درصد حذف در بیشترین مقدار خود و برابر ۹۹ درصد بود. دلیل این افزایش جذب به دلیل افزایش فضای جذب و در نتیجه افزایش سطوح تماس ژئولیت با یون های کادمیوم و مس بوده است.

–برازش نتایج حاصل از جذب سطحی نیکل توسط کانی ژئولیت در محلول های آبی با استفاده از معادله لانگمویر

یکی دیگر از مهم ترین پارامترهایی که اثر زیادی روی ظرفیت جذب دارد مقدار جاذب در تماس با محلول می باشد. شکل (۶) به بررسی تغییرات درصد جذب نیکل، در مقابل افزایش میزان جاذب ژئولیت پرداخته است. نتایج نشان داده که با افزایش میزان جاذب از ۰/۱ به ۰/۴ گرم در هر دو نوع جاذب میکرو و نانوزئولیت میزان جذب افزایش یافته است. در میکروژئولیت از ۲۰/۴۵ به ۴۸/۲ درصد و در نانوزئولیت از ۳۲/۱ به ۵۸/۳۵ درصد افزایش یافت. به این دلیل که با افزایش مقدار جاذب، تعداد مکان های جذبی و در نتیجه نفوذ یون های فلزی به ساختمان کانی افزایش می یابد (Payra, P. and Dutta, P.adk, 2003). این امر با نتایج بسیاری از محققین همخوانی داشته است. لازم به ذکر است که مقدار جاذب ۰/۲ گرم نه به عنوان بیشینه جاذب بلکه به عنوان نماینده ای برای بیان درصد جذب معادلات ایزوترم های جذب انتخاب

نمودار خطی معادله لانگمویر در شکل (۷) نشان داده شده است. این معادله به صورت خطی جذب سطحی نیکل توسط میکروژئولیت و نانوزئولیت را مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۷: برازش فرم خطی معادله لانگمویر بر جذب نیکل (II) توسط جاذب میکرو و نانوزئولیت

با توجه به شکل (۷) ضرایب معادله لانگمویر برای جذب نیکل میلی گرم بر لیتر، حجم محلول ۲۰ میلی لیتر، مقدار جاذب ۰.۲ توسط کاربرد میکروژئولیت و نانوزئولیت (غلظت اولیه نیکل ۱۰۰ گرم و زمان تماس ۲۴ ساعت) بدست آمد (جدول ۷).

