

تاثیر بیوچار اصلاح شده بر سینتیک واجذب کادمیم در خاک آهکی

محدثه صحت منش رئیسی

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مجید فکری

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

کادمیم به عنوان یکی از مضرترین فلزات سنگین برای سلامت انسان شناخته می شود و در بالاترین میزان در خاک تجمع پیدا می کند. اثر بیوچار اصلاح شده بر سینتیک واجذب کادمیم در یک خاک آلوده آهکی در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان بررسی شد. به همین منظور از بیوچار اصلاح شده در سه سطح (۱، ۲ و ۳ درصد وزنی) استفاده شد که به خاک آلوده آهکی با سطح ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم افزوده گردید. نمونه برداری از خاک های تیمار شده، ۳۰ روز بعد از آلوده شدن خاک ها با کادمیم، انجام شد. در دوره های زمانی مختلف از ۱۵ تا ۲۸۸۰ دقیقه به وسیله EDTA عصاره گیری شدند و غلظت کادمیم موجود در نمونه ها تعیین گردید. نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار اصلاح شده باعث کاهش واجذب کادمیم نسبت به تیمار شاهد شد، کمترین میزان واجذب کادمیم در خاک، در سطح ۳ درصد وزنی بیوچار اصلاح شده رخ داد. براساس نتایج حاصل از آزمایش، واجذب کادمیم در تمامی تیمارها در زمان های اولیه بیشترین مقدار بود و با گذشت زمان کاهش یافت. براساس ضریب تبیین و خطای استاندارد معادله تابع توانی به عنوان بهترین معادله پیش بینی کننده روند سینتیک واجذب کادمیم در خاک مورد مطالعه می باشد.

واژگان کلیدی: بیوچار اصلاح شده، سینتیک، کادمیم، واجذب

مقدمه

کادمیم به عنوان یکی از سمی ترین فلزات در محیط زیست شناخته شده و با حلالیت و تحرک بالا (Pagotto, C et al., ۲۰۰۱)، می تواند به راحتی از طریق گیاهان جذب و وارد زنجیره غذایی شود و صدمات غیرقابل برگشتی برای محیط زیست ایجاد کند (Jia, L et al., ۲۰۱۰). پالایش عناصر سنگین به دلیل ویژگی های خاص آن ها، به مراتب دشوارتر و هزینه برتر از آلاینده های آلی است که می توانند در محیط خاک تجزیه شوند. بنابراین، نیاز به تحقیق و بررسی روش های اقتصادی تر برای پاک سازی خاک با حداقل اثرات زیست محیطی بر اکوسیستم خاک احساس می شود. یکی از روش های مؤثر در این زمینه، تثبیت است که می تواند میزان حرکت و دسترسی بالای عناصر سنگین به موجودات زنده و گیاهان را کاهش دهد (Saffari et al., ۲۰۱۵).

تثبیت عناصر سنگین در خاک های آلوده، تأثیری بر میزان کلی آن عنصر نخواهد داشت، بلکه قادر است تغییرات معناداری در بخش های متحرک و قابل دسترس آن عنصر ایجاد کند. بررسی این تغییرات می تواند از طریق روش های مختلفی صورت گیرد، از جمله آتشویی (Shi & kan, ۲۰۰۹)، واجدبی (Saffari et al., ۲۰۱۶)، تعیین اشکال شیمیایی عنصر (Saffari et al., ۲۰۱۶)، مقدار جذب عنصر توسط گیاهان (Saffari et al., ۲۰۱۸)، میکروارگانیسیم ها و یا شناسایی تغییرات در فعالیت آنزیمی به عنوان شاخص بیوشیمیایی سمیت خاک (Yang et al., ۲۰۱۶). تثبیت عناصر سنگین به وسیله به سازهای مختلف می تواند در نتیجه فرایندهای گوناگونی نظیر جذب، تشکیل کمپلکس، رسوب یا رسوب مجدد انجام شود (Kumpiene et al., ۲۰۰۸).

