19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

هم‌دماهای جذب سطحی کلر توسط بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده‌ی شلتوک برنج

مهدی رحیمی[۱*]، محمد بابااکبری ساری[۲]، جعفر صوفیان[۳] ، مهدی تفویضی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان * (rolledmen@gmail.com)
۲- دانشیار،علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان (babaakbari@znu.ac.ir)
۳- دانشجوی دکتری تخصصی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان
۴- فارغ التحصیل مقطع دکتری تخصصی رشته علوم خاک، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه زنجان

چکیده

در سال‌های اخیر، نگرانی‌ها درباره حضور کلر باقی‌مانده و محصولات جانبی آن در منابع آبی افزایش یافته است، زیرا این ترکیبات می‌توانند پیامدهای جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست به همراه داشته باشند. در این پژوهش، کارایی بیوچار حاصل از شلتوک برنج و نمونه‌های اصلاح‌شده آن با KOH و $FeCl_3$ در حذف یون کلر از محلول‌های آبی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بیوچار ساده راندمان حذف قابل‌توجهی داشت (۱۸/۷۵ تا ۵۱/۰۶ درصد) و با افزایش غلظت اولیه کلر، میزان جذب تا رسیدن به حالت اشباع نسبی افزایش یافت. در مقابل، اصلاح با KOH موجب کاهش بازده حذف به محدوده ۲/۸۴ تا ۱۵/۱۴ درصد گردید که ناشی از ماهیت آنیونی کلر و رقابت با سایر یون‌ها بود. همچنین، اصلاح با $FeCl_3$ کمترین بازده حذف را به همراه داشت (۲/۰۷ تا ۳/۴۶ درصد) که دلیل آن آزادسازی کلر در فرآیند اصلاح و محدود شدن برهم‌کنش‌های سطحی بود. در مجموع، یافته‌ها نشان داد که بیوچار ساده در حذف کلر عملکرد بهتری دارد، در حالی‌که اصلاحات شیمیایی نتایج متناقضی ایجاد کردند. این نتایج اهمیت انتخاب دقیق عامل اصلاح‌کننده را در طراحی جاذب‌های زیست‌پایه برای مدیریت پایدار کیفیت آب برجسته ساخته و بر ضرورت انجام تحقیقات بیشتر بر روی بیوچارهای اصلاح‌شده تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی: بیوچار ، کلر ، جذب سطحی ، فرندلیچ ، لانگمویر

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت و فعالیت‌های انسانی منجر به افزایش تولید فاضلاب‌های شهری و صنعتی حاوی آلاینده‌های خطرناک شده است. ورود این ترکیبات به منابع آبی می‌تواند موجب برهم‌خوردن تعادل اکولوژیکی، کاهش اکسیژن محلول و تهدید تنوع زیستی شود (la Cour Jansen et al., 2019). یکی از روش‌های رایج گندزدایی آب، کلرزنی است؛ اما حضور مواد آلی طبیعی (NOM) در آب باعث تولید محصولات جانبی کلردار می‌شود که برخی از آن‌ها سرطان‌زا هستند (Allard et al., 2013; Liu et al., 2012). بر اساس دستورالعمل سازمان بهداشت جهانی، غلظت باقی‌مانده کلر در آب باید بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر باشد (WHO, 2011). با این حال، مقادیر بیش از حد مجاز نه‌تنها کیفیت آب را کاهش می‌دهد، بلکه برای مصارف صنعتی و انسانی نیز مخاطره‌آمیز است (Pickering et al., 2019). در این راستا، استفاده از بیوچار به‌عنوان جاذبی ارزان، زیست‌پایه و زیست‌سازگار، توجه زیادی را در حذف آلاینده‌ها به خود جلب کرده است. ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و حضور گروه‌های عاملی، بیوچار را به گزینه‌ای مؤثر برای جذب یون‌ها در محیط‌های آبی تبدیل کرده است (Lehmann & Joseph, 2024). اصلاح شیمیایی بیوچار با موادی مانند KOH و $FeCl_3$ می‌تواند عملکرد جذب را با بهبود ویژگی‌های سطحی افزایش دهد. برای نمونه، بیوچار مبتنی بر ساقه گندم اصلاح‌شده با $FeCl_3$ توانست ظرفیت جذب نیترات را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Kuang et al., 2023). با وجود پیشرفت‌ها، بیشتر مطالعات پیشین بر حذف فلزات سنگین تمرکز داشته و بررسی جذب آنیون‌هایی مانند کلر، به‌ویژه توسط بیوچار شلتوک برنج و شکل‌های اصلاح‌شده آن، هنوز محدود است. همچنین، استفاده از مدل‌های ایزوترم جذب مانند لانگمویر و فرندلیچ، درک دقیقی از ظرفیت و سازوکار جذب فراهم می‌سازد (Foo & Hameed, 2010). پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد جذب سطحی کلر توسط بیوچار ساده و بیوچار اصلاح‌شده با KOH و $FeCl_3$، و تحلیل داده‌ها با مدل‌های مذکور انجام شده است. نتایج می‌توانند به توسعه سامانه‌های پایدار و کم‌هزینه برای حذف کلر از منابع آبی کمک نمایند. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های برخی مطالعات پیشین نیز هم‌راستاست؛ به‌طور مثال، صیادیان و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که استفاده از بیوچارهای تولیدشده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس در غلظت ۱۶ گرم در لیتر، کارایی قابل‌قبولی در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آلوده داشت. همچنین، قربانی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که بیوچار پوسته شلتوک برنج موجب کاهش معنی‌دار آبشویی نیترات از خاک شد و اثر آن در حضور یا عدم حضور کمپوست پایدار بود. در مطالعه‌ای دیگر، غلامی و رحیمی (۱۳۹۹) بیان کردند که بیوچار تفاله هویج با ساختار متخلخل و ماهیت قلیایی، ظرفیت بالایی در جذب کادمیوم و سرب از خاک‌های اسیدی داشته و می‌تواند به کاهش زیست‌فراهمی این فلزات کمک کند. این نتایج نیز مؤید نقش مؤثر بیوچار در جذب آلاینده‌های معدنی از محیط‌های مختلف است.

مواد و روش‌ها

شلتوک برنج از مزارع شهرستان آمل تهیه شد. پس از شست‌وشو و خشک‌سازی، در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳ ساعت در کوره الکتریکی تحت شرایط بدون هوا پیرولیز شد. بیوچار تولیدشده پس از آسیاب، از الک مش ۳۰ عبور داده شد.

اصلاح بیوچار

در روش KOH، ۲ گرم بیوچار با ۱ گرم KOH مخلوط و تا حد اشباع با آب مقطر خیس شد. سپس نمونه به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و پس از آن به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کربونیزه شد.

در روش $FeCl_3$، ۴ گرم بیوچار در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۱ مولار کلرید آهن ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) مخلوط و پس از تماس اولیه، نمونه به‌مدت ۳ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره قرار گرفت.

آزمایش‌های اولیه برای تعیین مقدار بهینه جاذب و زمان تعادل انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار ۰/۱ گرم بیوچار و زمان تماس ۲ ساعت به‌عنوان شرایط بهینه انتخاب گردید. در آزمایش‌های اصلی، محلول‌های کلر با غلظت اولیه ۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه و در فالکن‌های ۴۰ میلی‌لیتری به‌مدت ۲ ساعت با ۰/۱ گرم جاذب تماس داده شدند. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام شد و میانگین نتایج گزارش گردید.

سنجش کلر و تحلیل داده‌ها

غلظت نهایی کلر به روش تیتراسیون (نقره سنجی) تعیین شد و نتایج به‌صورت درصد حذف بیان گردید.

معادله محاسبه درصد حذف:

(۱)

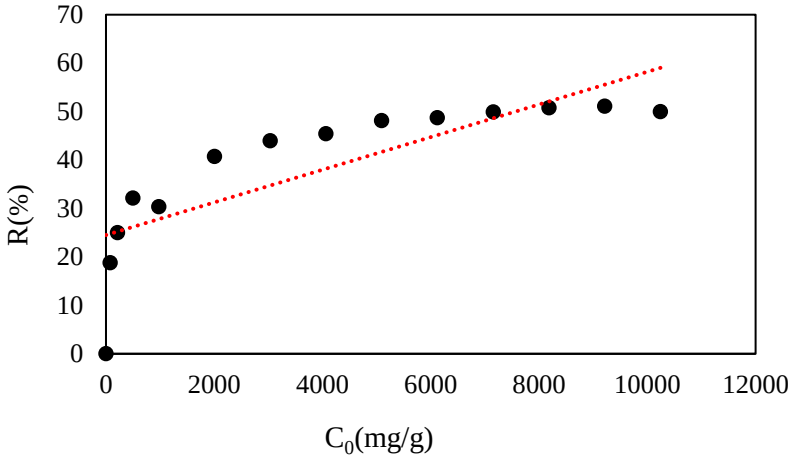
$$\text{Removal } \% = \frac{C0 - Ce}{Ce} \times 100$$

نتایج و بحث

تاثیر بیوچار ساده بر جذب کلر

نتایج حذف کلر توسط بیوچار ساده در شکل ۱ نشان داده شده است.

*غلظت‌های اولیه ۱۵ تا ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نیز اندازه‌گیری شدند، اما به دلیل عدم مشاهده جذب قابل‌ملاحظه، نتایج مربوط به آن‌ها در نمودارها و تحلیل‌ها گزارش نگردید.

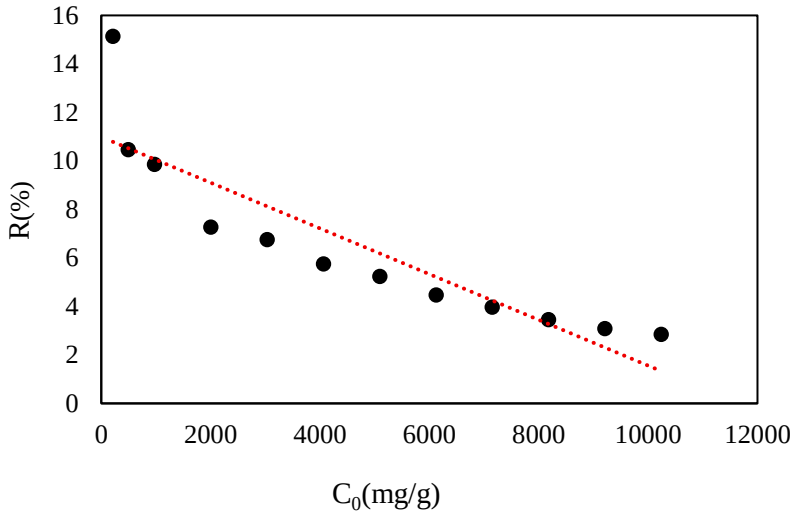


شکل ۱- درصد حذف یون کلر توسط بیوچار ساده در غلظت‌های اولیه مختلف

نتایج حاصل از بررسی درصد حذف یون کلر توسط بیوچار ساده در غلظت‌های اولیه مختلف در شکل ۱ نشان داد که راندمان حذف در محدوده‌ای بین ٪۱۸/۷۵ تا ٪۵۱/۰۶ متغیر بوده است. افزایش غلظت اولیه کلر موجب افزایش نسبی در درصد حذف گردید، به‌طوری‌که در غلظت‌های پایین، کارایی جذب محدودتر بوده اما با افزایش غلظت اولیه، بیوچار توانست یون‌های بیشتری را به سطح خود جذب نماید. این روند افزایشی را می‌توان به افزایش نیروی محرکه غلظتی نسبت داد که انتقال یون‌ها از فاز آبی به سطح جاذب را تسهیل می‌کند. با این حال، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، پس از یک نقطه مشخص، شیب افزایش راندمان حذف کاهش می‌یابد و نمودار به حالت تقریباً پایدار نزدیک می‌شود. این پدیده ناشی از اشباع نسبی سایت‌های فعال بیوچار است؛ به بیان دیگر، با افزایش غلظت اولیه، سطح جاذب در دسترس محدود شده و ظرفیت جذب به سقف خود نزدیک می‌گردد(Dong et al., 2023).

تاثیر بیوچار اصلاح شده با KOH بر جذب کلر

برای بررسی تأثیر اصلاح شیمیایی با هیدروکسید پتاسیم (KOH) بر کارایی جذب یون کلر، درصد حذف این یون در غلظت‌های اولیه مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج در شکل ۲ ارائه شده است.

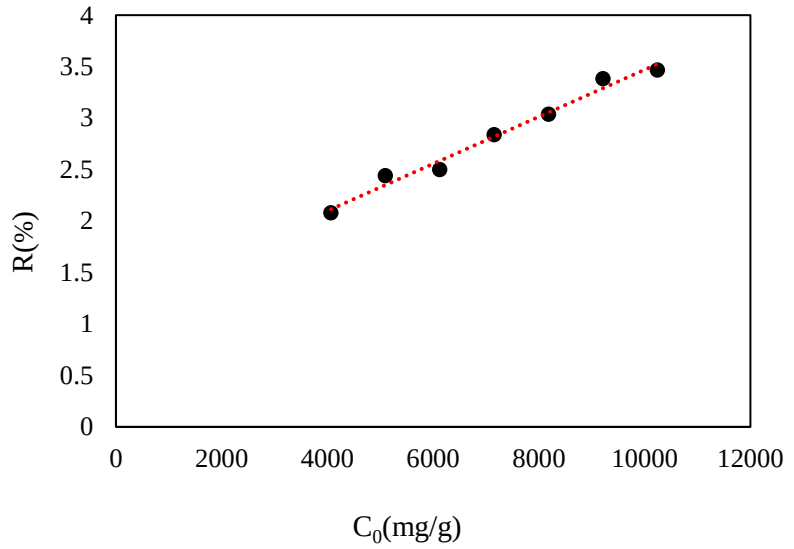


شکل ۲- درصد حذف یون کلر توسط بیوچار اصلاح شده با KOH در غلظت‌های اولیه مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت اولیه بازده حذف از ٪۱۵/۱۴ به ٪۲/۸۴ کاهش یافته است. این روند کاهشی ناشی از اشباع شدن تدریجی سایت‌های فعال سطحی و کاهش نسبت سایت‌های جذب به یون‌های محلول است. هرچند فعال‌سازی با KOH موجب افزایش سطح ویژه و ایجاد ریزحفرات شده، اما ماهیت آنیونی کلر و رقابت یون‌های دیگر (مانند OH) باعث محدود شدن برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و در نتیجه بازده حذف نسبتاً پایین گردیده است(Chen et al., 2011).

تاثیر بیوچار اصلاح شده با $FeCl_3$ بر جذب کلر

در نهایت، به‌منظور مقایسه عملکرد انواع بیوچار، نتایج حاصل از بررسی درصد حذف یون کلر توسط بیوچار شلتوک اصلاح‌شده با $FeCl_3$ ارائه گردید.