جدول ۷: ضرایب معادله لانگمویر برای جذب نیکل توسط میکرو و نانوزئولیت

تیمار	Q_m	K_L	R^2
میکروژئولیت	۲.۶۹	۰.۶۴	0.94
نانوزئولیت	۲.۹۴	0.75	۰.99

Francia, Virgin, R. Dharani, S. Sanjay, Gayathri R. 2024

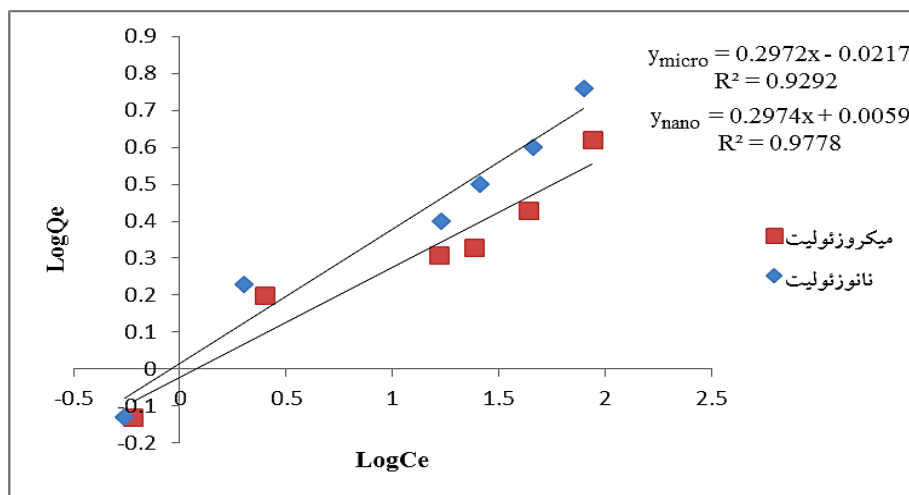
(. همانگونه که از ضرایب معادله لانگمویر مشاهده می شود مقدار این پارامتر برای تیمار کاربرد نانوزئولیت برابر 2.94 mg.g^{-1} و بیشتر از میکروژئولیت می باشد. لازم به ذکر است که این حداکثر میزان جذب در یک کیلوگرم خاک برای نانو و میکروژئولیت به ترتیب ۲۹۴۰ و ۲۶۹۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک می باشد که تفاوت حداکثر میزان جذب بین جاذب میکرو و نانو در یک کیلوگرم خاک قابل ملاحظه (۲۵۰ میلی گرم) می باشد. به طور مشابه در مطالعه حسینی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی ایزوترم-های جذب نیکل از محلول های آبی توسط ژئولیت طبیعی پرداختند. نتایج به صورته ناپیوسته و با تغییر پارامترهایی مانند پهاش، مقدار جاذب، زمان تماس، دما و غلظت اولیه یون نیکل صورت گرفت. ایزوترم جذب لانگمویر و فرنرلیچ با داده های حاصل برازش داده شد. نتایج حاصل از برازش داده ها نشان داد

این معادله به صورت خطی جذب سطحی نیکل توسط میکروژئولیت و نانوزئولیت را مورد بررسی قرار داده است. علیرغم اینکه ضریب تبیین (R^2) در هر دو جاذب میکرو و نانو بالا بوده است ولی در میکروژئولیت با ضریب همبستگی ۰.۹۶ بیشتر از جاذب ژئولیت در اندازه نانو بوده است. پارامتر K_L قدرت پیوند جذب شونده (کاتیون نیکل) با جذب کننده (میکرو و نانوزئولیت) را نشان می دهد که با توجه به ضرایب حاصل از معادله در جاذب میکروژئولیت 0.64 و بیشتر از نانوزئولیت که 0.55 است، می باشد. می توان نتیجه گرفت که قدرت اتصال جاذب میکروژئولیت در جذب نیکل دو ظرفیتی از محلول آبی بیش از نانوزئولیت بوده است. پارامتر Q_m بدست آمده از معادله، ضریبی برای بیان حداکثر میزان جذب نیکل به وسیله جاذب ژئولیت بوده که توسط مدل لانگمویر بدست آمده است (Hosseini S.S., Esmhosseini, M., Khezri S., Taloki F. G., Khosravi c,A, 2017 & Senthil, B. Rathil, P. Senthil Kumar, J. Natanya Ida Susana, J.

همدمای فرندلیچ برای بیان حالت تعادل به کار برده شود. شکل (۸) نمودار خطی که اعداد LogCe را در برابر LogQe رسم شده است، نشان دهنده ایزوترم جذبی فرندلیچ می باشد. با توجه به ضرایب به دست آمده از معادله فرندلیچ از جدول (۸) میزان ضریب همبستگی (R^2) زمانی که از جاذب میکروزئولیت برای حذف نیکل از محلول آبی استفاده شد ۰.۹۲ و برای جاذب نانوزئولیت ۰.۹۷ بوده است. $1/n$ معادله فرندلیچ در تیمار میکرو و نانو زئولیت به ترتیب ۰.۳ و ۰.۴ شد که این امر را می توان نشان دهنده تفاوت قدرت جذب کنندگی برابر این دو جاذب دانست.

