

## کارایی جذب بیوماس، بیوچار و بیوچار مهندسی شده باگاس نیشکر در حذف کادمیوم از محلول‌های آبی

حدیثه شعبانی<sup>۱</sup>، محمدمیر دلاور<sup>۱\*</sup> و سعید تقوی فردود<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۰)

### چکیده

امروزه به منظور کاهش خطرات ناشی از آلاینده‌ها، تکنیک‌های جدید پاکسازی آلاینده‌ها بر دوستانار محیط زیست و مقرون به صرفه بودن متمرکز شده است. بیوچار با توجه به فراوانی دسترسی، ارزان قیمت بودن و داشتن خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مطلوب پتانسیل بالایی برای پاکسازی آلاینده‌ها در محیط‌های آبی دارد. هدف از این مطالعه بررسی کارایی بیوچار مهندسی شده با کیتوسان (Bc-Ch)، بیوچار باگاس (Bg-Bc) و باگاس نیشکر (Bg) در حذف کادمیوم از محلول آبی است. بدین منظور اثر زمان تماس، مقدار جاذب، پهاش محلول بر درصد حذف کادمیوم و نیز همدم‌های جذب و مدل‌های سینتیکی جذب مطالعه شد. نتایج نشان داد همدمای لانگمویر و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم بهترین برازش را بر داده‌های جذبی داشتند. حداکثر مقدار جذب با توجه به مدل لانگمویر برای Bg و Bg-Bc، Bc-Ch به ترتیب ۳۲/۷۸، ۱۱/۵۷ و ۲/۲۳ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد. برای هر سه جاذب مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم بهترین برازش را بر داده‌های تجربی جذب نشان داد. این مطالعه نشان داد که بیوچار مهندسی شده با کیتوسان می‌تواند به‌عنوان جاذبی مؤثر، مقرون به صرفه و دوستانار محیط زیست برای پاکسازی آلاینده‌های فلزی در محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: باگاس نیشکر، جذب، همدم، کیتوسان، بیوچار مهندسی شده

۱-گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲-گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: amir-dalavar@znu.ac.ir

## مقدمه

فلزات سنگین گروه مهمی از آلاینده‌ها هستند که در غلظت‌های خاصی می‌توانند آسیب‌های قابل توجهی بر محیط زیست وارد کنند (۱۰). تلاش برای حذف یون‌های فلزی سنگین از محیط‌های آبی همواره از موضوعات چالش برانگیز و مورد توجه جهان بوده است، به این دلیل که این فلزات برخلاف آلاینده‌های آلی، دستخوش تخریب‌های میکروبی یا شیمیایی نشده و پس از ورودشان برای مدت‌های طولانی در محیط باقی می‌مانند و با انباشته شدن در بافت‌های بدن موجودات زنده سلامت آنها را به مخاطره می‌اندازند (۲۸). فرایندهای صنعتی، تولید، دفع محلی و صنعتی مواد زائد، فعالیت‌های کشاورزی و کاربرد کودهای شیمیایی از قبیل کودهای فسفره منبع اصلی غنی‌سازی محیط از فلزات سنگین هستند. عملیات بی‌رویه دفن زباله باعث تجمع طیف گسترده‌ای از فلزات سنگین نظیر آرسنیک (As)، کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، مس (Cu)، جیوه (Ag)، سرب (Pb)، سلنیوم (Se) و روی (Zn) در خاک شده، پس از وارد شدن به آب‌های سطحی و زیرزمینی مشکلات بسیاری را برای سلامت محیط زیست و انسان ایجاد می‌کنند (۱). کادمیوم فلزی سمی و مرگبار بوده که امروزه اثر آن در نقص جنین و ایجاد سرطان به اثبات رسیده است (۱۴). کادمیوم متحرک‌ترین فلز سنگین در خاک محسوب می‌شود و میزان سمیت آن ۲ تا ۲۰ برابر بیشتر از سایر فلزات سنگین است (۹). به‌طور کلی اصلاح منابع آب و خاک شامل بهبود منابع آب و خاک برای به حداقل رساندن فراهمی زیستی فلزات سنگین است (۲۵). پاکسازی منابع خاک و آب‌های آلوده به فلزات سنگین از طریق دستکاری فراهمی زیستی آنها توسط طیف گسترده‌ای از روش‌های اصلاح کننده انجام می‌شود که در بین این روش‌ها می‌توان به اصلاح کننده‌های متحرک کننده از قبیل عوامل کلات کننده، عوامل حل کننده، اصلاح کننده‌های آلی، کودها، آب‌های شور و متحرک کردن میکروبی عناصر سنگین اشاره کرد. اصلاح کننده‌های غیرمتحرک کننده با کاربرد ترکیباتی نظیر مواد فسفاتی، مواد آهکی، کمپوست‌های آلی،

اکسیدهای فلزی و بیوجار با کاهش فراهمی زیستی فلزات سنگین اثرات سمی آنها را کاهش می‌دهند (۲). به‌نظر می‌رسد روش‌های غیرمتحرک کردن مقرون به‌صرفه بوده و بر محیط زیست اثر تخریبی کمتری داشته است؛ بنابراین برای پاکسازی خاک‌های آلوده مناسب‌تر هستند (۳۳). در میان روش‌های غیرمتحرک کننده گزارش شده در مقالات بیوجارها در مقایسه با سایر جاذب‌ها به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی نظیر ساختمان متخلخل، مساحت سطحی بالا، حجم منفذی بزرگ، گروه‌های عاملی فراوان و بی‌خطر بودن برای محیط زیست پتانسیل بالایی در جذب فلزات سنگین نشان داده‌اند (۳).

منابع بسیار متفاوتی از جمله بقایای کشاورزی برای تولید بیوجار استفاده می‌شود. بقایای کشاورزی به مقدار زیاد در سراسر جهان در دسترس هستند که معمولاً از آنها به‌عنوان منابع انرژی کم بازده استفاده می‌شود و یا به‌طور مستقیم در مزرعه سوزانده شده و مشکلات زیست‌محیطی و آلودگی هوا را به‌همراه دارند. به‌منظور پیشگیری از این مشکلات می‌توان از بقایای کشاورزی به‌عنوان پیش‌ماده‌ای مناسب برای تولید بیوجار استفاده کرد (۳۹). از مزایای بقایای کشاورزی می‌توان به مقدار فراوان در دسترس بودن آنها، رایگان یا کم‌هزینه بودن و عدم سمیت آنها برای محیط زیست اشاره کرد (۶). باگاس نیشکر ماده‌ای است که در مقادیر بسیار زیاد از ضایعات کارخانه‌های تولید شکر ایجاد شده و بدون استفاده در محیط رها می‌شود؛ بنابراین پیش‌ماده‌ای ارزان و فراوان برای تولید بیوجار است.

امروزه بیوجار به‌عنوان یک جاذب زیستی مؤثر و مناسب برای حذف و یا تثبیت فلزات سمی به‌طور گسترده استفاده می‌شود. خصوصیات جذبی بیوجار وابستگی زیادی به منابع موادی دارد که از آنها تهیه شده است. به‌عنوان مثال بیوجارهای تهیه شده از مواد چوبی (چوب‌های جنگلی، پوسته آجیل و غیره) با ساختار توسعه‌یافته خوب، تنها جاذب فیزیکی در سطوح داشته و فلزات را با واکنش‌های ضعیفی جذب می‌کنند در مقابل در بیوجارهایی با ساختمان توسعه‌یافته ضعیف (ساقه

به دست آمد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که ریزترکیب‌های منیزیم - آلومینیوم/ بیوچار ایجاد شده، جاذبی قوی است که می‌تواند به‌طور مؤثری فسفات را از محلول‌های آبی حذف کند.

هدف از انجام این پژوهش بررسی کارایی باگاس نیشکر و بیوچار تولید شده از باگاس نیشکر قبل و بعد از تیمار با کیتوسان در حذف فلز سنگین کادمیوم از محلول‌های آبی است. در این مطالعه تأثیر زمان تماس، مقدار جاذب، پ‌هاس محلول، هم‌دماها و مدل‌های سینتیکی جذب در حذف کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی مورد نیاز شامل نمک سولفات کادمیوم، کیتوسان، هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید با خلوص بالا و درجه شیمیایی A از شرکت Chem Lab بلژیک تهیه و استفاده شد. برای ساخت محلول‌های مورد نیاز از آب دوبار تقطیر با هدایت الکتریکی  $0/2$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر استفاده شد. باگاس نیشکر از کارخانه نیشکر هفت‌تپه اهواز تهیه و پس از شستشو با آب شهری و خشک کردن در آون با دمای  $55$  درجه سلسیوس به قطعات  $0/5$  تا یک میلی‌متر آسیاب شد.

### تهیه بیوچار و بیوچار مهندسی شده

باگاس نیشکر آسیاب شده را به‌صورت فشرده در ظرفی در بسته قرار داده و برای انجام فرایند آتش‌کافت آهسته به کوره الکتریکی نیتروژن‌دار منتقل شد. نمونه در دمای  $400$  درجه سلسیوس با افزایش هر دقیقه  $10$  درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت در کوره قرار داده شد. به‌منظور ایجاد شرایط فاقد اکسیژن، گاز نیتروژن با جریان  $200$  میلی‌لیتر در دقیقه به درون کوره تزریق شد. پس از طی فرایند آتش‌کافت بیوچار حاصل در دمای اتاق سرد شده و به‌منظور انجام آزمایش‌های بعدی در ظرفی درپوش‌دار نگهداری شد.

برای تهیه بیوچار مهندسی شده ابتدا سه گرم کیتوسان در

انگور، کلش گندم، سبوس برنج و غیره) فلزات اغلب به‌صورت ترکیبی از تبادل کاتیونی و کلاته شدن فلزی با گروه‌های عاملی کربوکسیل نه فقط در سطح بیوچار که در درون ساختمان آن جذب می‌شوند؛ بنابراین کارایی جذب بیوچار افزون‌تر شده و اغلب تعاملات فلزی بسیار قوی در مقایسه با جذب فیزیکی دارند (۳۱)، از این رو برای بهبود بیشتر خصوصیات سطحی بیوچارها و افزایش کارایی جذب در آنها لازم است این جاذب‌های زیستی ارزشمند پس از فرایند آتش‌کافت یا در طی مراحل تولید اصلاح شوند (۳۲). کیتوسان ماده‌ای ارزان، فراوان، تجدیدپذیر و غیرسمی است که از پردازش صنعتی پوسته ماهی به دست می‌آید و فراوان‌ترین پلی‌ساکارید طبیعی در دنیا است (۳۰). کیتوسان عامل اصلاح‌کننده سطح است که به دلیل توانایی گروه‌های عاملی هیدروکسیل و آمین آن در ترکیب با یون‌های فلزی مختلف برای اصلاح سطوح جاذب‌ها به کار می‌رود (۳۴). دی‌بند هفشجانی و همکاران (۱۲)، به‌منظور حذف آلودگی نترات آب از بیوچار تهیه شده از باگاس نیشکر که به‌صورت شیمیایی اصلاح شده بود استفاده کردند. نتایج نشان داد که حداکثر درصد جذب نترات در پ‌هاس معادل  $4/46$  پس از  $60$  دقیقه زمان تماس با مقدار جاذب دو گرم بر لیتر است. در رقابت آنیون‌های مورد آزمایش یون‌های کربنات و کلرید به ترتیب حداکثر و حداقل تأثیر را روی جذب نترات توسط بیوچار اصلاح شده باگاس نیشکر نشان دادند. مدل سینتیک شبه درجه دوم و مدل ایزوترم جذب لانگمویر بهترین برازش را بر داده‌های جذبی حاصل از آزمایش نشان دادند و حداکثر قابلیت جذب بیوچار اصلاح شده برای حذف نترات  $28/21$  میلی‌گرم بر گرم بود. جانگ و همکاران (۱۶) نیز قابلیت جذب فسفات به‌وسیله بیوچار اصلاح شده با ریزترکیب‌های منیزیم-آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. ایزوترم‌های جذب نشان داد که ریز ترکیب‌های منیزیم - آلومینیوم/ بیوچار دارای سطح انرژی ناهمگن بوده و جذب فسفات می‌تواند توسط فرایندهای مختلفی کنترل شود. حداکثر قابلیت جذب فسفات بیش از  $877$  میلی‌گرم بر گرم بود و با برازش مدل لانگمویر-فروندلیچ

جذب اتمی قرائت شد. به منظور بررسی تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب کادمیوم، ابتدا پ هاش محلول ۳۰ میلی گرم بر لیتر کادمیوم در حالت خنثی تنظیم شده و سپس به ارلن حاوی ۵۰ میلی لیتر از محلول کادمیوم مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ گرم از جاذب اضافه و در زمان تماس بهینه از مرحله قبل هم زده شد. غلظت کادمیوم موجود در محلول توسط دستگاه جذب اتمی قرائت خواهد شد. برای بررسی اثر پ هاش بر جذب کادمیوم توسط جاذب های مورد مطالعه پ هاش اولیه محلول حاوی غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر کادمیوم در پ هاش های مختلف (۲ تا ۸) توسط اسید کلریدریک و سود ۰/۱ مولار تنظیم شد و سپس به ۵۰ میلی لیتر از محلول مقدار بهینه از جاذب که از آزمایش مرحله قبل به دست آمد اضافه و داخل ارلنی درپوش دار با حجم ۵۰ میلی لیتر ریخته و در مدت زمان بهینه تماس به دست آمده هم زده و غلظت کادمیوم توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد.

به منظور برآورد حداکثر مقدار جذب، گروهی از محلول ها با غلظت اولیه ۱۰ تا ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیوم تهیه شده و مقدار جذب در حالت بهینه به دست آمد. آزمایش ها در سه تکرار انجام و میانگین آنها گزارش شد. در تمام آزمایش ها مقدار جذب عنصر کادمیوم با اندازه گیری اختلاف بین غلظت محلول اولیه و غلظت نهایی تعیین و ظرفیت جذب جاذب ها با استفاده از رابطه (۱) اندازه گیری شد:

$$q_e = \left( \frac{C_0 - C_e}{m} \right) V \quad (1)$$

در این معادله  $C_0$  و  $C_e$  به ترتیب غلظت اولیه و غلظت تعادلی کادمیوم (میلی گرم در لیتر) محلول هستند.  $V$  حجم محلول به لیتر و  $m$  مقدار جاذب استفاده شده بر حسب گرم است. درصد حذف کادمیوم توسط جاذب ها نیز با استفاده از رابطه (۲) تعیین شد:

$$\% \text{Removal} = \left( \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

به منظور توصیف داده های جذب معادلات لانگمویر (Langmuir) و فروندولیچ (Freundlich) توسط نرم افزار اکسل نسخه ۲۰۱۶

۱۸۰ میلی لیتر استیک اسید (دو درصد) حل شده و سه گرم بیوچار تهیه شده از مرحله قبل به آن اضافه شد. مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شده و سوسپانسیون همگن حاصل به صورت قطره قطره به ۹۰۰ میلی لیتر هیدروکسید سدیم (۱/۲ درصد) اضافه و به مدت ۱۲ ساعت به حال خود گذاشته شد. بیوچار اصلاح شده با کیتوسان با آب دیونیزه شسته شد تا هیدروکسید سدیم اضافی آن حذف شود و در نهایت به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شد (۴۰).

### ویژگی های بررسی شده

مقادیر کربن، نیتروژن و هیدروژن در نمونه ها با استفاده از دستگاه CHN آنالیزور پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران اندازه گیری شد. ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه ها به روش گاسکین و همکاران (۱۱) تعیین شد. پ هاش توسط پ هاش متر در محلول وزنی با نسبت ۱:۲۰ جاذب ها - آب دیونیزه (۳۸) اندازه گیری شد. طیف سنجی به روش تبدیل فوریه اشعه مادون قرمز با استفاده از دستگاه مدل FTIR Perkin Elmer در محدوده عدد موجی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ بر سانتی متر و توسط پخش شدن نمونه در قرص کلرید باریم انجام شد. غلظت کادمیوم موجود در محلول توسط دستگاه جذب اتمی مدل واریان قرائت شد.

### مطالعات تعادلی جذب

به منظور بررسی تأثیر زمان واکنش بر جذب کادمیوم در محلول آبی، ۵۰ میلی لیتر از محلول با غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر کادمیوم در پ هاش خنثی داخل ارلن درپوش دار با حجم ۱۵۰ میلی لیتر ریخته و به آن ۰/۱ گرم از باگاس، بیوچار و بیوچار مهندسی شده اضافه و روی شیکر با دور ۱۲۰ دور در دقیقه قرار داده شد. پس از گذشت زمان های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه و سپس سانتریفیوژ کردن محلول به مدت ۲۰ دقیقه با شدت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، محلول فیلتر شده و در نهایت غلظت کادمیوم در محلول ها توسط دستگاه

جدول ۱. ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در باگاس، بیوچار و بیوچار مهندسی شده

ظرفیت تبادل کاتیونی (Cmol <sup>(+)</sup> .Kg <sup>-1</sup> )	پهاش (۱:۲۰)	کربن (درصد)	هیدروژن (درصد)	نیتروژن (درصد)
باگاس	۵/۸۱	۴۱/۹۷	۵/۵۶۷	۰/۱۲
بیوچار	۳۵/۸۰	۶۹/۲۷	۳/۴۳	۰/۲۱
بیوچار مهندسی شده	۴۸/۲۱	۶۸/۲۲	۴/۳۲	۲/۱۲

$$SE = \left[ \frac{\sum (M - M^*)^2}{n - 2} \right]^{0.5} \quad (۸)$$

در این رابطه  $M$  مقدار فلز اندازه‌گیری شده و  $M^*$  مقدار فلز برآورد شده از مدل و  $n$  تعداد مشاهده‌ها است. مدلی که بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد را داشته باشد بهترین مدل توصیف کننده داده‌های جذبی است.

### نتایج و بحث

جدول ۱ مقادیر ویژگی‌های مختلف اندازه‌گیری شده در جاذب‌های تهیه شده از باگاس نیشکر را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج جدول ۱ در اثر فرایند آتش‌کافت مقادیر کربن و ظرفیت تبادل کاتیونی بیوچارها نسبت به باگاس به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است ظرفیت تبادل کاتیونی باگاس و بیوچار باگاس به ترتیب برابر با ۵/۸۱، ۳۵/۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. مقدار این ویژگی برای بیوچار مهندسی شده با کیتوسان ۴۸/۲۱ سانتی‌مول بر کیلوگرم به دست آمد.

شکل ۱ نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه برای هر سه جاذب را نشان می‌دهد. پیک‌های مشاهده شده در ۳۴۰۰ بر سانتی‌متر حاکی از وجود گروه OH است؛ که شدت این پیک در باگاس بیشتر از بیوچارها است به دلیل اینکه بیوچارها طی فرایند آتش‌کافت مولکول‌های آب آزاد را از دست داده‌اند. پیک ناحیه ۲۸۵۱ بر سانتی‌متر مربوط به گروه C-H و پیک موجود در ناحیه ۲۹۲۳ بر سانتی‌متر مربوط به گروه C-H کششی است که در هر سه جاذب دیده شد. پیک ۱۴۲۰ بر سانتی‌متر مربوط به C=C و حلقه آروماتیک است که در بیوچارها اضافه شده و در باگاس

روی داده‌ها برآزش داده شد. رابطه (۳) و (۴) به ترتیب معادله‌های همدم‌های لانگمویر و فروندولیچ و پارامترهای آنها را نشان می‌دهد (۸ و ۱۸):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} b} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (۳)$$

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (۴)$$

در این دو رابطه  $C_e$  غلظت تعادلی فلز (میلی‌گرم بر لیتر)،  $q_e$  ماده جذب شده به‌ازای یک واحد جرم جاذب در حالت تعادل (میلی‌گرم بر گرم)،  $q_{\max}$  بیشینه ظرفیت جذب (میلی‌گرم بر گرم)،  $b$  ثابت لانگمویر مربوط به انرژی جذب (لیتر بر میلی‌گرم)،  $K_f$  و  $n$  ثابت‌های فروندولیچ و به ترتیب شاخص ظرفیت و شدت جذب هستند. برای بررسی رفتار سینتیک جذب نیز از مدل‌های پرکاربرد شبه مرتبه اول (Pseudo-first-order)، شبه مرتبه دوم (Pseudo-second-order) و ایلوویچ (Elovich) استفاده شد. رابطه‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب معادله‌های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، ایلوویچ و پارامترهای آنها را نشان می‌دهد (۱۳، ۱۵ و ۱۷):

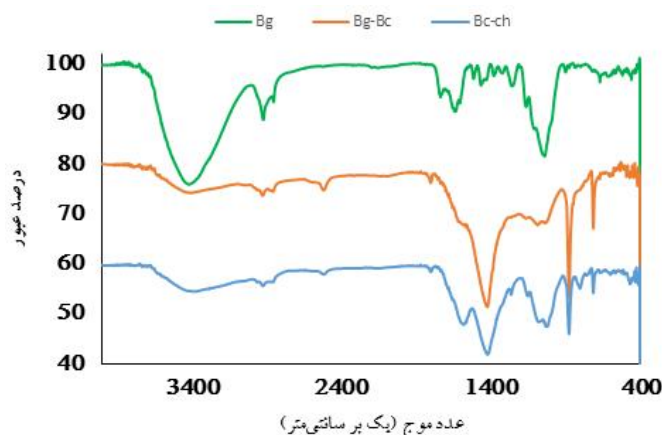
$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_{1ads} t}{2.303} \quad (۵)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_{2ads} q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (۶)$$

$$qt = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (۷)$$

در این روابط  $q_t$  مقدار جذب در زمان  $t$ ،  $q_e$  مقدار جذب در زمان تعادل،  $k_1$  و  $k_2$  ثابت‌های سرعت جذب،  $t$  زمان،  $\alpha$  نرخ جذب اولیه و  $\beta$  ثابت واجذب است.

خطای استاندارد (Standard Error) از رابطه (۸) محاسبه شد:



شکل ۱. طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (رنگی در نسخه الکترونیکی)

(باگاس نیشکر (Bg)، بیوچار باگاس (Bg-Bc) و بیوچار باگاس مهندسی شده با کیتوسان ((Bc-Ch)

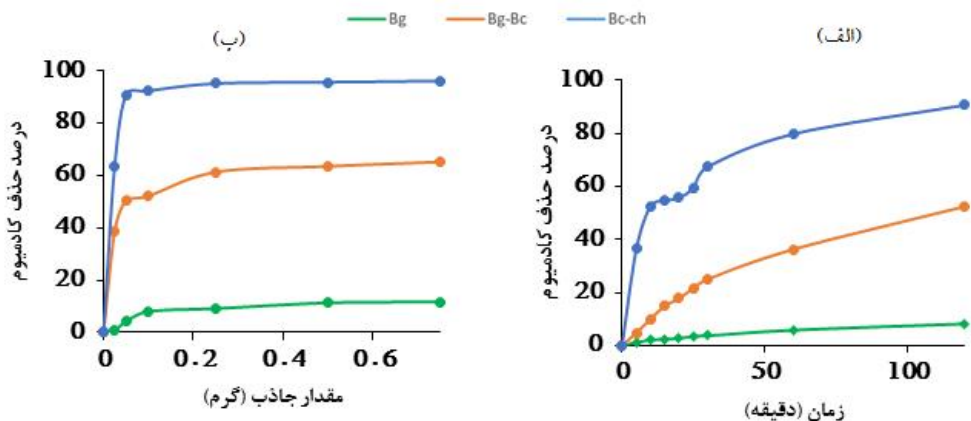
سنگین را به مقدار زیادی بهبود بخشد زیرا گروه‌های عاملی آمینی آن توانایی ایجاد پیوندهای قوی با یون‌های مختلف فلزی را دارند.

در بررسی اثر مقدار جاذب بر حذف کادمیوم (شکل ۲) مشاهده شد که با افزایش مقدار باگاس تغییر محسوسی در حذف کادمیوم رخ نداده ولی در مورد بیوچار باگاس و بیوچار مهندسی شده مقادیر جذب با افزایش مقدار جاذب بیشتر می‌شود. نتایج گویای آن است که در مورد بیوچار مهندسی شده با کیتوسان در مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم در حدود ۹۰ درصد کادمیوم حذف شده است و پس از آن شیب نمودار تغییر محسوسی نداشته است، بنابراین مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم به عنوان مقدار جاذب بهینه برای مقایسه با سایر جاذب‌ها در نظر گرفته شد. بیوچار مهندسی شده، بیوچار و باگاس در مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم به ترتیب ۹۰، ۵۰ و ۴ درصد حذف را نشان دادند. افزایش جذب با افزایش مقدار جاذب به بیشتر شدن سطح، بالاتر رفتن توانایی مکان‌های تبادل یونی و افزایش مکان‌های فعال وابسته است (۲۷).

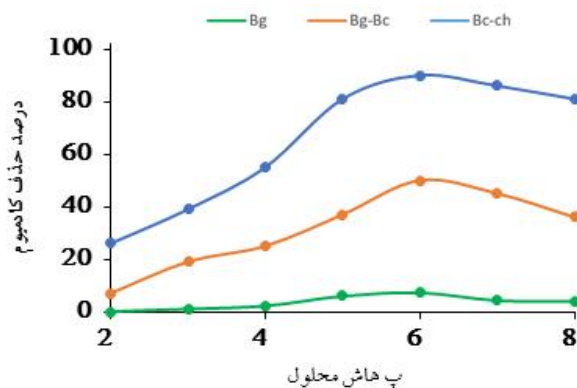
پهاس محلول یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر فرایند جذب است. نتایج تأثیر پهاس بر جذب کادمیوم توسط جاذب‌های مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. با

مشاهده نشد. پیک ۱۸۰۱ بر سانتی‌متر نشان‌دهنده گروه C=O و پیک ۱۰۸۳ بر سانتی‌متر مربوط به گروه C-O است و پیک‌های ۴۰۰ تا ۷۰۰ که بیشتر در بیوچار مهندسی شده دیده می‌شوند احتمالاً نشان‌دهنده وجود هالید آلکیل‌های ارتعاشی و ترکیبات فلزی معدنی مثل کلسیم، پتاسیم یا منیزیم است. تمامی گروه‌های عاملی اشاره شده توسط محققان مختلف برای جاذب‌های کربنی گزارش شده است (۲۴ و ۳۷).

شکل ۲ اثر زمان تماس بر حذف کادمیوم (غلظت اولیه ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر) توسط سه جاذب به‌کار برده شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در شروع واکنش جذب با سرعت بالاتری اتفاق افتاده و با گذشت زمان این سرعت کاهش می‌یابد. علت این پدیده به بیشتر بودن مکان‌های فعال روی جاذب در ابتدای واکنش نسبت داده می‌شود که با افزایش زمان تعادل این فضاها پر شده و به‌مرور اشباع و از ظرفیت جذب کمتر می‌شود (۲۷). بیوچار مهندسی شده با کیتوسان حداکثر مقدار جذب کادمیوم (۹۰ درصد) را در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه نشان داد، درحالی که این مقدار برای بیوچار باگاس و باگاس نیشکر به ترتیب ۵۲ و ۸ درصد بود. ژو و همکاران (۴۰) نشان دادند پوشش جاذب‌ها با کیتوسان و ترکیب آن با بیوچار می‌تواند کارایی جاذب در حذف فلزات



شکل ۲. الف) تأثیر زمان بر درصد حذف کادمیوم در پهاش اولیه خنثی و مقدار جاذب ۱/۰ گرم و ب) تأثیر مقدار جاذب بر درصد حذف کادمیوم در پهاش اولیه خنثی و زمان تماس ۱۲۰ دقیقه (رنگی در نسخه الکترونیکی)  
 (باگاس نیشکر (Bg)، بیوچار باگاس (Bg-Bc) و بیوچار باگاس مهندسی شده با کیتوسان (Bc-Ch))



شکل ۳. تأثیر پهاش بر درصد حذف کادمیوم (مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم و زمان تماس ۱۲۰ دقیقه) (رنگی در نسخه الکترونیکی)  
 (باگاس نیشکر (Bg)، بیوچار باگاس (Bg-Bc) و بیوچار باگاس مهندسی شده با کیتوسان (Bc-Ch))

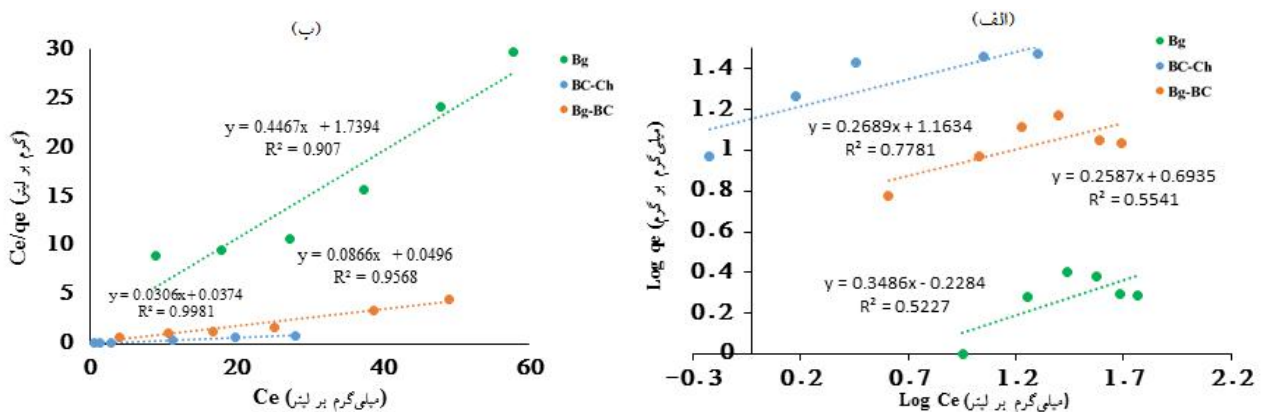
یون های  $H^+$  و  $Cd^{2+}$  در اشغال مکان های جذبی شود و قابلیت جذب  $Cd^{2+}$  توسط بیوچار را کاهش دهد (۳۵) همچنین در پهاش های ۸ و بالاتر گروه های عاملی OH منجر به تشکیل کمپلکس های کم محلول هیدروکسیل مثل  $Cd(OH)_2$  و  $Cd(OH)_3$  شده که رسوب می کنند (۲۳)؛ بنابراین اکثر محققان پهاش حدود ۵ تا ۶ را برای جذب فلزات سنگین مناسب گزارش کردند (۴ و ۵).

به منظور یافتن بهترین منحنی تعادلی مدل های تجربی لانگمویر و فروندلیچ استفاده شد. نتایج برازش مدل شامل ضریب تبیین و پارامترهای مدل ها در جدول ۲ و شکل ۴

افزایش پهاش تا حدود ۶ درصد، حذف به طور قابل ملاحظه ای افزایش و پس از آن روند کاهشی نشان داده است. مقدار حذف در پهاش ۶ برای بیوچار مهندسی شده ۹۲ درصد و برای دو جاذب دیگر، بیوچار و باگاس به ترتیب ۵۱ و ۷/۲ درصد به دست آمد. با توجه به مطالعات انجام شده در پهاش پایین، غلظت بالای یون های  $H^+$  باعث پروتونه شدن گروه های عاملی سطح بیوچار شده (۷) که منجر به دفعه الکترواستاتیک بین گروه های عاملی پروتونه شده و بار مثبت  $Cd^{2+}$  می شود (۲۰). علاوه بر این غلظت بالای یون های  $H^+$  می تواند منجر به رقابت بین

جدول ۲. پارامترها و ضرایب تبیین برآورد شده حاصل از برازش همدماهای جذب بر داده‌های جذب کادمیوم

همدماهای فروندلیچ				همدماهای لانگمویر				جاذب‌ها
SE	R2	Kf (L/mg)	n	SE	R2	b (L/mg)	qmax (mgg <sup>-1</sup> )	
۰/۵۰	۰/۵۲	۰/۵۹	۲/۸۶	۰/۵۴	۰/۹۰	۰/۲۵	۲/۲۳	باگاس
۳/۰۶	۰/۵۵	۴/۹۳	۳/۸۶	۲/۷۷	۰/۹۹	۰/۷۰	۱۱/۵۷	بیوچار
۵/۳۶	۰/۷۷	۱۴/۵۶	۳/۷۱	۲/۳۴	۰/۹۹	۰/۸۰	۳۲/۷۸	بیوچار مهندسی شده



شکل ۴. همدماهای جذب لانگمویر و فروندلیچ در حذف کادمیوم (رنگی در نسخه الکترونیکی)  
(باگاس نیشکر (Bg)، بیوچار باگاس (Bg-Bc) و بیوچار باگاس مهندسی شده با کیتوسان (Bc-Ch))

جذب جاذب‌ها در زمان تعادل است. دینگ و همکاران (۶) و وانگ و همکاران (۳۶) در بررسی بیوچارهای مهندسی شده مختلف روی حذف فلزات سنگین نیز مدل لانگمویر را بهترین مدل توصیف‌کننده داده‌های جذبی دانستند.

به منظور کاربرد عملی بیوچار در حذف آلاینده‌ها شناخت فرایندهای سینتیک جذب ضروری است. در بررسی سینتیک جذب نیز همان‌طور که در جدول ۳ و شکل ۵ مشاهده می‌شود مدل شبه مرتبه دوم با ضریب تبیین ۹۵ برای باگاس و ۹۹ درصد برای هر دو بیوچار باگاس و بیوچار مهندسی شده نسبت به سایر مدل‌های دیگر برازش بهتری را بر داده‌های جذب نشان داده است. همچنین کمتر بودن مقادیر خطای استاندارد برای مدل شبه مرتبه دوم نسبت به دو مدل دیگر تأییدی بر مناسب‌تر بودن این مدل است. مقدار  $q_e$  در این مدل که بیانگر مقدار جذب

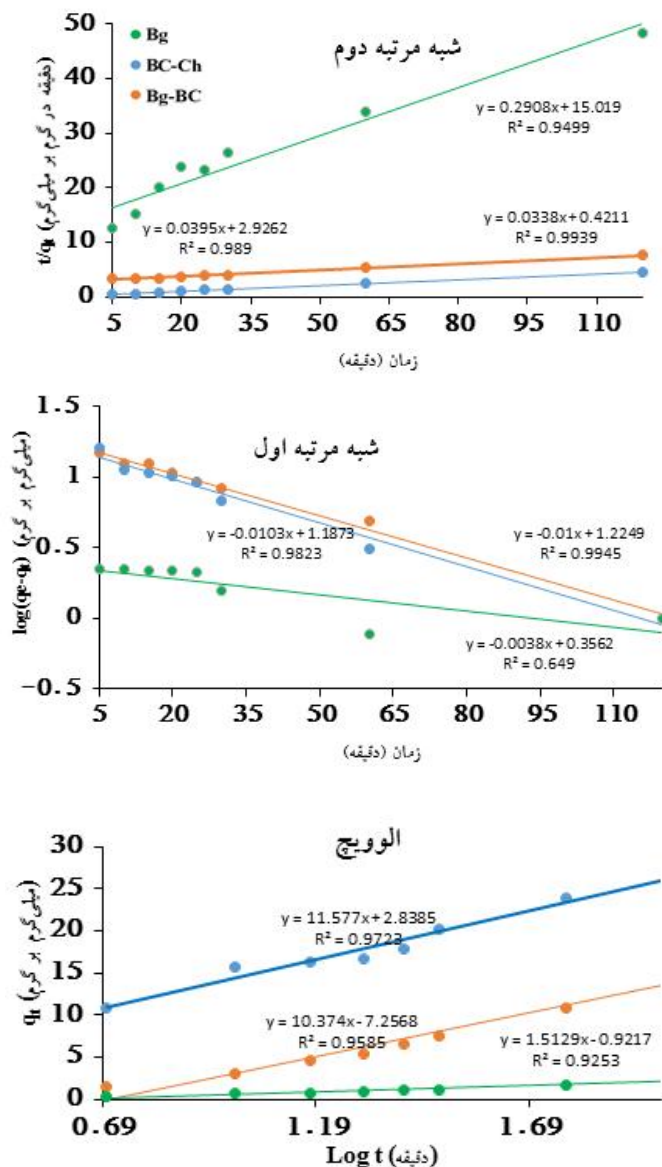
ارائه شده است. مدل لانگمویر برای هر سه جاذب ضریب تبیین بالاتر و خطای استاندارد کمتری نسبت مدل فروندلیچ نشان داد؛ بنابراین مدل لانگمویر به عنوان مدل مناسب انتخاب شد.

مقادیر  $q_{max}$  به دست آمده از مدل لانگمویر برای باگاس، بیوچار و بیوچار مهندسی شده به ترتیب ۲/۲۳، ۱۱/۵۷ و ۳۲/۷۸ بود که بیانگر قابلیت بالای جذب بیوچار مهندسی شده نسبت به دو جاذب دیگر است به طوری که حداکثر مقدار جذب بیوچار مهندسی شده با کیتوسان در حدود سه برابر بیشتر از بیوچار اولیه اندازه‌گیری شد. بالا بودن مقدار  $b$  مدل لانگمویر برای جذب کادمیوم توسط بیوچار مهندسی شده نشان‌دهنده تمایل بیشتر این جاذب برای جذب کادمیوم است. اگرچه این معادلات در حال حاضر اطلاعات واضحی از مکانیسم جذب نشان نمی‌دهد ولی نشان‌دهنده توانایی



جدول ۳. پارامترها و ضرایب تعیین برآورد شده حاصل از برازش مدل‌های سینتیکی جذب بر داده‌های جذب کادمیوم

الویج				شبه مرتبه دوم				شبه مرتبه اول				جاذب‌ها
SE	R2	$\beta$	$\alpha$	SE	R2	K2	qe	SE	R2	K1	qe	
۱/۸۱	۰/۹۲	۰/۷۰	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۰۰۵	۳/۴۳	۱/۵۹	۰/۹۰	۰/۰۲۰	۲/۸۸	باگاس
۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۰۹	۵/۱۵	۰/۲۴	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۲۵/۳۱	۸/۷۲	۰/۹۸	۰/۰۲۰	۱۵/۸	بیوچار
۰/۲۰	۰/۹۷	۰/۰۸	۱۴/۷۹	۰/۱۰	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۲۹/۵۸	۱/۰۲	۰/۹۷	۰/۰۲۸	۱۷/۰۱	بیوچار مهندسی شده



شکل ۵. مدل‌های خطی شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و مدل الویج در حذف کادمیوم (رنگی در نسخه الکترونیکی) (باگاس نیشکر (Bg)، بیوچار باگاس (Bg-Bc) و بیوچار باگاس مهندسی شده با کیتوسان ((Bc-Ch)

جدول ۴. مقایسه ظرفیت جاذب‌های مختلف در جذب فلز کادمیوم با پژوهش حاضر

منبع	ظرفیت جذب (میلی‌گرم بر گرم)	جاذب
(۳۶)	۲۸/۱۰	بیوچار اصلاح شده با پرمنگنات پتاسیم
(۲۶)	۵/۴۶	بیوچار تراشه چوب
(۲۲)	۳	بیوچار مغناطیسی چوب بلوط
(۴)	۲۸/۹۹	بیوچار پوست بادام زمینی
(۱۹)	۴۹/۸۳	بیوچار سنبل آبی
(۲۱)	۳۰/۷۶	بیوچار ساقه ذرت
(۲۱)	۱۴۴/۰۹	بیوچار ساقه ذرت اصلاح شده با اسریلونیتریل
مطالعه حاضر	۱۱/۵۷	بیوچار باگاس نیشکر
مطالعه حاضر	۳۲/۷۸	بیوچار باگاس نیشکر مهندسی شده با کیتوسان

برابر بیشتر از بیوچار اولیه بود. باگاس نیشکر تأثیر فراوانی در حذف کادمیوم نشان نداد. نتایج حاکی از بالا بودن سرعت حذف در شروع فرایند و ثابت شدن آن با گذشت زمان بود. درصد حذف کادمیوم توسط بیوچار مهندسی شده ۹۲ درصد و برای بیوچار اولیه و باگاس به ترتیب ۷۱ و ۷/۲ درصد بود. نتایج حاکی از کارایی بالای کیتوسان در افزودن قابلیت جذب بیوچار باگاس در حذف فلز کادمیوم بود. بیوچار مهندسی شده با کیتوسان به دلیل داشتن توانایی بالا در حذف فلزات سنگین و با توجه به هزینه پایین آماده‌سازی آن می‌تواند در پاکسازی محیط‌های آلوده به فلزات سنگین مؤثر واقع شود بدون آنکه منجر به تولید فراورده‌های جانبی خطرناک در محیط شود.

### سپاسگزاری

از دانشگاه زنجان به‌خاطر حمایت‌های مالی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

در زمان تعادل است برای بیوچار مهندسی شده ۲۹/۵۸، برای بیوچار اولیه ۲۵/۳۱ و برای باگاس ۳/۴۳ میلی‌گرم بر گرم اندازه‌گیری شد. مقدار این پارامتر نیز تأکیدی بر نسبت افزایش قابلیت جذب کادمیوم توسط بیوچار مهندسی شده به دو جاذب دیگر مورد مطالعه است. دنگ و همکاران (۵) در بررسی کارایی جذب بیوچار مهندسی شده حاصل از کاه و کلش برنج در حذف سرب، کادمیوم و کروم، و تان و همکاران (۲۹) در مطالعه تأثیر بیوچار بر حذف فلزات سنگین از جمله کادمیوم مدل شبه مرتبه دوم را مناسب‌ترین مدل برازش یافته بر داده‌های جذب گزارش کردند.

### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر کارایی بیوچار مهندسی شده با کیتوسان، بیوچار اولیه و باگاس نیشکر در پاکسازی آب آلوده به کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر ظرفیت جذب در زمان تعادل ۱۲۰ دقیقه، مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم و پ‌ه‌اش ۶ به‌دست آمد که مقدار این پارامتر برای بیوچار مهندسی شده در حدود سه

### منابع مورد استفاده

- Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments, Springer-Verlag, New York.
- Bolan, N., A. Kunhikrishnan, R. Thangarajan, J. Kumpiene, J. Park, T. Makino, M. B. Kirkham and K. Scheckel. 2014. Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils-to mobilize or to immobilize? *Journal of Hazardous*

- Materials* 266(1): 141-166.
3. Cha, J. S., S. H. Park, S. C. Jung, C. Ryu, J. K. Jeon, M. C. Shin and Y. K. Park. 2016. Production and utilization of biochar: a review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 40: 1-15.
  4. Cheng, Q., Q. Huang, S. Khan, Y. Liu, Z. Liao, G. Li and Y. S. Ok. 2016. Adsorption of Cd by peanut husks and peanut husk biochar from aqueous solutions. *Ecological Engineering* 87: 240-245.
  5. Deng, J., Y. Liu, S. Liu, G. Zeng, X. Tan, B. Huang, X. Tang, S. Wang, Q. Hua and Z. Yan. 2017. Competitive adsorption of Pb (II), Cd (II) and Cu (II) onto chitosan-pyromellitic dianhydride modified biochar. *Journal of Colloid and Interface Science* 506: 355-364.
  6. Ding, Z., X. Hu, Y. Wan, S. Wang and B. Gao. 2016. Removal of Lead, Copper, Cadmium, Zinc, and Nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 33: 239-245.
  7. Elaigwu, S. E., V. Rocher, G. Kyriakou and G. M. Greenway. 2014. Removal of Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> from aqueous solution using chars from pyrolysis and microwave-assisted hydrothermal carbonization of *Prosopis africana* shell. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20(5): 3467-3473.
  8. Freundlich, H. 1909. *Kolloidchemie*. Akademischer Verlagsgesellschaft, Leipzig.
  9. Friberg, L. and T. Kjellström. 1981. *Disorders of Mineral Metabolism*. Academic Press, New York
  10. Gao, C., Q. Lin, K. Bao, H. Zhao, Z. Zhang, W. Xing, X. Lu and G. Wang. 2014. Historical variation and recent ecological risk of heavy metals in wetland sediments along Wusuli River, Northeast China. *Environmental Earth Sciences* 72(11): 4345-4355.
  11. Gaskin, J. W., C. Steiner, K. Harris, K. Das and B. Bibens. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE* 51(6): 2061-2069.
  12. Hafshejani, L. D., A. Hooshmand, A. A. Naseri, A. S. Mohammadi, F. Abbasi and A. Bhatnagar. 2016. Removal of nitrate from aqueous solution by modified sugarcane bagasse biochar. *Ecological Engineering* 95: 101-111.
  13. Ho, Y. S. and G. McKay. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry* 34(5): 451-465.
  14. Järup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin* 68(1): 167-182.
  15. Juang, R. -S. and M. -L. Chen. 1997. Application of the Elovich equation to the kinetics of metal sorption with solvent-impregnated resins. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 36(3): 813-820.
  16. Jung, K. W., T. U. Jeong, M. J. Hwang, K. Kim and K. H. Ahn. 2015. Phosphate adsorption ability of biochar/Mg-Al assembled nanocomposites prepared by Aluminum-electrode based electro-assisted modification method with MgCl<sub>2</sub> as electrolyte. *Bioresource Technology* 198: 603-610.
  17. Lagergren, S. 1898. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Sven Vetenskapsakad. Handlingar* 24: 1-39.
  18. Langmuir, I. 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *Journal of the American Chemical Society* 38(11): 2221-2295.
  19. Li, F., K. Shen, X. Long, J. Wen, X. Xie, X. Zeng, Y. Liang, Y. Wei, Z. Lin and W. Huang. 2016. Preparation and characterization of biochars from *Eichornia crassipes* for cadmium removal in aqueous solutions. *PLoS One* 11(2): 132-148.
  20. Liu, Z. and F. -S. Zhang. 2011. Removal of Copper (II) and Phenol from aqueous solution using porous Carbons derived from hydrothermal chars. *Desalination* 267(1): 101-106.
  21. Luo, M., H. Lin, B. Li, Y. Dong, Y. He and L. Wang. 2018. A novel modification of lignin on corncob-based biochar to enhance removal of Cadmium from water. *Bioresource Technology* 259: 312-318.
  22. Mohan, D., H. Kumar, A. Sarswat, M. Alexandre-Franco and C. U. Pittman Jr. 2014. Cadmium and Lead remediation using magnetic oak wood and oak bark fast pyrolysis bio-chars. *Chemical Engineering Journal* 236: 513-528.
  23. Mohan, D., C. U. Pittman Jr, M. Bricka, F. Smith, B. Yancey, J. Mohammad, P. H. Steele, M. F. Alexandre-Franco, V. Gómez-Serrano and H. Gong. 2007. Sorption of Arsenic, Cadmium, and Lead by chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production. *Journal of Colloid and Interface Science* 310(1): 57-73.
  24. Olabemiwo, F. A., B. S. Tawabini, F. Patel, T. A. Oyehan, M. Khaled and T. Laoui. 2017. Cadmium removal from contaminated water using polyelectrolyte-coated industrial waste fly ash. *Bioinorganic Chemistry and Applications* 2017(1): 1-13.
  25. Park, J. H., D. Lamb, P. Paneerselvam, G. Choppala, N. Bolan and J. -W. Chung. 2011. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials* 185(2-3): 549-574.
  26. Qi, F., Y. Yan, D. Lamb, R. Naidu, N. S. Bolan, Y. Liu, Y. S. Ok, S. W. Donne and K. T. Semple. 2017. Thermal stability of biochar and its effects on Cadmium sorption capacity. *Bioresource Technology* 246: 48-56.
  27. Rathod, V., H. Pansare, S. A. Bhalerao and S. D. Maind. 2015. Adsorption and desorption studies of Cadmium (II)

- ions from aqueous solutions onto Tur pod (*Cajanus cajan*). *International Journal of Advanced Chemistry Research* 4(5): 30-38.
28. Ruthiraan, M., N. M. Mubarak, R. K. Thines, E. C. Abdullah, J. N. Sahu, N. S. Jayakumar and P. Ganesan. 2015. Comparative kinetic study of functionalized Carbon nanotubes and magnetic biochar for removal of Cd<sup>2+</sup> ions from wastewater. *Korean Journal of Chemical Engineering* 32(3): 446-457.
  29. Tan, X., Y. Liu, G. Zeng, X. Wang, X. Hu, Y. Gu and Z. Yang. 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere* 125: 70-85.
  30. Tharanathan, R. N. and F. S. Kittur. 2003. Chitin the undisputed biomolecule of great potential. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 43(1): 61-87.
  31. Trakal, L., D. Bingöl, M. Pohořelý, M. Hruška and M. Komárek. 2014. Geochemical and spectroscopic investigations of Cd and Pb sorption mechanisms on contrasting biochars: engineering implications. *Bioresource Technology* 171: 442-451.
  32. Trakal, L., V. Veselská, I. Šafařík, M. Vítková, S. Čihalová and M. Komárek. 2016. Lead and Cadmium sorption mechanisms on magnetically modified biochars. *Bioresource Technology* 203: 318-324.
  33. Tsang, D. C., F. Zhou, W. Zhang and R. Qiu. 2016. Stabilization of cationic and anionic metal species in contaminated soils using sludge-derived biochar. *Chemosphere* 149: 263-271.
  34. Vasconcelos, H. L., E. Guibal, R. Laus, L. Vitali and V. T. