

Removal of cadmium from polluted water environments using zero iron nanoparticles

Zahra Ghaffari ¹ , Mohammad Hossein Davoodi ² , Farshid Taran ^{3*} 

¹ Former M.Sc. Student, Irrigation and Drainage Discipline, Agricultural Engineering Research Institute (AERI); Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Karaj, Iran

² Associate Professor, Soil Sciences, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran

³ Assistant Professor, Irrigation and Drainage Discipline, Agricultural Engineering Research Institute (AERI); Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Karaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

The pollution resulting from the discharge of industrial effluents, consumption of fuel, discharge of municipal sewage, and the use of sludge from sewage treatment as a soil fertilizer have caused harmful effects affecting humans and living creatures and changing ecosystems. Meanwhile, as a heavy metal, cadmium is very important due to its high mobility and toxicity in low concentrations. Various methods have been developed to remove heavy metals from contaminated water and soil, and surface adsorption is one of the most efficient methods. Various surface adsorbents such as clays, zeolites, dry plants, agricultural waste materials, biopolymers, metal oxides, microorganisms, and volcanic ash have been used to remove heavy metals. Iron nanoparticle with zero charge (nZVI) is a new technology that has successfully been used to remove various metal ions. Nanoparticles are special adsorbents that are used for remedial purposes due to the presence of significant specific surface area that leads to the high density of exchange sites and metal removal capacity. Iron nanoparticles have been introduced as effective reductants and catalysts for a wide range of common pollutants, such as organochlorine compounds and metal ions. Heavy metals can be absorbed by absorbent materials such as nanoparticles. The present study aims to investigate the effect of iron nanoparticles in removing cadmium from water environments.

Materials and Methods

In this study, the synthesis of iron nanoparticles by sodium borohydride was used. For the synthesis of nanoparticles, 7.823 g of iron sulfate II ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) was dissolved in 200 ml of distilled water in the presence of ethanol. After setting the pH of the suspension at 6.8, 0.8 g of starch and 1.8 g of sodium borohydride were added to the solution. The nanoparticles were separated from the solution using a centrifuge and washed with ethanol. All steps were performed in the vicinity of nitrogen gas, and finally, the synthesized nanoparticles were dried under nitrogen gas. Finally, by using microscopic methods, images with very high magnification of the material were obtained. In this study, the shape and morphology of produced nanoparticles were investigated using SEM. To investigate the effect of nanoparticle and pollutant concentration on removal efficiency, factorial statistical design with cadmium concentration treatment at 9 levels (10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 and 500 mg/L), and treatment with zero amount of nano iron in three levels (0.025, 0.05 and 0.1 g) was applied. The effect of contact time on removal efficiency was investigated at 10 and 30 min and 1, 4, 8, and 24 h, and the effect of alkalinity was investigated at pHs of 4, 6, 8, and 10. In all stages, the concentration of cadmium in the purified solution was measured using an atomic absorption device.

Results and Discussion

The increase in removal efficiency with time is because the formation of holes and corrosion on the surface of iron increases, as a result of which the cross-sectional area of absorption and removal efficiency also increases. In addition, the active sites for cadmium absorption change, and the number of products resulting from the reaction of iron in the water environment increases, which also causes an increase in the removal efficiency with increasing retention time. The results showed that the absorption efficiency decreases with the increase in the initial concentration of cadmium, which means that iron nanoparticles have a limited capacity to absorb cadmium.

Examining the effect of the initial concentration of the ions of the adsorbed material showed that firstly, the more concentrated the solution is in terms of the number of ions, the better the absorption is, and secondly, the number of active sites for absorption gradually increases with the increase in the process time and the increase in the number of ions absorbed on the adsorbent decreases, so that the rate of absorption decreases significantly, leading to the formation of balance in absorption. The greater the amount of iron nanoparticles, the greater the number of active surfaces participating in metal absorption, and as a result, it holds the adsorbed cadmium with greater force. The results of placing cadmium-contaminated nanoparticles in distilled water showed that in high doses of iron nanoparticles, a smaller amount of cadmium was absorbed and re-entered the environment. With the increase in the initial concentration of cadmium, its release has also increased because, as mentioned above, the number of occupied sites has increased, and the amount of holding energy per ion has decreased, causing release.

Conclusion

As the concentration of the pollutant increases, due to the limited capacity of the adsorbent, the efficiency of absorption decreases, which means that with the saturation of the absorption sites, it is not possible to absorb more of the pollutant. On the other hand, with the increase in the amount of adsorbent, the absorption efficiency increases due to the increase in the number of absorption sites. Also, by increasing the amount of adsorbent and pollutant, the possibility of collision between cadmium and iron nanoparticles and the occurrence of absorption reactions increases. The high ratio of adsorbent to pollutant causes a stronger bond, and as a result, less pollutant is released. When the adsorption surfaces of nanoparticles are occupied by the pollutant, it is no longer possible to release the pollutant and reuse these absorption surfaces, and in general, iron nanoparticles have zero charge and cannot be used more than once to clean cadmium from the water environment.

Keywords: Oxidation and reduction potential, Surface adsorption, Cadmium, Removal efficiency, Zero iron nanoparticles

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Azad University of Karaj Branch for the financial and logistical support, which significantly contributed to this research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Zahra Ghaffari: Writing- original draft preparation; **Mohammad Hossein Davoodi:** Supervision; **Farshid Taran:** Resources, Manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: farshidtaran@gmail.com

Citation: Ghaffari, Z., Davoodi, M.H., & Taran, F. (2025). Removal of cadmium from polluted water environments using zero iron nanoparticles. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 75-88.
doi: 10.22098/mmws.2024.14584.1418

Received: 05 February 2024, Received in revised form: 13 March 2024, Accepted: 19 March 2024, Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 75-88

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





حذف کادمیوم از محیط‌های آبی آلوده با استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی

زهرا غفاری^۱، محمدحسین داودی^۲، فرشید تاران^{۳*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، بخش آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

^۲ دانشیار، گروه خاکشناسی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

^۳ استادیار، بخش آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

امروزه به دلیل فعالیت‌های صنعتی، وجود فلزات سنگین در مواد غذایی و محیط به عنوان عوامل مخاطره‌انگیز مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. از جمله روش‌های کارآمد پاک‌سازی محیط، به‌ویژه محیط‌های آبی، از حضور فلزات سنگین، جذب سطحی توسط مواد جاذب است. این پژوهش نیز با بررسی نقش نانوذرات آهن در پاک‌سازی کادمیوم از محیط صورت گرفته است. بدین منظور پس از سنتز نانوذرات آهن صفر به روش بور هیدرید، ابتدا بهترین زمان ماند و اثر pH بر فرآیند جذب مشخص شد. سپس مقادیر ۰/۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ گرم نانوذرات انتخاب و به ۱۰ میلی‌لیتر از محلول کادمیوم با غلظت‌های اولیه ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر اضافه شد. در نهایت به منظور بررسی پایداری جذب، آزمایش رهاسازی و برای تعیین قابلیت استفاده دوباره از نانوذرات آزمایش باز انجامی طراحی و اجرا شد. نتایج نشان داد بهترین زمان ماند چهار ساعت است و کارایی جذب با افزایش pH بهبود می‌یابد. به طوری که از ۱۵ درصد در pH=۴ به ۹۸/۵ درصد در pH=۱۰ افزایش یافته است. در دامنه غلظت انتخاب شده برای کادمیوم، با افزایش غلظت، کارایی حذف کاهش یافته است. با این حال، این کاهش در غلظت‌های بالاتر، با افزایش نانوذرات کمتر مشاهده شده است. در مجموع نتایج نشان داد که برای حذف آلودگی کادمیوم تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از مقدار ۰/۲۵ گرم نانوذرات، تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر از ۰/۰۵ گرم نانوذرات و تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم از مقدار ۰/۱ گرم نانوذرات می‌توان استفاده نمود. آزمایش رهاسازی مشخص کرد که نانوذرات آهن صفر پتانسیل بسیار بالایی در جذب و حذف کادمیوم دارند. با این حال، آزمایش باز انجامی نشان داد که امکان استفاده مجدد از نانوذرات تولید شده وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل اکسیداسیون و احیا، جذب سطحی، کادمیوم، کارایی حذف، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: farshidtaran@gmail.com

استناد: غفاری، زهرا، داودی، محمدحسین، و تاران، فرشید (۱۴۰۴). حذف کادمیوم از محیط‌های آبی آلوده با استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی.