سطوح بالای فلزات سنگین در گیاهان می تواند سمی باشد و با افزایش غلظت این فلزات در محیط، یون های آنها از ریشه ها به قسمت های هوایی منتقل می شوند. این فرآیند به کاهش رشد و عملکرد گیاه می انجامد (Jing, He, & Yang, ۲۰۰۷). مقادیر بالای فلزات با پتانسیل مسمومیت در گونه های گیاهی حساس می تواند تأثیرات منفی زیادی بر ویژگی های مورفولوژیکی و ظاهری آنها داشته باشد. این تأثیرات شامل کاهش زیست توده، جلوگیری از جوانه زنی، ایجاد کلروز و نکروز در برگ ها، تغییر رنگ ریشه، چوبی شدن ریشه (Islam, E et al., ۲۰۰۷) و کاهش حجم ریشه است (Menon, M et al., ۲۰۰۷).

علاوه بر این، این فلزات بر بسیاری از فعالیت های فیزیولوژیکی گیاه نیز تأثیر می گذارند، از جمله فرایندهای فتوسنتز، تنفس، جذب مواد مغذی، ساختار غشای سلول و بیان ژن. این مسائل می توانند به طور کلی سلامت و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار دهند (Majer, B.J et al., ۲۰۰۲). گیاه پالایی عمدتاً به حذف فلزات سنگین از خاک یا تثبیت آن ها در خاک با استفاده از گیاهان سبز اشاره دارد. این فرایندها به ترتیب به عنوان استخراج گیاهی و تثبیت گیاهی شناخته می شوند (Hou et al., ۲۰۲۰). گیاهان قادرند مواد آلی و مغذی را جذب و تجزیه کنند و همچنین فلزات سنگین را به خود جذب نمایند. بنابراین، از این گیاهان می توان در کنترل و بازیابی محیط های آلوده استفاده کرد (Herlina et al., ۲۰۲۰). توانایی تجمع فلزات در گیاهان بین گونه های مختلف متفاوت است و به مورفولوژی و رشد آن ها وابسته است (Schück et al., ۲۰۲۰). در سال های اخیر، گیاهانی که به فلزات سنگین مقاوم هستند و دارای زیست توده بالا و توانایی جذب و تجمع مقادیر بیشتری از آلاینده های فلزی در مقایسه با سایر گیاهان (به جز گیاهان بیش اندوز) هستند، مورد توجه محققان قرار گرفته اند. از جمله این گیاهان می توان به ذرت، برنج، آفتابگردان و خردل اشاره کرد که به نتایج قابل توجهی نیز در این زمینه دست یافته اند (Peer, W.A et al., ۲۰۰۶). استفاده از به سازهای ارزان قیمت و با راندمان بالا برای تثبیت عناصر سنگین، یکی از اهداف کلیدی پژوهشگران در این حوزه است. در سال های اخیر، بهره گیری از ضایعات کشاورزی مانند کربن فعال (Foo and Hameed, ۲۰۰۹) و بیوجار (Saffari et al., ۲۰۱۸; Saffari et al., ۲۰۱۶). به عنوان به سازهای مؤثر در حذف و تثبیت عناصر سنگین در محیط های

آبی و خاکی در حال افزایش است. این روند به ما این امکان را می‌دهد که تهدیدهای زیست‌محیطی ناشی از ضایعات کشاورزی را به فرصت‌هایی جهت حل این چالش‌ها تبدیل کنیم. بیوجار، به عنوان یک ماده کربنی و متخلخل با ویژگی‌های منحصر به فرد، می‌تواند بهبود حاصلخیزی خاک، تثبیت آلاینده‌ها و افزایش نگهداری کربن در خاک را به همراه داشته باشد، که این موضوع باعث شده تحقیقات گسترده‌ای در زمینه محیط زیست خاک بر روی آن متمرکز شود (Sohi et al., ۲۰۱۰).

بیوجار به دلیل ویژگی‌هایی چون سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی مناسب و ترکیب شیمیایی خاص، به عنوان یک راهکار اقتصادی برای حذف آلاینده‌های آلی و غیرآلی در محیط زیست مطرح شده است (Ahmad et al., ۲۰۱۴). بیوجار حاوی مقدار زیادی مواد آلی و عناصر کربن است که می‌تواند به طور موثری انتشار CO_2 ، CH_4 ، NO_x و دیگر گازهای گلخانه‌ای را به جو کاهش دهد (Das, Ghosh, & Avashte, ۲۰۲۳). کارایی این ماده در تثبیت عناصر سنگین در خاک، تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر نوع ماده اولیه، زمان تولید، ویژگی‌های فیزیکی، دمای احتراق و حتی کانی‌شناسی خاک، نتایج متفاوتی را به همراه داشته است. برخی تحقیقات نشان می‌دهند که بیوجار در محیط‌های آلودگی شدید، کارایی چندانی ندارد و برای بهبود عملکرد آن نیاز به بهینه‌سازی و استفاده از بیوجارهای اصلاح شده احساس می‌شود (Sohi et al., ۲۰۱۰).

تیمار قلیایی بیوجار، گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن، حجم منافذ و مساحت سطح بیوجار اصلاح‌شده نهایی را بهبود می‌بخشد. KOH و NaOH معمول‌ترین معرف‌های فعال‌کننده قلیایی هستند. بیوجار اصلاح‌شده با KOH به عنوان یک ماده جذب اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست برای حذف M.H ها در فاضلاب در نظر گرفته می‌شود (Liang et al., ۲۰۱۹).

روش تحقیق

تهیه نمونه خاک و آنالیز آزمایشگاهی

برای انجام این پژوهش خاک مورد مطالعه از مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان به صورت تصادفی نمونه برداری شد. پس از هوا خشک شدن و کوبیدن خاک و عبور نمونه‌ها از الک ۲ میلی متری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, ۱۹۶۲)، pH خاک در نمونه گل اشباع (Thomas, ۱۹۹۶)، میزان هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (Rhoades et al., ۱۹۹۶)، میزان ماده آلی به روش اکسیداسیون (Walkley and Black, ۱۹۳۴)، فسفر قابل استفاده با عصاره گیری به روش اولسن (Olsen et al., ۱۹۵۴)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (Nelson, ۱۹۸۲)، غلظت کادمیم با عصاره‌گیری با DTPA به وسیله دستگاه جذب اتمی (Lindsay and Norvell, ۱۹۷۸)، پتاسیم قابل استفاده از طریق عصاره‌گیری با روش استات آمونیوم (Kundsen et al., ۱۹۸۲) اندازه گیری شد جدول (۱).

تهیه بیوجار

جهت تهیه بیوجارها از بقایای سیب زمینی (ساقه و برگ) در شهرستان جیرفت واقع در استان کرمان استفاده شد. بقایا پس از جمع آوری، هوا خشک و آسیاب شده و پس از آن در ورقه‌های آلومینیومی بسته بندی شدند تا فرایند اکسیژن رسانی محدود شود. سپس به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سلیسیوس در داخل کوره قرار داده شدند تا زغالی که به آن بیوجار می‌گویند تولید شود.

تهیه بیوجار اصلاح شده

برای تهیه بیوجار اصلاح شده با KOH یک گرم بیوجار به ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شده و سپس ۱۰ گرم KOH به آن اضافه شد. مخلوط در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت هم زده شد. سرانجام با استفاده از سانتریفیوژ فیلتر شد و چندین بار با آب مقطر شسته شد تا باز اضافی را حذف کنیم. پودر حاصل در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس برخی از ویژگی‌های شیمیایی مانند pH، هدایت قابلیت الکتریکی مطابق با روش‌هایی که در قبل گفته شد اندازه گیری شدند جدول (۲). جهت انجام آزمایش، شش کیلوگرم خاک را درون گلدان‌هایی ریخته سپس کادمیم با سطح ۲۰۰ میلی گرم بر کیلو گرم از نمک نترات کادمیم به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً مخلوط شد و سپس در شرایط رطوبت مزرعه‌ای در دمای 25 ± 1 درجه سلیسیوس در گلخانه