شکل ۳- درصد حذف یون کلر توسط بیوچار اصلاح شده با $FeCl_3$ در غلظت‌های اولیه مختلف

نتایج بیانگر آن است که این جاذب تنها توانسته بازدهی محدودی در حذف کلر داشته باشد، به‌طوری‌که راندمان جذب در بازه‌ای بسیار کم و بین ۲/۰۷ تا ۳/۴۶ درصد قرار گرفته است. در غلظت‌های پایین‌تر، حتی به‌دلیل حضور ترکیب$FeCl_3$ ، احتمال آزادسازی یون کلر به محیط وجود داشته و کارایی جذب کاهش یافته است. با این حال، در غلظت‌های بالاتر، بیوچار اصلاح‌شده توانسته بخشی از یون‌ها را جذب کند، هرچند بازده حذف همچنان ناچیز بوده است. این رفتار نشان می‌دهد که

اصلاح با $FeCl_3$ برای حذف آنیون کلر چندان مناسب نبوده و به دلیل افزودن کلر در مرحله‌ی اصلاح، سطح جاذب نه تنها شرایط ایده‌آلی برای برهم‌کنش الکترواستاتیک با کلر ایجاد نکرده، بلکه موجب رقابت یون‌های کلر آزاد شده با یون‌های هدف موجود در محلول نیز گردیده است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که فعال‌سازی با $FeCl_3$ بیشتر برای حذف یون‌های فلزی یا ترکیبات دیگر مناسب است و در زمینه جذب آنیون کلر عملکرد ضعیفی دارد(Dai et al., 2019).

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج جذب سطحی یون کلر توسط بیوچار شلتوک برنج و نمونه‌های اصلاح‌شده آن نشان داد که اصلاحات شیمیایی اثرات متفاوتی بر بازده حذف داشته‌اند. بیوچار ساده توانست درصد حذف قابل‌توجهی از کلر را در غلظت‌های اولیه مختلف نشان دهد و روند صعودی جذب تا رسیدن به حالت اشباع نسبی در آن مشاهده شد. اصلاح با KOH اگرچه موجب افزایش سطح ویژه و توسعه ساختار متخلخل گردید، اما به دلیل ماهیت آنیونی کلر و رقابت با یون‌های دیگر، بازده حذف در مقایسه با بیوچار ساده کاهش یافت. در مقابل، اصلاح با $FeCl_3$ نه تنها بهبود محسوسی در حذف کلر ایجاد نکرد، بلکه به‌واسطه آزادسازی یون کلر از ترکیب اصلاحی، کارایی جذب به میزان ناچیزی محدود گردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب نوع عامل اصلاح‌کننده نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده حذف آلاینده‌ها دارد و در خصوص کلر، استفاده از بیوچار ساده نسبت به اصلاح‌شده با $FeCl_3$ عملکرد مطلوب‌تری نشان می‌دهد، در حالی‌که اصلاح با KOH می‌تواند در شرایط خاص، بسته به نوع آلاینده، مؤثرتر عمل کند. این یافته‌ها اهمیت توجه به ماهیت شیمیایی آلاینده و سازوکار برهم‌کنش آن با سطح جاذب را در طراحی و توسعه بیوچارهای کارآمد برای تصفیه آب آشکار می‌سازد.

با این حال، نتایج نشان داد که کارایی بیوچارهای اصلاح‌شده در حذف کلر چندان موفقیت‌آمیز نبوده و همچنان نیاز به انجام تحقیقات بیشتر برای بهبود روش‌های اصلاح و دستیابی به جاذب‌های مؤثرتر وجود دارد.

فهرست منابع

صیادیان، ک.، معزی، ع.، غلامی، ع.، پناه‌پور، ا.، و محسنی‌فر، ک. (۱۳۹۹). تولید بیوچارهای مختلف و تأثیر آن‌ها در حذف یون‌های کادمیوم، نیکل و سرب از آب آبیاری. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۲(۱۰ پیاپی ۱۰۱)، ۶۳–۵۱.

غلامی، ل.، و رحیمی، ق. (۱۳۹۹). تأثیر بیوچار تفاله هویج بر جذب سطحی کادمیم و سرب در یک خاک اسیدی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۷(۲)، ۲۳–۱.