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۱)، ۷۵-۸۸.

doi: 10.22098/mmws.2024.14584.1418



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۷۵ تا ۸۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

توسعه و گسترش شهرها و رشد و تکامل صنایع و فناوری منجر به ورود عوامل آلوده‌کننده گوناگون مانند پساب‌های کارخانه‌ها به محیط زیست شده‌اند. آلودگی‌های حاصل از تخلیه پساب‌های صنعتی، مصرف مواد سوختی، تخلیه فاضلاب‌های شهری و مصرف لجن حاصل از تصفیه فاضلاب به عنوان بارور کننده زمین، اثرات زیان‌باری را برای منابع آب و خاک به وجود آورده است. این اثرات زیان‌بار نه تنها دامن‌گیر انسان و موجودات زنده شده، بلکه در بوم‌سازگان‌ها نیز تغییرات عمیق و گسترده‌ای ایجاد کرده است (Norvell et al., 2000; Parichehreh et al., 2022). در این میان، اثرات کادمیوم بر سلامت انسان شامل صدمه به کلیه، اختلال در متابولیسم دیگر گونه‌های فلزی در بدن مثل آهن، پیشرفت بیماری فشار خون و سرطان پروستات است. اثرات کوتاه مدت شامل کاهش تنفس، ضعف و تب بعد از تنفس ذرات ریز حاوی کادمیوم فقط پس از ۲۴ ساعت مشاهده شده است. مقدار کادمیوم پنج میلی‌گرم در متر مکعب هوا می‌تواند بعد از هشت ساعت باعث مرگ شود. به طور خلاصه یون آزاد کادمیوم (Cd^{+2}) سمی‌ترین گونه شیمیایی برای انسان است و کلیه‌ها حساس‌ترین اندام بدن نسبت به کادمیوم هستند. حداکثر غلظت مجاز کادمیوم در آب آشامیدنی توسط World Health Organization (2008) 0.03 میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است. در همین راستا و به دلیل اهمیت حذف این فلز و سایر فلزات سنگین از محیط‌های آبی و خاکی، مطالعات زیادی انجام گرفته است (Abbasi-Kalo et al., 2023; Enayat et al., 2024).

برای حذف فلزات سنگین از آب و خاک‌های آلوده روش‌های گوناگونی توسعه یافته است که جذب سطحی یکی از کارآمدترین روش‌ها است. جاذب‌های سطحی متنوعی مثل رس‌ها، زئولیت، بخش‌های خشک گیاهی، مواد زائد کشاورزی، پلیمرهای زیستی، اکسیدهای فلزی، میکروارگانوسم‌ها و خاکسترهای آتش‌فشانی برای حذف فلزات سنگین استفاده شده‌اند (Boparai et al., 2010). نانوذرات آهن با بار صفر^۱ (nZVI) به‌عنوان فن‌آوری نوین برای حذف انواع یون‌های فلز استفاده موفقیت‌آمیزی داشته است. نانوذرات جاذب خاصی هستند که به دلیل وجود سطح ویژه قابل توجه که منجر به تراکم بالای مکان‌های تبادل و ظرفیت حذف

فلز می‌شوند، برای اهداف اصلاحی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Boparai et al., 2010). اساساً نانوذرات آهن به عنوان احیاء کننده و کاتالیزور مؤثر برای دامنه وسیعی از آلاینده‌های متداول از قبیل ترکیبات آلی کلرینه و یون‌های فلزی معرفی شده است (Elliott and Zhang, 2001; Stępniewska and Bucior, 2001; Joo and Cheg, 2006; Elliott and Zhang, 2001; Fang et al., 2011).

نانوذرات دارای دو ویژگی بارز است که سبب می‌شود توانایی آن‌ها در اصلاح خاک و آب افزایش یابد. اولین ویژگی، اندازه بسیار کوچک آن‌ها است. ویژگی دیگر این که نانوذرات می‌تواند توسط جریان آب‌های زیرزمینی منتقل شود و به دلیل این ویژگی، می‌توان آن‌ها را به‌صورت تحت فشار و یا به کمک نیروی ثقل به اعماق خاک و حتی درون آب‌های زیرزمینی تزریق کرد تا به محدوده آلودگی مورد نظر منتقل شوند (Zhang, 2003). البته دلایل متعددی سبب استفاده فراگیر از نانوذرات آهن شده است. سمیت کمتر و پایداری نانوذرات آهن در محیط، از جمله مزایایی است که آن را از سایر نانوذرات متمایز می‌کند. نانوذرات آهن زمانی که در محیط قرار می‌گیرد به‌صورت اکسید درآمده و در نتیجه در محیط پایدار شده و تحرک کمتری می‌یابد. علاوه بر این، از نظر سمیت نیز مخاطره‌ای برای محیط به دنبال ندارد (Ghazizadeh and Jafarzadeh., 2009).

Sun et al. (2006) در پژوهشی اثربخشی سه نوع نانوذرات مبتنی بر آهن شامل آهن صفر ظرفیتی، سولفید آهن و مگنتیت را به منظور غیر متحرک‌سازی آرسنیک در دو نوع خاک آلوده بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزایش مقدار نانوذرات آهن سبب کاهش بیشتر آرسنیک و همین‌طور کاهش آبشویی آن می‌شود. Rahmani et al. (2012) سنتز نانوذرات آهن صفر و تعیین کارایی آن در حذف آرسنیک از محیط آبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در pH حدود ۷ و با غلظت ۱ گرم در لیتر نانوذرات آهن، می‌تواند در زمان ماند ۱۰ دقیقه بیش از ۹۹ درصد آرسنیت و آرسنات را از محیط آبی حذف نماید. Üzüim et al. (2008) کاربرد نانوذرات آهن را برای حذف کبالت از محیط‌های آبی تحت شرایط آزمایشگاهی بررسی کردند. در این بررسی محدوده غلظت کبالت از ۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌ی نانوذرات آهن غالباً در حدود

¹ Nano Zero-Valent Iron

صفر در هسته به عنوان دهنده الکترون و احیاکننده ایفای نقش می‌کند و اکسیدهای آهن در لایه بیرونی ضمن حفاظت هسته مرکزی از اکسایش سریع، باعث جذب و پیوند مولکول‌های آلاینده‌ها در سطح نانوذرات می‌شود که به احیای آن‌ها کمک می‌کند. این ساختار توسط XEDS و STEM نیز تایید شده است (Yan et al., 2010).

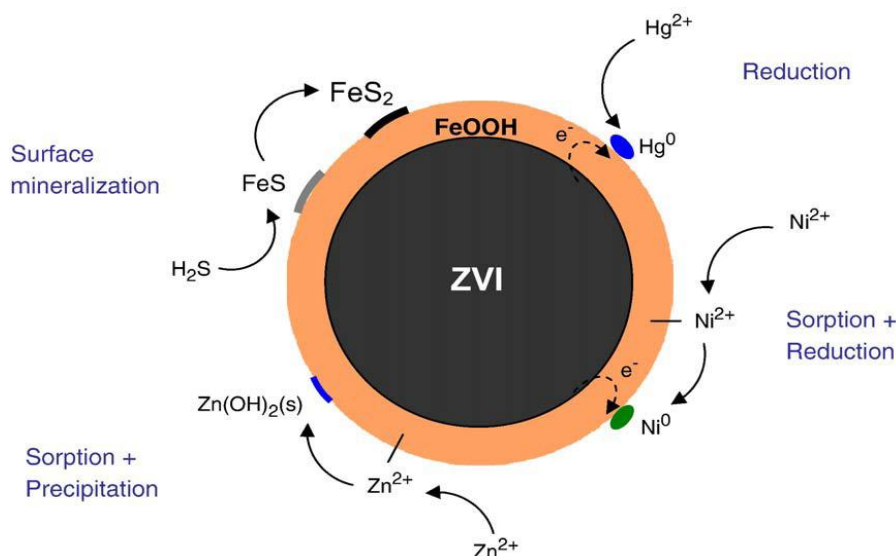
این که نانوذرات یک آلاینده را احیاء کنند یا از طریق جذب سطحی پاک‌سازی کنند، مکانیسم وابسته به پتانسیل اکسید و احیایی آلاینده است. برای مثال، فلزاتی مثل روی و کادمیوم که پتانسیل استاندارد اکسید و احیای خیلی نزدیک و یا منفی‌تر از آهن (۰/۴۱- ولت) دارند از طریق جذب یا تشکیل پیوند سطحی پاک‌سازی می‌شوند، در حالی برای فلزاتی مثل مس، نقره و جیوه که پتانسیل مثبت‌تری نسبت به آهن دارند، مکانیسم پاک‌سازی غالباً فرآیند احیاء است. در ضمن فلزاتی که پتانسیل رداکس آن‌ها به مقدار کمتری نسبت به آهن مثبت‌تر است مثل نیکل و سرب از طریق هر دو مکانیسم احیاء و جذب در سطح نانوذرات غیر متحرک می‌شوند (Li and Zhang, 2006). هر دو مکانیسم احیاء و جذب بر روی سطوح نانوذرات، بازیابی بالای دفع و واکنش سریع ایجاد می‌کنند که نانوذرات آهن صفر ظرفیتی را به عنوان موادی با بازیابی بالا برای سالم‌سازی و غیر متحرک‌سازی فلزات سنگین مطرح می‌سازد (Foroutan et al., 2012). در ادامه، Li and Zhang (2007) گزارش دادند از آنجایی که مکانیسم کنترل جذب تابعی از پتانسیل استاندارد اکسید و احیا فلز سنگین است و پتانسیل استاندارد رداکس کادمیوم ۰/۴۷- ولت در ۲۵ درجه سانتی‌گراد خیلی نزدیک به پتانسیل رداکس آهن است (۰/۴۱- ولت در ۲۵ درجه سانتی‌گراد) از این‌رو حذف یون کادمیوم توسط نانوذرات براساس جذب است. پاک‌سازی محیط به ویژه محیط‌های آبی از فلزات سنگین می‌تواند در اثر جذب سطحی توسط مواد جاذب مانند نانوذرات اتفاق بیفتد. هدف مطالعه حاضر، بررسی تأثیر نانوذرات آهن در پاک‌سازی کادمیوم از محیط‌های آبی است. به دلیل اهمیت پارامترهای خاک از قبیل توزیع اندازه ذرات، میزان مواد آلی، حضور کاتیون و آنیون‌های محلول و غیره در کارایی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، بررسی نقش آنها در جذب یک آلاینده

۲۰ تا ۸۰ نانومتر بود. با افزایش غلظت اولیه کبالت تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تأثیر نانوذرات آهن برای تثبیت کبالت بسیار چشم‌گیر بود. افزایش pH منجر به افزایش تثبیت یون‌های کبالت شد. Bopari et al. (2012) سینتیک و ترمودینامیک حذف یون کادمیوم به وسیله جذب سطحی بر نانوذرات صفر را بررسی کردند. در این مطالعه محدوده غلظت کادمیوم ۲۵ تا ۴۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود. حداکثر ظرفیت جذب کادمیوم بر نانوذرات آهن ۲/۲۶۹ میلی‌گرم در گرم در دمای ۲۹۷ کلین به‌دست آمد. این تحقیق نشان داد که نانوذرات آهن می‌تواند به عنوان یک جاذب مؤثر و کارآمد برای حذف کادمیوم به کار رود. Hamidianfar et al. (2020) در یک تحقیق آزمایشگاهی، حذف کادمیوم از محیط‌های آبی توسط نانوذرات اکسید آهن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که راندمان جذب کادمیوم در اثر استفاده از پوشش نانوذرات افزایش می‌یابد و می‌توان آن را راهکاری مطلوب در پاک‌سازی محیط‌های آبی آلوده از کادمیوم معرفی نمود. (Amiri (2023) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر استفاده از هیدروکسی آپاتیت اصلاح شده توسط نانوذرات آهن صفر ظرفیتی برای حذف یون‌های نیکل و مس از محلول‌های آبی پرداخت و پارامترهای زمان تماس، دما، غلظت اولیه یون‌های فلزی، میزان جاذب و pH را در جذب ارزیابی نمود. ایشان با ارزیابی پارامترهای ترمودینامیکی مانند آنتالپی، آنتروپی و انرژی آزاد گیبس نتیجه گرفت که جذب به صورت مطلوبی در اثر فرآیندهای خود به خودی اتفاق افتاده است. Nikkhosani Gol Tapeh et al. (2023) به بررسی توزیع اشکال شیمیایی کادمیوم در خاک‌های آلوده در اثر استفاده از نانوذرات آهن مغناطیسی پرداختند و متوجه کاهش معنادار کادمیوم در بخش تبادل و افزایش آن در بخش‌های آلی، اکسیدی، کربناتی و باقیمانده شدند. آن‌ها پیش‌بینی نمودند که با کاربرد نانوذرات آهن، دسترسی گیاه به عنصر کادمیوم کاهش می‌یابد.

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به دلیل ساختار هسته-پوسته^۱، ویژگی‌های استثنایی را برای جذب و رسوب کاهشی یون‌های فلزی دارد (شکل ۱). در این مدل نانوذرات دارای یک لایه سطحی متشکل از اکسیدهای آهن فرو و فریک و یک هسته دارای آهن صفر هستند. لایه سطحی یک محافظ است که از اکسایش بیشتر هسته جلوگیری می‌کند (Yan et al., 2010; Cook, 2009).

¹ Core-shell

از خاک می‌تواند اطلاعات مفیدی در رابطه با استفاده محیط زیستی از فن‌آوری نانو ارائه دهد.



شکل ۱- مدل core-shell و شماتیک حذف برخی از آلاینده‌های فلزی (یان و همکاران، ۲۰۱۰)

Figure 1- The core-shell model and schematic of removing some metal pollutants

انجام شده و در نهایت نیز نانوذرات سنتز شده تحت گاز نیتروژن خشک شدند (Sun et al., 2006; Boparai et al., 2010). در نهایت با استفاده از روش‌های میکروسکوپی تصاویری با بزرگنمایی بسیار بالا از ماده به دست می‌آید. در این مطالعه با استفاده از دستگاه SEM³، شکل و مورفولوژی نانوذرات تولید شده بررسی شد.

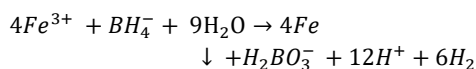
۲-۲- جذب کادمیوم روی نانوذرات آهن صفر

برای بررسی اثر غلظت نانوذرات و آلاینده بر کارایی پاکسازی، طرح آماری فاکتوریل با تیمار غلظت کادمیوم در ۹ سطح (۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) تیمار مقدار نانو آهن صفر در سه سطح (۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۱ گرم) اعمال شد. جذب کادمیوم بر روی نانوذرات آهن صفر کاملاً وابسته به سطوح واکنش‌پذیر و غلظت فلزات سنگین اشغال‌کننده این سطوح است و این غلظت بر اساس آلاینده موجود در محلول خاک و یا منبع آب یک مقدار معین است. در دامنه غلظت انتخاب شده، برای ۰/۲۵ گرم نانوذرات آهن از غلظت ۵۰ گرم در لیتر به بعد کارایی حذف به شدت کاهش یافته و به کمتر از ۵۰ درصد رسید، ولی برای مقادیر بیشتر نانوذرات این کاهش

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سنتز نانوذرات آهن

در ذرات نانومقیاس آهن با بار صفر می‌توانند در محیط‌های آبی با احیای آهن فریک یا آهن فروس توسط سدیم بورهیدرید^۱ یا با تجزیه آهن پنتا کربونیل^۲ در حلال‌های آلی یا آرگون آماده شوند. در این مطالعه سنتز نانوذرات آهن توسط سدیم بورهیدرید استفاده شده است. مکانیسم کار بدین صورت است که برای احیاء آهن فریک به آهن صفر طبق این واکنش، بورهیدرید به مخزن اضافه می‌شود:



برای سنتز نانوذرات ۷/۸۲۳ گرم سولفات آهن II(FeSO₄ . 7H₂O) در حضور اتانول در ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۳۰ حل شد. پس از تنظیم pH سوسپانسیون در ۶/۸، به محلول ۰/۸ گرم نشاسته و ۱/۸ گرم سدیم بورهیدرید اضافه شد. نانوذرات با استفاده از سانتریفوژ از محلول جدا شده و با اتانول شسته شد. تمامی مراحل در مجاورت گاز نیتروژن

³ Scanning Electron Microscope

¹ Sodium boro hydride

² Iron penta carbonyl (Fe(CO)₅)

کافی است. اثر مدت تماس بر کارایی حذف در زمان‌های ۱۰ و ۳۰ دقیقه و ۱، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت، و اثر قلیایت در pHهای ۴، ۶، ۸ و ۱۰ بررسی شد. در تمام مراحل غلظت کادمیوم محلول پاکسازی شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل SU3900 ساخت شرکت Hitachi ژاپن با دقت اندازه‌گیری ۹۷ درصد) اندازه‌گیری شد. ضریب تبیین نمودار واسنجی دستگاه برابر با ۰/۹۹۷۶ به دست آمد. دامنه پارامترهای بررسی شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

در غلظت‌های بالاتر اتفاق افتاد. ۰/۱ گرم نانوذرات توانست در بیشترین غلظت کادمیوم (۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) تا ۹۰ درصد از آن را از محیط حذف کند. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که برای حذف آلودگی کادمیوم تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از مقدار ۰/۰۲۵ گرم نانوذرات، تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر از ۰/۰۵ گرم نانوذرات و تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم از مقدار ۰/۱ گرم نانوذرات می‌توان استفاده نمود. بنابراین، تیمارهای آهن با توجه به هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن تولید در سه سطح

جدول ۱- دامنه پارامترهای فیزیکی-شیمیایی آزمایش شده

Table 1- The range of the tested physical-chemical parameters

مرحله	زمان تماس (دقیقه)	pH	غلظت اولیه کادمیوم (میلی‌گرم در لیتر)	غلظت نانوذرات (میلی‌گرم در لیتر)
اثر زمان تماس	1440-10	8	100	0.025
اثر pH	240	4-10	200	0.025
اثر غلظت اولیه کادمیوم	240	8	10-500	0.1-0.025
اثر غلظت نانوذرات	240	8	10-500	0.1-0.025

همچنین میلی‌گرم یون فلزی جذب شده در گرم nZVI بوسیله معادله تعادلی جرم با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$q = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{M} \quad (2)$$

در این رابطه، V: حجم محلول برحسب لیتر و M جرم نانوذرات آهن برحسب گرم است.

به‌منظور ارزیابی پایداری کادمیوم جذب‌شده در سطح نانوذرات آهن صفر، از نانوذراتی که قبلاً عمل جذب کادمیوم را انجام داده‌اند، استفاده شد. در این آزمایش به دو مقدار ۰/۰۲۵ و ۰/۱ نانوذرات آهن آلوده‌شده با غلظت‌های اولیه ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیرشده اضافه شد. بعد از ۲۴ ساعت تکان دادن، میزان کادمیوم محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی قابلیت استفاده دوباره از نانوذرات آهن صفر، آزمایش باز انجامی روی ۰/۰۲۵ گرم از این نانوذرات صورت گرفت که در هفت مرحله به آن ۱۰ میلی‌لیتر از محلول ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم اضافه شد و در هر مرحله غلظت کادمیوم محلول اندازه‌گیری و میزان کادمیوم جذب شده بر این نانوذرات در هر مرحله را محاسبه شد. در همه موارد کارایی جذب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

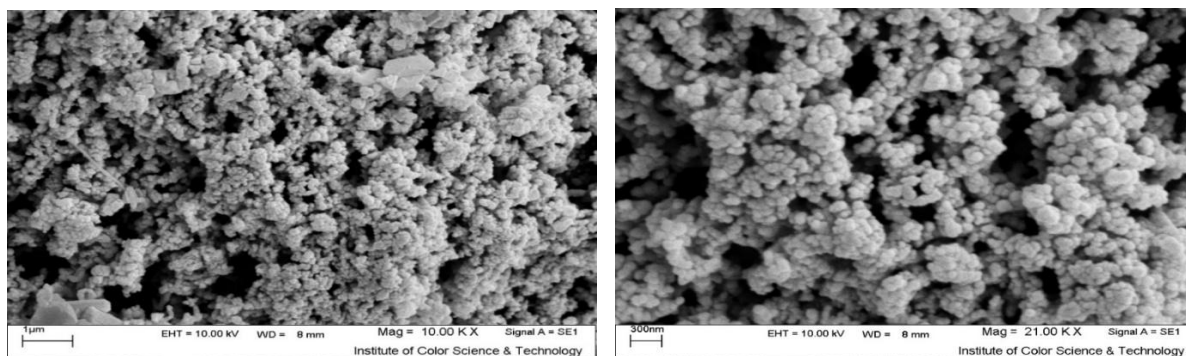
$$\%E = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه E نشان‌دهنده میزان کارایی و C₀ و C_e به ترتیب مربوط غلظت اولیه و غلظت نهایی کادمیوم است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های ظاهری نانوذرات

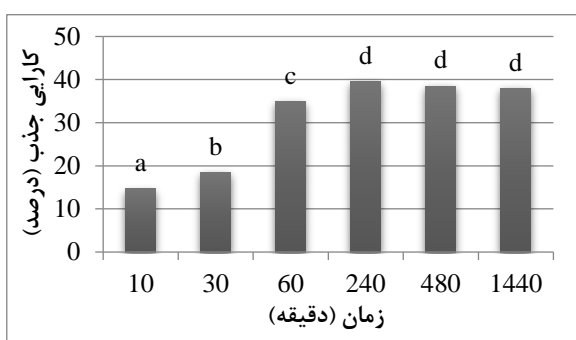
اولین گام در بررسی واکنش‌ها و نتایج حاصل از استفاده نانوذرات آهن صفر آگاهی یافتن از ویژگی‌های ظاهری این ذرات است. برای این کار از یک نمونه از نانوذرات تولیدی با استفاده از دستگاه SEM-s360 عکس‌برداری شد (شکل ۲). این تصاویر گویای شکل کروی نانوذرات آهن صفر است که برخی از آن‌ها نیز باهم تشکیل خوشه داده‌اند. اندازه متوسط این نانوذرات در حدود ۵۰ تا ۷۰ نانومتر است که با سایر کارهای انجام شده مطابقت دارد. البته بزرگتر بودن برخی از نانوذرات نیز طبق گفته Fang et al. (2011) می‌تواند به دلیل تجمع ذرات کوچکتر باشد.



شکل ۲- تصویر SEM از نانوذرات آهن تولیدی در دو مقیاس متفاوت

Figure 2- The SEM images of the iron nanoparticles in two scales

یون‌های هیدروژن را در مقایسه یا یون‌های فلز از محلول جذب می‌کنند؛ بنابراین، در شرایط اسیدی و با کاهش pH، این خاصیت تقویت می‌شود. با افزایش pH غلظت یون‌های هیدروژن کاهش یافته و در نتیجه جذب فلز افزایش پیدا می‌یابد. کارایی جذب به دست آمده نیز به خوبی گویای این مسأله است، چراکه با افزایش pH کارایی جذب از ۱۵ درصد در pH=۴ به ۹۸/۵ درصد در pH=۱۰ افزایش یافته است (Malaki, 2012).



شکل ۳- کارایی جذب نانوذرات آهن برای کادمیوم در

زمان‌های مختلف

Figure 3- Adsorption efficiency of iron nanoparticles for cadmium at different times

جدول ۲- تأثیر pH بر کارایی جذب نانوذرات آهن صفر

Table 2- The effect of pH on the adsorption efficiency of zero iron nanoparticles

pH اولیه	pH نهایی	کادمیوم محلول (میلی‌گرم در لیتر)	کارایی جذب (درصد)
4	5.13	171	14.5
6	5.26	152	24
8	8.8	9	95.5
10	9.37	3	98.5

۳-۲- بررسی اثر زمان و pH

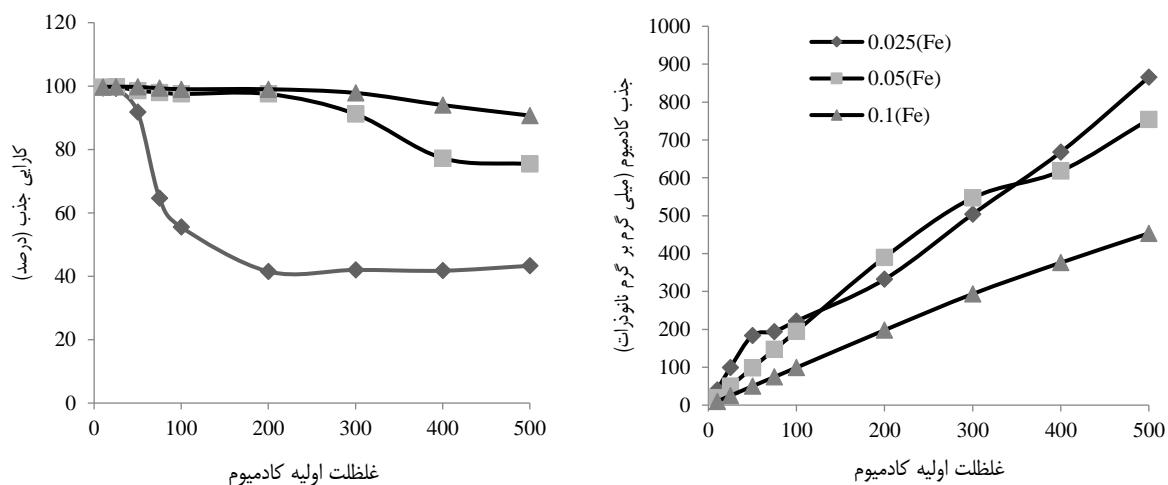
اولین مورد بررسی شده در مورد کارایی حذف کادمیوم توسط نانوذرات آهن تولیدی، اثر زمان تماس و pH محلول آبی بر میزان جذب کادمیوم است. با گذشت زمان میزان جذب یا کارایی حذف افزایش می‌یابد ولی پس از چهار ساعت تغییرات آن از لحاظ آماری معنی‌دار نیست (شکل ۳). افزایش کارایی حذف با گذشت زمان دلیل ایجاد حفره و خوردگی در سطح آهن بیشتر با گذشت زمان است که در نتیجه آن، سطح مقطع جذب و کارایی حذف نیز افزایش می‌یابد. ضمناً با گذشت زمان جایگاه‌های فعال برای جذب کادمیوم تغییر می‌کند و تعداد محصولات حاصل از واکنش آهن در محیط آبی افزایش می‌یابد، که این موضوع نیز سبب افزایش کارایی حذف با افزایش زمان ماند می‌شود (Rahmani et al., 2012). علاوه بر این روند تغییرات نشان می‌دهد که سینتیک جذب کادمیوم در ابتدای فرآیند نسبتاً سریع بوده است. این موضوع به وجود سطح فعال جذب در شروع فرآیند مربوط شده و باعث جذب سریع کادمیوم می‌شود. اما در مجموع سینتیک جذب کادمیوم از یک روند نسبتاً کندی برخوردار است و در نهایت بعد از حدود ۶۰ الی ۲۴۰ دقیقه به شرایط تعادل می‌رسد.

معمولاً در فرآیند جذب pH محلول آبی یک پارامتر کنترلی بسیار مهم بشمار می‌رود، زیرا نوع گونه یونی ماده جذب‌شونده و میزان بار سطح جاذب را تعیین می‌کند که این عوامل بر واکنش بین جاذب و ماده جذب‌شونده تأثیر گذارند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش pH میزان جذب نیز افزایش می‌یابد (جدول ۲). این امر به دلیل جذب کاتیون‌ها در نتیجه عمل جذب است که در سطح اکسیدی نانوذرات آهن صفر، در pH بالا که دارای بار منفی هستند، اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، نانوذرات آهن صفر ترجیحاً

۳-۳- اثر مقدار نانوذرات و غلظت آلاینده

در سیستم‌های جذب، غلظت فلزات سنگین موجود در محلول به عنوان نیروی محرکه برای غلبه بر مقاومت ناشی از انتقال جرم بین فاز مایع و جامد و همچنین وجود مکان‌های جذبی برای جذب فلز سنگین، نقش مهمی دارد. تأثیر غلظت اولیه کادمیوم و میزان نانوذرات آهن در مقدار و کارایی حذف فلز سنگین در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه کادمیوم، کارایی جذب کاهش می‌یابد؛ این بدان معنی است که نانوذرات آهن ظرفیت محدودی برای جذب کادمیوم دارند. بررسی اثر غلظت اولیه یون‌های ماده جذب شونده نشان داد که اولاً هرچه غلظت یون‌ها در محلول بیشتر باشد، جذب بهتری صورت می‌گیرد و ثانیاً تعداد مکان‌های فعال جذب به تدریج با افزایش زمان فرآیند و تعداد یون‌های کادمیوم جذب‌شده بر روی جاذب، کاهش پیدا می‌کند، به طوری که سرعت جذب به طور محسوسی کاهش یافته و منجر به رسیدن به تعادل در فرآیند جذب می‌شود (Malaki, 2012).

بررسی اثر مقدار جاذب بر فرآیند جذب نشان داد که با افزایش مقدار جاذب، درصد جذب افزایش می‌یابد؛ زیرا تعداد مکان‌های فعال جذب بر روی جاذب که می‌تواند در اختیار کادمیوم قرار گیرد افزایش می‌یابد. همچنین دلیل دیگر افزایش کارایی حذف با افزایش غلظت نانوذرات و افزایش محل‌های فعال سطحی جذب، امکان برخورد بیشتر بین کادمیوم با نانوذرات آهن و افزایش واکنش‌های جذب است (Rahmani et al., 2012). با این حال، مقدار کادمیوم جذب شده در واحد جرم جاذب (بر حسب میلی‌گرم در گرم) یک روند کاهشی را نشان می‌دهد. این روند کاهشی در ظرفیت جذب با افزایش مقدار جاذب به خاطر تعداد مکان‌های غیر اشباع جذب است. در واقع با افزایش مقدار جاذب تعداد زیادی از مکان‌های جذبی که می‌تواند در فرآیند جذب شرکت نماید، به دلیل محدودیت تعداد یون‌های کادمیوم، به صورت آزاد باقی خواهند ماند.



شکل ۴- تأثیر غلظت اولیه کادمیوم و میزان نانوذرات آهن در مقدار و کارایی جذب کادمیوم توسط نانوذرات آهن صفر

Figure 4- The effect of the initial concentration of cadmium and the amount of iron nanoparticles on the amount and efficiency of cadmium absorption on zero iron nanoparticles

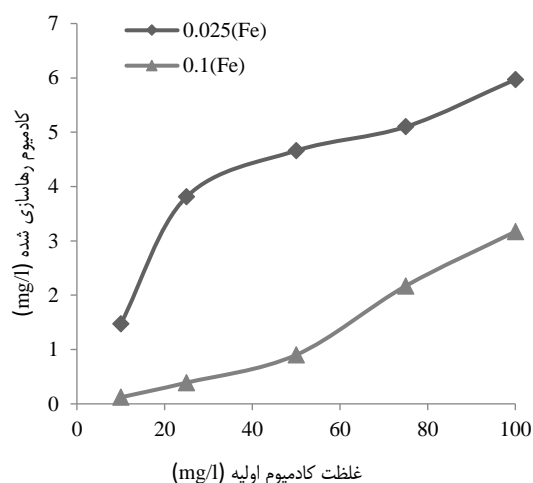
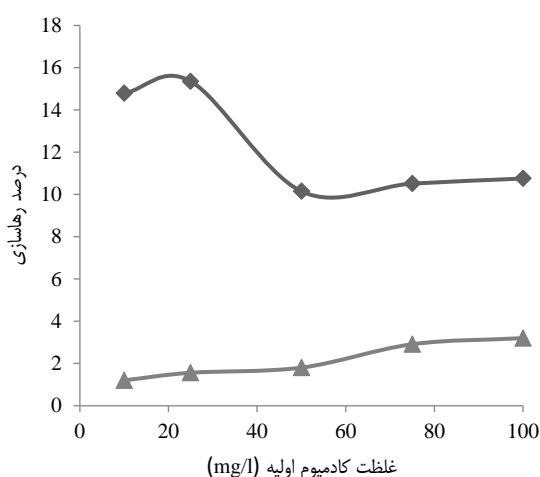
محتمل است که در صورت زیاد بودن میزان کادمیوم محلول، قسمتی از آن با انرژی کمتر و با نیروی واندروالسی جذب سطوح نانوذرات شوند و در شرایط غلظت پایین کادمیوم (مثلاً در اثر رقیق کردن) به راحتی از سطح آن جدا شده و وارد محلول خاک شوند. در دامنه غلظت انتخاب شده، برای ۰/۰۲۵ گرم نانوذرات آهن از غلظت ۵۰ گرم در لیتر به بعد کارایی حذف به شدت کاهش یافته

پس می‌توان در کل نتیجه گرفت که جذب کادمیوم بر روی نانوذرات آهن صفر کاملاً وابسته به سطوح واکنش‌پذیر و غلظت فلزات سنگین اشغال‌کننده این سطوح است و برای پاک‌سازی هر غلظت از آلاینده موجود در محلول خاک و یا منبع آب یک مقدار معین از نانوذرات آهن صفر کافی است. هرچند گزارش شده که ظرفیت نانوذرات برای جذب فلز محدود است، ولی این امر نیز

۴-۳- آزمایش رهاسازی

با افزایش مقدار نانوذرات آهن، مقدار سطوح فعال شرکت کننده در جذب فلز بیشتر بوده و در نتیجه با نیروی بیشتری کادمیوم جذب شده را نگهداری می‌کند. نتایج حاصل از قرار دادن نانوذرات آلوده به کادمیوم در آب مقطر (شکل ۵) نشان داد که در مقادیر بالای نانوذرات آهن مقدار کمتری از کادمیوم جذب شده، دوباره وارد محیط شده است. با افزایش غلظت اولیه کادمیوم، میزان رهاسازی آن نیز افزایش داشته است، چرا که همان‌گونه که در بالا نیز اشاره شد، تعداد مکان‌های اشغال شده افزایش یافته و مقدار انرژی نگهدارنده به ازای هر یون کاهش می‌یابد که باعث رهاسازی می‌شود.

و به کمتر از ۵۰ درصد رسیده است، ولی برای مقادیر بیشتر نانوذرات این کاهش در غلظت‌های بالاتر اتفاق افتاده است، و ۰/۱ گرم نانوذرات توانسته است در بیشترین غلظت کادمیوم (۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) تا ۹۰ درصد از آن را از محیط حذف نماید. بنابراین براساس این نتایج می‌توان گفت که برای حذف آلودگی کادمیوم تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از مقدار ۰/۲۵ گرم نانوذرات، تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر از ۰/۰۵ گرم نانوذرات و تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم از مقدار ۰/۱ گرم نانوذرات می‌توان استفاده نمود.



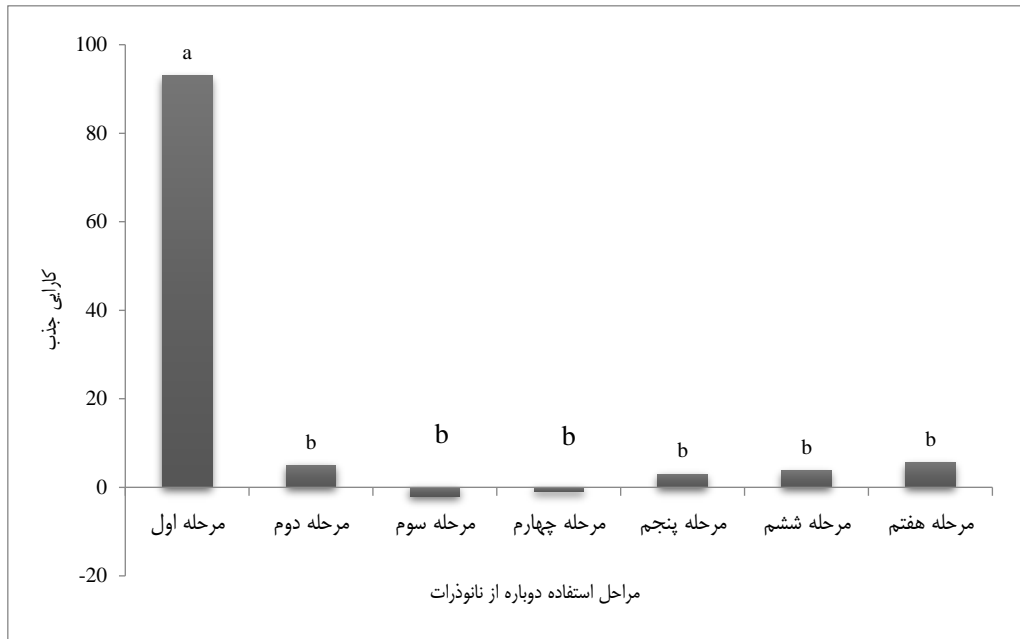
شکل ۵- اثر غلظت اولیه کادمیوم و مقدار نانوذرات در درصد و مقدار رهاسازی

Figure 5- The effect of the initial concentration of cadmium and the number of nanoparticles on the release percentage and amount

انجام شد که طی آن از یک سری نانوذرات در هفت مرحله متوالی استفاده شد. نتایج هر مرحله ثبت و تحلیل آماری آن در شکل ۶ ارائه شده است.

۵-۳- آزمایش بازانجامی

برای صرفه‌جویی در هزینه و کاهش هدر رفت، همیشه قابلیت استفاده دوباره از مواد مطرح است. در این طرح نیز به منظور ارزیابی قابلیت استفاده مجدد از نانوذرات آهن صفر، آزمایشی



شکل ۶- بررسی آماری قابلیت استفاده دوباره از نانوذرات آهن در مراحل مختلف
Figure 6- Statistical investigation of iron nanoparticles reusability at different stages

۴- نتیجه گیری

احیای آهن فریک توسط سدیم بورهیدرید در محیط آبی منجر به تشکیل ذرات نانومقیاس آهن با بار صفر شد. بررسی‌های انجام شده با استفاده از دستگاه SEM شکل و مورفولوژی نانوذرات تشکیل شده در حدود ۵۰ تا ۷۰ نانومتر بود و برخی از آن‌ها نیز به صورت خوشه‌ای باهم تجمع یافته بودند. نانوذرات تولید شده قابلیت بالایی در جذب سطحی کادمیوم دارند که با گذشت زمان و افزایش pH این قابلیت به طور معناداری افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت آلاینده به دلیل ظرفیت محدود جاذب کارایی جذب کاهش می‌یابد، به این معنی که با اشباع شدن مکان‌های جذبی امکان جذب بیشتر آلاینده وجود ندارد. در مقابل با افزایش میزان جاذب، بدلیل افزایش تعداد مکان‌های جذبی کارایی جذب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان جاذب و آلاینده امکان برخورد بین کادمیوم با نانوذرات آهن و وقوع واکنش‌های جذبی افزایش می‌یابد. بالا بودن نسبت جاذب به آلاینده سبب برقراری پیوند قوی‌تر شده و در نتیجه رهاسازی آلاینده کمتر صورت می‌گیرد. با این حال، زمانی که تمام سطوح جذبی نانوذرات توسط آلاینده اشغال شد، امکان آزاد شدن آلاینده و استفاده مجدد از این سطوح وجود نداشته و در کل نانوذرات آهن صفر و قابلیت استفاده بیش از یک بار را برای پاکسازی کادمیوم از محیط آبی ندارند. پس می‌توان در کل نتیجه گرفت که جذب

نانوذرات آهن صفر در شرایط اتمسفری و غلظت بالای اکسیژن به شدت اکسید شده و کارایی خود را از دست می‌دهند. این ذرات نسبت به اکسیژن بسیار حساس هستند و حتی اکسیژن محلول در آب نیز می‌تواند به راحتی آن‌ها را اکسید کرده و بازده آن‌ها را کاهش دهد. از آنجایی که کادمیوم بر روی نانوذرات جذب می‌شود و ظرفیت نانوذرات در جذب کادمیوم محدود است، کارایی جذب پس از مرحله اول به شدت کاهش می‌یابد. در مراحل بعدی نه تنها جذبی انجام نمی‌شود، بلکه در برخی موارد مقداری از کادمیوم جذب شده نیز به محیط آزاد می‌شود. مقادیر منفی کارایی جذب می‌تواند به همین دلیل باشد. از این آزمایش نیز می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت نانوذرات آهن صفر برای پاکسازی کادمیوم و کلا فلزاتی که به صورت جذب سطحی از محیط حذف می‌شوند، محدود بوده و قابلیت استفاده بیش از یک بار را ندارد. (Tarekegn et al., 2021) و Xu et al. (2024) گزارش کرده‌اند که اثربخشی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی (nZVI) اغلب تحت تأثیر عوامل محیطی مانند pH و ترکیب رسوبات قرار می‌گیرد که می‌تواند واکنش‌پذیری و پایداری آنها را تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی (nZVI) تمایل به تجمع و رسوب دارند، که کاربرد عملی آنها را در سایت‌های آلوده محدود می‌کند (Tarekegn et al., 2021).

حمیدیان‌فر، نجلاد، ابوالحسنی، محمد هادی، و عطآبادی، میترا (۱۳۹۸). مطالعه اثر استفاده از نانو ذره اکسید آهن در حذف فلز کادمیوم از محیط‌های آبی: یک مطالعه آزمایشگاهی. *مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان*. ۱۸(۱۲)، ۱۲۵۲-۱۲۶۹.

doi:20.1001.1.17353165.1398.18.12.3.1

رحمانی، علیرضا، غفاری، حمیدرضا، صمدی، محمدتقی، و ضرابی، منصور (۱۳۹۰). سنتز نانوذرات آهن و بررسی کارایی آن در حذف آرسنیک از محیط‌های آبی. *آب و فاضلاب*، ۱، ۳۵-۴۱.

عباسی کلو، آیدا، کریمی بارزلی، سایه، اوستان، شاهین، و شهاب آرخازلو، حسین (۱۴۰۲). شاخص‌های آلاینده‌ی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی آبیاری شده با فاضلاب خام (مشگین‌شهر، اردبیل). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۲۸۶-۳۰۶.

doi:10.22098/mmws.2023.13370.1332

عنایت، اکرم، عین‌الهی پیر، فاطمه، پاکزاد توچایی، ساحل، و عرفانی، ملیحه (۱۴۰۳). سنجش و پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در آب چاهک‌های امتداد رودخانه سیستان از نقطه صفر مرزی تا تالاب بین‌المللی هامون. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۵۱-۶۹.

doi:10.22067/jsw.2023.80046.1235

فروتن، عبدالرحیم، رهنمای مقدم، برهان، قدرتی کوزه‌کنان، سعید، و رادمهر، وحید (۱۳۹۰). بررسی مکانیزم حذف آلاینده‌های مختلف توسط نانوذرات آهن صفر ظرفیتی. پنجمین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست. تهران، ایران.

قاضی‌زاده، نرگس، و جعفرزاده، نعمت‌اله (۱۳۸۷). امکان‌سنجی کاربرد نانوفناوری در کاهش آلودگی‌های محیطی با تأکید بر آلودگی خاک. دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست.

تهران، ایران.

ملکی، افشین (۱۳۹۰). بررسی توانایی ژئولیت اصلاح شده با اسید برای جذب کادمیوم در محیط آبی. *مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران*، ۲۱(۸۶): ۸۴-۷۵.

نیکو ثانی گل تپه، س.، صادقی، س.، نورآئین، م.، زواره، س.س. ۱۴۰۲. تأثیر نانوذرات آهن مغناطیسی در توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیوم در یک خاک آلوده. *آب و خاک*، ۳(۳)، ۴۳۱-۴۴۲.

doi:10.22067/jsw.2023.80046.1235

References

Abbasi-Kalo, A., Karimi Barzili, S., Oustan, Sh., & Shahab Arkhazlo, H. (2023). Pollution indices of heavy metals in agricultural soils irrigated with raw sewage (Meshginsahr, Ardabil). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 286-306.

کادمیوم بر روی نانوذرات آهن صفر کاملاً وابسته به سطوح واکنش‌پذیر و غلظت فلزات سنگین اشغال کننده این سطوح است و برای پاک‌سازی هر غلظت از آلاینده موجود در محلول خاک و یا منبع آب یک مقدار معین از نانوذرات آهن صفر کافی است.

سپاسگزاری

در این بخش از همکاری و مساعدت دانشگاه آزاد واحد کرج به‌علت حمایت‌های مالی و معنوی در زمان انجام پروژه تشکر می‌گردد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این تحقیق از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

زهرا غفاری: نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **محمد حسین داودی:** نظارت، راهنمایی؛ **فرشید تاران:** منابع، ویرایش و بازبینی مقاله.

منابع

امیری، محمد جواد (۱۴۰۲). حذف یون‌های فلزی نیکل و مس از محلول‌های آبی با استفاده از هیدروکسی‌آپاتیت اصلاح شده به وسیله نانوذرات آهن صفر ظرفیتی. *محیط زیست و مهندسی آب*، ۹(۲)، ۱۹۵-۲۱۰. doi:10.22034/jewe.2022.335738.1754

پرچهره، مانده، صادق‌زاده، فردین، جلیلی، بهی، بهمنیار، محمد علی، و سامسوری، عبدالوحید (۱۴۰۱). حذف دایرکت بلو ۷۱ و کروم از محلول‌های آبی توسط انواع جاذب‌های آلی دارای پوشش فلزی، زغال زیستی دارای پوشش فلزی و کامپوزیت زغال زیستی-فلز. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴): ۱۳۲-۱۲۲. doi:10.22098/mmws.2022.11696.1158

[In Persian].

doi:10.22098/mmws.2023.13370.1332

Amiri, M.J. (2023). Removal of Cu(II) and Ni(II) Metal Ions from Aqueous Solutions Using Modified Hydroxyapatite by Zero-Valent Iron Nanoparticles. *Environment and Water*

- Engineering*. 9(2), 195-210. [In Persian]. doi:10.22034/jewe.2022.335738.1754
- Boparai, H.K., Joseph, M., & O'Carroll, D.M. (2010). Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles. *Journal of Hazardous Materials*, 1-8. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.11.029
- Cook, S.M. (2009). Assessing the Use and Application of Zero-Valent Iron Nanoparticle Technology for Remediation at Contaminated Sites. Jackson State University.
- Elliott, D.W., & Zhang, W.X. (2001). Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment. *Environmental Science & Technology* 35, 4922-4926. doi:10.1021/es0108584
- Enayat, A., Einollahipeer, F., Pakzad Toocheai, S., & Erfani, M. (2024). Survey and Zoning the concentration of heavy metals in water of wells along the Sistan River from zero point border to Hamoun International wetland. *Water and Soil Management and Modeling*. 4(1), 51-69. [In Persian]. doi:10.22098/mmws.2023.12096.1215
- Fang, Z., Chen, J., Qiu, X., Cheng, W., & Zhu, L. (2011). Effective removal of antibiotic metronidazole from water by nanoscale zero-valent iron particles. *Desalination* 268, 60-67. doi:10.1016/j.desal.2010.09.051
- Foroutan, A., Rahnemay Moghaddam, B., Ghodrati Koozekanan, S., Radmehr, V., & Khodadadi Darban, A. (2012). Investigating the removal mechanism of different pollutants by zero capacity iron nanoparticles. 5th Conference and Exhibition on Environmental Engineering, Tehran. Iran. [In Persian].
- Ghazizadeh, N., & Jafarzadeh, N. (2009). Feasibility of using nanotechnology in reducing environmental pollution with emphasis on soil pollution. 5th Conference and Exhibition on Environmental Engineering, Tehran. Iran. [In Persian].
- Hamidianfar, N., Abolhasani, M.H., & Atabadi, M. (2020). Investigation of the Effect of Using Iron Oxide Nanoparticles in Removing Cadmium from Aqueous Media: A Laboratory Study. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*. 18(12), 1252-1269. [In Persian]. doi:10.1001.1.17353165.1398.18.12.3.1
- Joo, S.H., & I.F. Cheng 2006. Nanotechnology for environmental remediation. *Springer Verlag*.
- Li, X., & W. Zhang (2006). Iron nanoparticles: the core-shell structure and unique properties for Ni (II) sequestration. *Langmuir* 22, 4638-4642. doi:10.1021/la060057k
- Li, X., & Zhang, W. (2007). Sequestration of Metal Cations with Zerovalent Iron Nanoparticles A Study with High Resolution X-ray Photoelectron Spectroscopy (HR-XPS). *The Journal of Physical Chemistry C*. 111, 6939-6947. doi:10.1021/jp0702189
- Maleki, A. (2011). Potential of acid modified zeolite for cadmium adsorption in aqueous environment. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 22 (86): 75-84.
- Norvell, W., Wu, J., Hopkins, D., & Welch, R. (2000). Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2162-2168. doi:10.2136/sssaj2000.6462162x
- Nikkhosani Gol Tapeh, S., Sadeghi, S., Nooraien, M., & Zavareh, S. (2023). The Mutual Effect of Cadmium and Magnetic Iron Nanoparticles in the Distribution of Chemical Forms of Cadmium in a Contaminated Soil. *Journal of water and Soil*. 37 (3), 431-442. [In Persian]. doi:10.22067/jsw.2023.80046.1235
- Parichehreh, M., Sadeghzadeh, F., Jalili, B., Bahmanyar, M.A., & Samsuri, A. (2022). Removal of Direct Blue 71 and chromium from aqueous solutions by metal coating organic adsorbents, metal coating biochar and biochar-metal composite. *Water and Soil Management and Modeling*. 3(4), 122-132. [In Persian]. doi:10.22098/mmws.2022.11696.1158
- Rahmani, A.R., Ghafari, H.R., Samadi, M.T., & Zarabi, M. (2012). Synthesis of zero valent iron nanoparticles (nZVI) and its efficiency in arsenic removal from aqueous solutions. *Journal of Water and Wastewater*, 2(1), 35-41. [In Persian].
- Stępniewska, Z., & Bucior, K. (2001). Chromium contamination of soils, waters, and plants in the vicinity of a tannery waste lagoon. *Environmental Geochemistry and Health* 23, 241-245. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137908
- Sun, Y.P., Li, X., Cao, J., Zhang, W., & Wang, H.P. (2006). Characterization of zero-valent iron nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science* 120, 47-56. doi:10.1021/acsomega.9b01898

- Tarekegn, M.M., Hiruyb, A.M., & Dekebo, A.H. (2021). Nano zero valent iron (nZVI) particles for the removal of heavy metals (Cd²⁺, Cu²⁺ and Pb²⁺) from aqueous solutions. *RSC Advances*, 11(30), 18539-18551. <https://doi.org/10.1039/D1RA01427G>
- Üzüm, Ç., T. Shahwan., AE, Eroglu., I. Lieberwirth., TB, Scott., & Hallam, KR. (2008). Application of zero-valent iron nanoparticles for the removal of aqueous Co²⁺ ions under various experimental conditions. *Chemical Engineering Journal*, 144: 213-220. doi:10.1016/j.cej.2008.01.024
- World Health Organization (WHO). (2008). Guidelines for drinking-water quality [electronic resource]: incorporating World Health Organization, Distribution and Sales Geneva 27 CH-1211 Switzerland.
- Xu, Y., Liu, H., Wen, S., Guo, J., Shi, X., He, Q., Lin, W., Gao, Y., Wang, R., & Xue, W. (2024). High performance self-assembled sulfidized nanoscale zero-valent iron for the immobilization of cadmium in contaminated sediments: Optimization, microbial response, and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 134022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134022>
- Yan, W., Herzing., A.A., Kiely, C.J., & Zhang, W. (2010). Nanoscale zero-valent iron (nZVI): Aspects of the core-shell structure and reactions with inorganic species in water. *Journal of Contaminant Hydrology* 118, 96-104. doi:10.1016/j.jconhyd.2010.09.003
- Zhang, W. (2003). Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research* 5, 323-332. doi:10.1023/A:1025520116015