که ایزوترم لانگمویر با ضریب همبستگی ۰.۹۸۲، مدل مناسب -تری برای نشان دادن خصوصیات جذبی نیکل توسط زئولیت از محلول های آبی بوده است. و بیشترین ظرفیت جذب نیکل برای زئولیت ۱۸.۰۹ mg/g به دست آمد که این میزان جذب می تواند نشان دهنده پتانسیل بسیار عالی زئولیت در حذف نیکل دو ظرفیتی از محلول های آبی باشد (Rahmani, A., Mousavi, H. and Fazli, M, 2010).

معادله فرندلیچ زمانی که بدلیل وجود محل های جذب با انرژی گوناگون، سطح جذب ناهمگون باشد در این صورت بهتر است



شکل ۸: برازش فرم خطی معادله فرندلیچ بر جاذب نیکل (II) توسط جاذب میکرو و نانوزئولیت

اختلاف اندک در اندازه جاذب ها (میکرو و نانو) باشد. در کل می -توان نتیجه گرفت که مدل ایزوترم جذب لانگمویر برازش مناسب تری برای جذب نیکل دو ظرفیتی از محلول آبی را نسبت به مدل فرندلیچ نشان داد.

مقدار n باید دارای مقادیری باشد که در محدوده ۱ تا ۱۰ قرار گیرد تا جذب مطلوب شناخته شود. در این حالت هرچه مقدار n به یک نزدیکتر باشد قدرت جذب کنندگی جاذب بیشتر است. با توجه به جدول (۸) مقدار ظرفیت جذب نیکل (K_f) برای میکروزئولیت (۱۰.۵) و نانوزئولیت (۱۳.۱) بود که شاید دلیل آن

جدول ۸: ضرایب معادله فرندلیچ برای جذب نیکل توسط میکرو و نانوزئولیت

تیمار	K_f	n	R^2
میکروزئولیت	۱۰.۵	۳.۳۶	۰.۹۲
نانوزئولیت	۱۳.۱	۴.۳۶	۰.۹۷

آنالیزهای XRD، PSA و SEM بر روی نمونه‌های آسیاب شده، بهترین نتیجه در شرایط سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه، نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ برابر و مدت زمان ۱۰ ساعت را داد. در غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم بر لیتر نیکل درصد جذب نیکل توسط جاذب‌های میکرو و نانوزئولیت به ترتیب 92.6 و 91.5 درصد بوده که با افزایش غلظت تا ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیکل درصد جذب نیکل توسط جاذب‌ها به طور چشمگیری تا حدود ۴۰ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان تماس تا ۳۶۰ دقیقه (زمان تعادل) و مقدار جاذب (0.۴ گرم) درصد جذب افزایش یافته است. بطور کلی نتایج این مطالعه نشان داد ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فرنللیچ را می‌توان برای توصیف جذب نیکل از محلول‌های آبی توسط میکرو و نانوزئولیت استفاده کرد. ولی معادله لانگمویر با ضریب تبیین (R^2) بالاتر برای هر دو جاذب میکرو (0.۹۶) و نانوزئولیت (0.۸۶) برازش بهتری از داده‌ها نسبت به معادله فرنللیچ داشت. در معادله لانگمویر میکرو زئولیت با ضریب تبیین بالاتر، جاذب مناسب‌تری برای حذف نیکل از محلول-های آبی انتخاب شد. به دلیل نزدیکی نتایج آزمایشات جذب میکرو زئولیت با نانوزئولیت، صرف هزینه و زمان کمتر در تولید نانوذرات، میکرو زئولیت به عنوان جاذب مناسب‌تر برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی انتخاب شد.