قربانی، م.، اسدی، ح.، و ابریشم‌کش، س. (۱۳۹۴). تأثیر بیوچار (زغال زیستی) پوسته شلتوک برنج بر آبشویی نیترات در یک خاک رسی. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۲۹(۴ الف)، ۴۳۴–۴۲۷.

Allard, S., Nottle, C. E., Chan, A., Joll, C., & Von Gunten, U. (2013). Ozonation of iodide-containing waters: Selective oxidation of iodide to iodate with simultaneous minimization of bromate and I-THMs. Water Research, 47(6), 1953–1960.

Chen, B., Chen, Z., & Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource technology*, *102*(2), 716-723.

Dai, S. J., Zhao, Y. C., Niu, D. J., Li, Q., & Chen, Y. (2019). Preparation and reactivation of magnetic biochar by molten salt method: relevant performance for chlorine-containing pesticides abatement. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *69*(1), 58-70.

Dong, M., He, L., Jiang, M., Zhu, Y., Wang, J., Gustave, W., ... & Wang, Z. (2023). Biochar for the removal of emerging pollutants from aquatic systems: a review. *International journal of environmental research and public health*, *20*(3), 1679.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, 156(1), 2–10.

Geneva, S. (2011). Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization: Geneva, Switzerland.

Kuang, P., Cui, Y., Zhang, Z., Ma, K., Zhang, W., Zhao, K., & Zhang, X. (2023). Increasing surface functionalities of $FeCl_3$-modified reed waste biochar for enhanced nitrate adsorption property. Processes, 11(6), 1740.

la Cour Jansen, J., Henze, M., Harremoës, P., & Arvin, E. (2019). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes. Polyteknisk Forlag.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2024). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. Taylor & Francis.

Liu, X., Chen, Z., Wang, L., & Shen, J. (2012). Effects of metal ions on THMs and HAAs formation during tannic acid chlorination. Chemical Engineering Journal, 211, 179–185.

Pickering, A. J., Crider, Y., Sultana, S., Swarthout, J., Goddard, F. G. B., Islam, S. A., Sen, S., Ayyagari, R., & Luby, S. P. (2019). Effect of in-line drinking water chlorination at the point of collection on child diarrhea in urban Bangladesh: A double-blind, cluster-randomised controlled trial. The Lancet Global Health, 7, e1247–e1256.

Zhao, Y., Yang, H. W., Liu, S. T., Tang, S., Wang, X. M., & Xie, Y. F. (2016). Effects of metal ions on disinfection byproduct formation during chlorination of natural organic matter and surrogates. Chemosphere, 144, 1074–1082.

Adsorption Isotherms of Chloride by Raw and Modified Rice Husk Biochar

Mehdi Rahimi[1]*, Mohammad Babaakbari Sari[2]
[1] M.Sc. Student in Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
(rolledmen@gmail.com)
[2] Associate Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
(babaakbari@znu.ac.ir)

Abstract

In recent years, concerns about the presence of residual chlorine and its by-products in aquatic resources have increased, as these compounds can exert adverse effects on human health and the environment. In this study, the adsorption performance of rice husk-derived biochar and its chemically modified forms with KOH and $FeCl_3$ for chloride removal from aqueous solutions was investigated. The raw biochar exhibited a notable removal efficiency (18.75–51.06%), with performance improving as the initial chloride concentration increased until approaching saturation. In contrast, KOH-modified biochar showed a reduced removal efficiency (2.84–15.14%), attributed to the anionic nature of chloride and competition with other ions. Moreover, $FeCl_3$-modified biochar demonstrated the lowest performance (2.07–3.46%), mainly due to chloride release during the modification process, which limited effective surface interactions. Overall, the results indicated that raw biochar outperformed the chemically modified forms in chloride removal, while chemical modifications produced inconsistent effects. These findings highlight the importance of selecting appropriate modifying agents in designing bio-based adsorbents for sustainable water quality management..

Keywords: (Biochar, Chloride, Adsorption, Freundlich, Langmuir)