خوابانیده شد. پس از ۳ ماه خوابانیدن بیوچار اصلاح شده در سه سطح (۱، ۲، ۳ درصد وزنی) به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً مخلوط شد و سپس در شرایط مانند قبل (رطوبت مزرعه‌ای در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس) به مدت ۱ ماه نگهداری گردید. در فاصله زمانی یک ماهه، جهت مطالعات سینتیکی نمونه‌های ۵ گرمی خاک در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و سپس ۲۵ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر EDTA ۰/۰۱ مولار (Dang et al., ۱۹۹۴) به نمونه‌ها افزوده و در دستگاه تکان دهنده به صورت جداگانه و برای دوره‌های زمانی مختلف (۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰، ۲۸۸۰ دقیقه) با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه تکان داده شد. پس از اتمام هر زمان تکان دادن، لوله‌ها به مدت ۵ دقیقه در دستگاه گریز از مرکز قرار داده شد و سپس محلول زلال رویی از کاغذ صافی عبور و سپس غلظت کادمیم، عصاره‌گیری شده توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، مرتبه سوم، الویچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک جهت توصیف سینتیکی واجذب عناصر ذکر شده، مورد استفاده قرار گرفت معادلاتی که دارای بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطا استاندارد هستند به عنوان بهترین معادلات پیش‌بینی کننده سینتیک واجذب کادمیم در خاک انتخاب گردید سپس، میانگین این ضرایب بین تیمارهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت جدول... پس از به دست آوردن داده‌های حاصل از تجزیه آزمایشگاهی، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و Excel تجزیه و تحلیل شد.

خطای استاندارد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SE = [\sum(q-q')^2 / (N-2)]^{1/2} \quad (1)$$

q و q' به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده کادمیم در خاک و در زمان t و N تعداد اندازه‌گیری شده برای هر نمونه می‌باشد.

یافته‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوچار اصلاح شده

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول (۱) و همچنین برخی ویژگی‌های بیوچار اصلاح شده در جدول (۲) گزارش شده است.

خاک مورد نظر دارای بافت سبکی بود و به طور عمده آهکی بود و میزان ماده آلی آن پایین بود که این ویژگی‌ها معمولاً در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک مشاهده می‌شود.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

| مقدار | واحد | خصوصیات |
|------------|------------------------|-------------|
| ۶/۸ | - | pH |
| ۳/۳ | (dS m ⁻¹) | EC |
| sandy loam | | بافت خاک |
| ۱۱/۹ | % | رس |
| ۵۴/۹ | % | شن |
| ۳۳/۲ | % | سیلت |
| ۰/۶۶ | % | ماده آلی |
| مقدار | واحد | خصوصیات |
| ناچیز | (mg kg ⁻¹) | کادمیم |
| ۳۶۰ | (mg kg ⁻¹) | پتاسیم |
| ۱۳/۵ | % | رطوبت اشباع |

| | | |
|----|------------------------|--------------------|
| ۲۵ | (mg kg ⁻¹) | کربنات کلسیم معادل |
|----|------------------------|--------------------|

جدول ۲ ویژگی های بیوجار اصلاح شده

| مقدار | واحد | خصوصیات |
|-------|------------------------|------------------|
| ۹/۲ | - | pH |
| ۳ | - | EC |
| ۱/۶ | % | کربن آلی (محلول) |
| ناچیز | (mg kg ⁻¹) | کادمیم |

فرم خطی معادلات سینتیکی

فرم خطی معادلات سینتیکی مورد استفاده در جدول (۳) گزارش شده است.

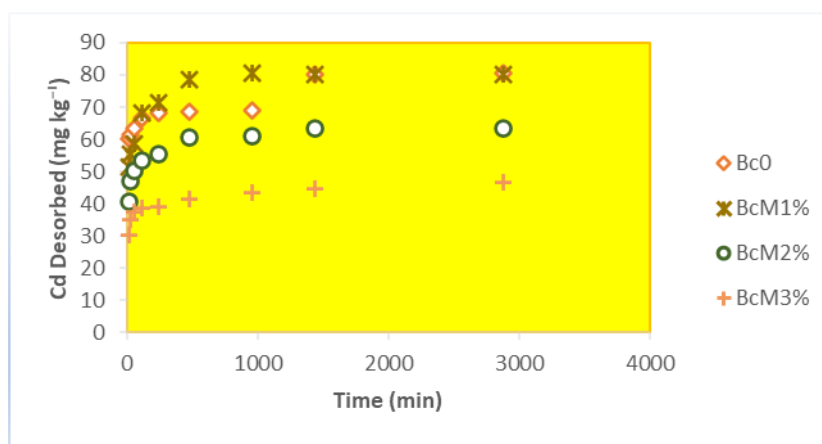
جدول ۳ معادلات سینتیکی

| معادله | مدل سینتیکی |
|--|-------------------|
| $q_t = q_0 - k_0 t$ | مرتبه صفر |
| $\ln q_t = \ln q_0 - k_1 t$ | مرتبه اول |
| $\frac{1}{q_t} = \frac{1}{q_0} - k_2 t$ | مرتبه دوم |
| $\frac{1}{q_{t^2}} = \frac{1}{q_{0^2}} - k_3 t$ | مرتبه سوم |
| $q_t = q_0 - k_p t^{0.5}$ | پخشیدگی پارابولیک |
| $q_t = 1/\beta_s \ln \alpha_s \beta_s + 1/\beta_s \ln t$ | الوویج ساده شده |
| $\ln q_t = \ln \alpha + b \ln t$ | تابع توانی |