در مطالعه‌ای شایلا و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی حذف نیکل دو ظرفیتی توسط کانی زئولیت پرداختند (Shaila, K. D., Panhekar, P. V, Patil and Shridhar, S. 2015). پارامترهای مختلف غلظت اولیه نیکل، pH، زمان تماس و مقدار جاذب برای به دست آوردن مقادیر بهینه مورد بررسی قرار گرفت، مقادیر ثابت معادله برای پارامترهای فوق برای غلظت اولیه نیکل محلول آبی ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، پ هاش برابر ۵، زمان تماس ۵ ساعت و مقدار جاذب 0.2 گرم در محلول ۵۰ میلی لیتر نیکل بدست آمد. معادله‌های لانگمویر و فرنللیچ با داده‌های فوق برازش داده شد، ضریب تبیین (R^2) حذف نیکل توسط زئولیت با برازش روی معادله فرنللیچ برابر 0.۸۳۳ و برای معادله لانگمویر 0.۹۵۱ بدست آمد. با توجه به ضریب همبستگی بیشتر در معادله لانگمویر، این معادله برازش بهتری برای توصیف جذب نیکل توسط کانی زئولیت را نشان داد که آن را به جذب تک لایه نیکل دو ظرفیتی بر روی سطوح بیرونی زئولیت نسبت دادند. همچنین در مطالعه اورجیوک و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی ایزوترم‌های جذب نیکل (II) توسط زئولیت سنتز شده پرداخته شد، پارامترهای مختلف غلظت اولیه نیکل، زمان تماس بین محلول حاوی نیکل و جاذب زئولیت سنتز شده و مقدار جاذب برای به دست آوردن مقادیر بهینه مورد بررسی قرار گرفت. اعداد به دست آمده از آزمایشات فوق با معادله لانگمویر و فرنللیچ برازش داده شد. مقدار ضریب همبستگی (با شرایط غلظت اولیه نیکل ثابت، زمان تماس ۴۰ دقیقه، مقدار جاذب ۴ گرم) برا معادلات لانگمویر و فرنللیچ به ترتیب 0.993 و 0.98 به دست آمد که این ضریب همبستگی بالا در هر دو معادله نشان از مناسب بودن هر دو معادله برای برازش داده‌ها دارد.

۴. نتیجه گیری

تولید نانوذرات زئولیت به روش مکانیکی و به وسیله آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، با استفاده از نتایج حاصل از

4. References

Abdelwahab O., Thabet W. (2023). Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in aquaculture Systems: A review. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 49: 4, 431-443.

<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2023.11.004>

Aguilara J. Martínezb, V. Bustamanteb G., Francisco J., Tapiab A., Martínez-Mezab G., Vélchez-Vargasc R., ona K. (2020). Removal of nickel(II) from wastewater using a zeolite-packed anaerobic bioreactor: Bacterial diversity and community structure shifts. *Journal of Environmental Management*, 260:45-66.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111558>

Argun M. E. (2008). Use of clinoptilolite for the removal of nickel ions from water: Kinetics and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials* 150, 587–595.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.008>

Borandegi, M., Nezamzadeh, A. 2015. Enhanced removal efficiency of clinoptilolite nano-particles toward Co(II) from aqueous solution by modification with glutamic acid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 479: 35-45.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.008>

Charkhi, A., Kazemian, H., Kazemeini, M. (2010). Optimized experimental design for natural clinoptilolite zeolite ball milling to produce nano powders, *Powder Technology*, 203: 389-396.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.05.034>

Fabrianto, J., Natasia Kosasiah, A., Sunarso, J. and Ju, Y.H. 2009. Equilibrium and adsorption of heavy metals kinetic studies in using biosorbent: A summery of recent studies. *Journal of Hazardous Materials*, 162: 616-645. Fu, F. and Wang, Q. (2011) Removal of Heavy Metal Ions from

Review. *Journal of Environmental Management*, 92, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>

Hosseini S.S., Esmhosseini, M., Khezri S., Taloki F. G., Khosravi c,A. (2017). Removal of nickel ins from aqueous solutions using natural zeolite; kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Applied Chemistry* 11: No. 41,

2016 (In Persian).

Irannajad M. & Haghighi H. K. (2021). Removal of Heavy Metals from Polluted Solutions by Zeolitic Adsorbents a Review. *Environmental Processes*, 8: 7-35. DOI:

[10.1007/s40710-020-00470-x](https://doi.org/10.1007/s40710-020-00470-x)

Lang Q., Lu P., Yang X., Valtchev, V. (2024). Zeolites for the environment: Review. *Green Carbon*, 2: 1, 12-32.

DOI: [10.1016/j.greenca.2024.03.00211](https://doi.org/10.1016/j.greenca.2024.03.00211)

Kumari S., Chowdhry J., Kumar M., Chandra Garg M. (2024). Zeolites in wastewater treatment: A comprehensive review on scientometric analysis, adsorption mechanisms, and future prospects. *Environmental Research*, 260: 119782.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119782>

Malkoc, E. and Nuhoglu, Y. (2006) Fixed Bed Studies for the Sorption of Chromium(VI) onto Tea Factory Waste. *Chemical Engineering Science*, 61: 4363-4372.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.02.005>

Nezamzadeh, A., Kabiri, M. (2013). Effective removal of Ni(II) from aqueous solutions by modification of nano particles of clinoptilolite with dimethylglyoxime. *Journal of Hazardous Materials*, 260: 339-349.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.014>

Noroozifar, M., Khorasani-Motlagh, M., Naderpour, H. (2014). Modified nanocrystalline natural zeolite for

- 197:101-108. adsorption of arsenate from wastewater: Isotherm and <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.05.037>
- Orjioke, M.N., Uchechukwu, O. Igwe, S.N. (2015). Synthesis and Characterization of Zeolite and Its Application in Adsorption of Nickel from Aqueous Solution. Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences, International Standard Serial Numbers, 2348-7658.
- Payra, P. and Dutta, P.adk. (2003). Zeolite: A Primer. In: Auerbach, Carrado, S.M. and DUtta, P.K. (Eds). Handbook of Zeolite science and Technology. Marcel Dekker, P:148-155.
- Senthi, B. Rathi, P. Senthil Kumar , J. Natanya Ida Susana , J. Francia, Virgin , R. Dharani , S. Sanjay , Gayathri R. (2024). Recent research progress on the removal of heavy metals from wastewater using modified zeolites: A critical review Desalination and Water Treatment, 319:100573. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100573>
- Shaila, K. D., Panhekar, P.V, Patil and Shridhar, S. (2015). Zeolite as Adsorbent for the Removal of Nickel. Research Journal Recent Science 4(3), 48-51.
- Singh, S., Verma, L. K., Sambi, S.S. and Sharma, S.K.(2008). Adsorption behaviour of Ni (II) from water onto zeolite X: kinetics and equilibrium studies. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, PP: 22-24.
- Taamneh, Y., & Sharadqah, S. (2017). The removal of heavy metals from aqueous solution using natural Jordanian zeolite. Applied Water Science, 7:20–28.
- Taffarel, S. R.,& Rubio, J. (2010). Removal of Mn^{2+} from aqueous solution by Wastewaters: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.042>
- manganese oxide coated zeolite, Minerals Engineering, 23: 1131–1138. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.007>
- Rahmani, A., Mousavi, H. and Fazli, M. (2010). Effect of nanostructure alumina on adsorption of heavy metals. Desalinization, 253(1-3): 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.027>
- Roostan ,Z., Rashidi , R., Borghei, M. (2018). Nickel ion removal from aqueous solution using recyclable zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nano adsorbent: a kinetic and equilibrium study. Desalination and Water Treatment;103: 141–151. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21811>
- Zheng X., Alam Q., Zhou Y., Du D., Guanlin Li, Zhu W. (2024). Heavy metals detection and removal from contaminated water: A critical review of adsorption methods. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12: 6, 114366. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114366>
- Velarde ,L. Mohammad Sadegh Nabavi , Edwin Escalera , Marta-Lena Antti , Farid Akhtar (2023). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review.. Chemosphere, Volume 328, 138508. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>
- Wingenfelder, U., Gerhardfurrer, C., and Schulin. R. (2005). Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites. Environmental Science and Technology, 39, 4606-4613. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>
- studies. Microporou and Mesoporous Materials, Journal of Hazardous Materials,