q_0 و q_t به ترتیب بیانگر مقدار کادمیم آزاد شده در زمان $t=0$ و در زمان t (mg kg^{-1}) و زمان t (h)، k ثابت سرعت مدل مرتبه صفر ($\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)، k_1 ثابت سرعت مدل مرتبه اول (h^{-1})، k_2 ثابت سرعت مدل مرتبه دوم [$(\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1})^{-1}$]، k_r ثابت سرعت مدل مرتبه سوم [$(\text{mg kg}^{-1})^{-2} \text{h}^{-2}$] (Dang et al., ۱۹۹۴)، k_p ثابت سرعت پخشیدگی [$(\text{mg kg}^{-1})^{1/2}$]، و در معادله تابع توانی به ترتیب ثابت رهاسازی کادمیم اولیه ($\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$) و ضریب رهاسازی کادمیم [$(\text{mg kg}^{-1})^{-1}$]، α_s و β_s در معادله الویج ساده شده به ترتیب ثابت رهاسازی کادمیم اولیه ($\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$) و ثابت رهاسازی کادمیم [$(\text{mg kg}^{-1})^{-1}$] می باشند (Khater & Zaghoul., ۲۰۰۲; Chien & Clayton ۱۹۸۰).

سینتیک واجذب کادمیم در خاک

در شکل (۱) اثر افزودن بیوپار اصلاح شده به خاک بر واجذب کادمیم در زمان های مختلف عصاره گیری نسبت به سطح شاهد نشان داده شده است. تغییرات بوجود آمده از اثر دوره های زمانی مختلف (۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰، ۲۸۸۰ دقیقه) بر واجذب کادمیم در خاک های تیمار شده، ۳۰ روز بعد از خوابانیدن می باشد.



شکل ۱ تغییرات زمانی واجذب کادمیم از خاک تیمار شده با بیوپار اصلاح شده

در نمودار مقدار کادمیم واجذب شده به وسیله عصاره گیر در خاک مورد مطالعه، با گذشت زمان (۱۵ تا ۲۸۸۰ دقیقه) به صورت تجمعی افزایش داشت. سرعت واجذب در ابتدا و در زمان های اولیه (۲ ساعت اولیه) سریع بوده و سپس با گذشت زمان واجذب با سرعت کمتری (۸ ساعت) و در نهایت رسیدن به تعادل در نمونه های تیمار شده و نمونه شاهد مشاهده گردید.

مقایسه معادلات سینتیک واجذب کادمیم

میانگین مقادیر ضریب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) حاصل از برازش داده های واجذب کادمیم با معادلات سینتیک برای خاک تحت تاثیر تیمارهای اعمال شده در جدول (۴) نشان داده شده است. تعیین بهترین معادله سینتیک معمولاً بر اساس ضریب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) صورت می گیرد، به عبارت دیگر معادلاتی که ضریب تبیین بالا و خطای استاندارد کم داشته باشند به عنوان معادلاتی که سرعت واجذب کادمیم را بهتر توصیف می کنند، انتخاب می شود. نتایج بدست آمده از این معادلات برای خاک تحت تاثیر تیمار بیوپار اصلاح شده نشان می دهد که معادلات سینتیک مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، و مرتبه سوم به دلیل پایین بودن مقادیر ضریب تبیین قادر به پیش بینی قابل قبولی از واجذب کادمیم در نمونه های خاک نمی باشد. برازش داده های واجذب کادمیم از خاک ها با

معادله پخشیدگی پارابولیکی نشان می‌دهد که به دلیل ضریب تبیین پایین و خطای استاندارد برآورد نسبتاً بالا، این معادله نمی‌تواند معادله مناسبی برای توصیف واجذب کادمیم از خاک‌های مورد مطالعه باشد، بر اساس مقادیر بدست آمده از ضریب تبیین و خطای استاندارد برآورد، معادله تابع توانی به عنوان بهترین معادله سینتیک واجذب کادمیم معرفی شد، جدول (۴). هرچند که معادله الوویچ ساده دارای ضریب تبیین تقریباً مشابه با تابع توانی می‌باشد اما بدلیل خطای استاندارد برآورد بالا نتوانست به عنوان معادله مناسب جهت بررسی سینتیک واجذب کادمیم استفاده شود.

جدول ۴ دامنه تغییرات و میانگین ضریب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) برای فرم خطی معادلات سینتیک

| مدل خطی سینتیک | دامنه تغییرات R^2 | میانگین R^2 | دامنه تغییرات SE | میانگین SE |
|-------------------|---------------------|---------------|------------------|------------|
| مرتبه صفر | ۰/۳-۰/۷ | ۰/۴ | ۳/۳-۷/۶ | ۵/۸ |
| مرتبه اول | ۰/۳-۰/۷ | ۰/۴ | ۰/۳-۱/۷ | ۰/۹ |
| مرتبه دوم | ۰/۳-۰/۶ | ۰/۳ | ۰/۴-۰/۹ | ۰/۶ |
| مرتبه سوم | ۰/۳-۰/۷ | ۰/۴ | ۰/۲-۰/۶ | ۰/۴ |
| پخشیدگی پارابولیک | ۰/۵-۰/۸ | ۰/۶ | ۱/۲-۵/۸ | ۳/۶ |
| الوویچ ساده شده | ۰/۸-۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۸-۴/۳ | ۲/۷ |
| تابع توانی | ۰/۸-۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۲-۰/۶ | ۰/۳ |

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهشی با عنوان ترکیبات و مکانیسم‌های اجزا در بیوچار اصلاح‌شده جهت جذب کادمیم در محلول آبی دریافتند که با افزایش غلظت اولیه کادمیم، میزان جذب توسط بیوچار افزایش می‌یابد (Zhou et al., ۲۰۱۸; Xue et al., ۲۰۱۹). در مقایسه با بیوچار اصلی، مقدار جذب کادمیم بر روی بیوچار اصلاح‌شده به درجات مختلفی افزایش یافته است (Li et al., ۲۰۲۰; Kołodnyńska et al., ۲۰۱۲). مقدار جذب بیوچار به کادمیم با افزایش pH به تدریج افزایش می‌یابد (Zhou et al., ۲۰۱۸; Li et al., ۲۰۱۷; Khan et al., ۲۰۲۰). بیوچار اصلاح‌شده با قلیا به دلیل توانایی جذب بالاتر آن نسبت به یون‌های فلزی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. تحقیقات مرتبط نشان داده است که یک بیوچار اصلاح‌شده با قلیا حدود ۶ برابر ظرفیت جذب بیشتری نسبت به بیوچار اصلاح‌نشده دارد. بررسی مقدار کادمیم واجذب شده با عصاره‌گیر EDTA در زمان‌های مختلف نشان داد که مقدار واجذب کادمیم در خاک‌های تیمار شده با مواد آلی (بیوچار اصلاح‌شده) کاهش یافت. با افزایش سطح (۳ درصد وزنی) در تیمار بیوچار اصلاح‌شده مقدار واجذب کادمیم کاهش بیشتری را نشان داد. بررسی برازش داده‌های واجذب کادمیم از خاک مورد مطالعه با معادلات مختلف سینتیک نشان داد که داده‌های واجذب کادمیم، برازش خوبی با معادله تابع توانی داشت. در این مطالعه می‌توان گفت که معادله تابع توانی به عنوان بهترین معادله توصیف کننده واجذب کادمیم در نمونه‌های خاک معرفی شود. در مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود آزمایش در حضور گیاه انجام شود، همچنین از درصدهای وزنی مختلف و اصلاح کننده‌های دیگر استفاده شود.

منابع

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., . . . Ok, Y. S. (۲۰۱۴). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, ۱۹-۳۳.
- Bouyoucos, G. J. (۱۹۶۲). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils ^۱. *Agronomy journal*, ۵۴(۵), ۴۶۴-۴۶۵.

- Chien, S., Clayton, W., & McClellan, G. (۱۹۸۰). Kinetics of dissolution of phosphate rocks in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(۲), ۲۶۰-۲۶۴.
- Dang, Y., Dalal, R., Edwards, D., & Tiller, K. (۱۹۹۴). Kinetics of zinc desorption from Vertisols. *Soil Science Society of America Journal*, 58(۵), ۱۳۹۲-۱۳۹۹.
- Das, S. K., Ghosh, G. K., & Avasthe, R. (۲۰۲۳). Biochar application for environmental management and toxic pollutant remediation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, ۱۳(۱), ۵۵۵-۵۶۶.
- Foo, K., & Hameed, B. (۲۰۰۹). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of hazardous materials*, 171(۱-۳), ۵۴-۶۰.
- Herlina, L., Widianarko, B., & Sunoko, H. (۲۰۲۰). Phytoremediation potential of Cordyline fruticosa for lead contaminated soil. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(۱), ۴۲-۴۹.
- Hou, X., Teng, W., Hu, Y., Yang, Z., Li, C., Scullion, J., . . . Zheng, R. (۲۰۲۰). Potential phytoremediation of soil cadmium and zinc by diverse ornamental and energy grasses. *BioResources*, 15(۱), ۶۱۶.
- Islam, E., Yang, X., Li, T., Liu, D., Jin, X., & Meng, F. (۲۰۰۷). Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of Elsholtzia argyi. *Journal of hazardous materials*, 147(۳), ۸۰۶-۸۱۶.
- Jia, L., Wang, W., Li, Y., & Yang, L. (۲۰۱۰). Heavy metals in soil and crops of an intensively farmed area: a case study in Yucheng City, Shandong Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(۲), ۳۹۵-۴۱۲.
- Jing, Y.-d., He, Z.-l., & Yang, X.-e. (۲۰۰۷). Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University Science B*, 8(۳), ۱۹۲-۲۰۷.
- Khan, Z. H., Gao, M., Qiu, W., Islam, M. S., & Song, Z. (۲۰۲۰). Mechanisms for cadmium adsorption by magnetic biochar composites in an aqueous solution. *Chemosphere*, 246, ۱۲۵۷۰۱.
- Khater, A., & Zaghloul, A. (۲۰۰۲). Copper and zinc desorption kinetics from soil: effects of pH.
- Knudsen, D., Peterson, G., & Pratt, P. (۱۹۸۲). Lithium, sodium, and potassium. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, ۲۲۵-۲۴۶.
- Kołodnyńska, D., Wnętrzak, R., Leahy, J., Hayes, M., Kwapiński, W., & Hubicki, Z. (۲۰۱۲). Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. *Chemical Engineering Journal*, 197, ۲۹۵-۳۰۵.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A., & Maurice, C. (۲۰۰۸). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste management*, 28(۱), ۲۱۵-۲۲۵.
- Li, B., Yang, L., Wang, C.-q., Zhang, Q.-p., Liu, Q.-c., Li, Y.-d., & Xiao, R. (۲۰۱۷). Adsorption of Cd (II) from aqueous solutions by rape straw biochar derived from different modification processes. *Chemosphere*, 175, ۳۳۲-۳۴۰.
- Li, X., Wang, C., Zhang, J., Liu, J., Liu, B., & Chen, G. (۲۰۲۰). Preparation and application of magnetic biochar in water treatment: A critical review. *Science of the total environment*, 711, ۱۳۴۸۴۷.
- Liang, J., Fang, Y., Luo, Y., Zeng, G., Deng, J., Tan, X., . . . Feng, C. (۲۰۱۹). Magnetic nanoferromanganese oxides modified biochar derived from pine sawdust for adsorption of tetracycline hydrochloride. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, ۵۸۹۲-۵۹۰۳.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (۱۹۷۸). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(۳), ۴۲۱-۴۲۸.
- Majer, B. J., Tschierko, D., Paschke, A., Wennrich, R., Kundi, M., Kandeler, E., & Knasmüller, S. (۲۰۰۲). Effects of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in Tradescantia and on microbial enzyme activities: a comparative investigation. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 515(۱-۲), ۱۱۱-۱۲۴.
- Menon, M., Hermle, S., Günthardt-Goerg, M. S., & Schulin, R. (۲۰۰۷). Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem. *Plant and Soil*, 297, ۱۷۱-۱۸۳.
- Nelson, R. (۱۹۸۲). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, ۱۸۱-۱۹۷.
- Olsen, S. R. (۱۹۵۴). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*: US Department of Agriculture.
- Pagotto, C., Remy, N., Legret, M., & Le Cloirec, P. (۲۰۰۱). Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway. *Environmental technology*, 22(۳), ۳۰۷-۳۱۹.
- Peer, W. A., Baxter, I. R., Richards, E. L., Freeman, J. L., & Murphy, A. S. (۲۰۰۶). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. *Molecular biology of metal homeostasis and detoxification: from microbes to man*, ۲۹۹-۳۴۰.
- Rhoades, J. (۱۹۹۶). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, ۴۱۷-۴۳۵.
- Saffari, M. (۲۰۱۸). Chemical stabilization of some heavy metals in an artificially multi-elements contaminated soil, using rice husk biochar and coal fly ash. *Pollution*, 4(۴), ۵۴۷-۵۶۲.

- Saffari, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J., & Ghasemi-Fasaei, R. (۲۰۱۵). Stabilization of nickel in a contaminated calcareous soil amended with low-cost amendments. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(۴), ۸۹۶-۹۱۳.
- Saffari, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J., & Ghasemi-Fasaei, R. (۲۰۱۶). Stabilization of lead as affected by various amendments and incubation time in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(۳), ۳۱۷-۳۳۷.
- Schück, M., & Greger, M. (۲۰۲۰). Plant traits related to the heavy metal removal capacities of wetland plants. *International journal of phytoremediation*, 22(۴), ۴۲۷-۴۳۰.
- Shi, H.-S., & Kan, L.-L. (۲۰۰۹). Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete. *Journal of hazardous materials*, 164(۲-۳), ۷۵۰-۷۵۴.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (۲۰۱۰). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in agronomy*, 105, ۴۷-۸۲.
- Thomas, G. W. (۱۹۹۶). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, ۴۷۵-۴۹۰.
- Walkley, A., & Black, I. A. (۱۹۳۴). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(۱), ۲۹-۳۸.
- Xue, Y., Wang, C., Hu, Z., Zhou, Y., Xiao, Y., & Wang, T. (۲۰۱۹). Pyrolysis of sewage sludge by electromagnetic induction: Biochar properties and application in adsorption removal of Pb (II), Cd (II) from aqueous solution. *Waste Management*, 89, ۴۸-۵۶.
- Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., . . . Ye, Z. (۲۰۱۶). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, ۹۷۴-۹۸۴.
- Zhou, X., Zhou, J., Liu, Y., Guo, J., Ren, J., & Zhou, F. (۲۰۱۸). Preparation of iminodiacetic acid-modified magnetic biochar by carbonization, magnetization and functional modification for Cd (II) removal in water. *Fuel*, 233, ۴۶۹-۴۷۹.

Effect of modified biochar on cadmium adsorption kinetics in calcareous soil

Mohadeseh Sehatmanesh Raeisi

Master's student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman

mohadeseh.sehatmanesh@gmail.com

Majid Fekri

Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman

mfekri@uk.ac.ir

Abstract

Cadmium is recognized as one of the most harmful heavy metals to human health and tends to accumulate in soil at high levels. The effect of modified biochar on the kinetics of cadmium adsorption in a contaminated calcareous soil was examined at Shahid Bahonar University of Kerman. For this purpose, modified biochar was applied at three levels (1%, 2%, and 3% by weight), which were incorporated into calcareous soil contaminated with 200 mg/kg of cadmium. Soil samples from the treated plots were collected 30 days after the soil was contaminated with cadmium. Extraction was performed at various time intervals ranging from 10 to 240 minutes using EDTA, and the concentration of cadmium in the samples was measured. The results indicated that the application of modified biochar resulted in a reduction in cadmium adsorption compared to the control treatment, with the lowest level of cadmium adsorption observed in the soil treated with 3% by weight of modified biochar. According to the experimental findings, cadmium adsorption was highest at the initial time points across all treatments and decreased over time. Specifically, 80% of the cadmium adsorption occurred within the first two hours. Based on the coefficient of determination and standard error, the power function equation was identified as the best predictive model for the kinetics of cadmium adsorption in the studied soil.

Keywords: Modified biochar, Kinetics, Cadmium, Adsorption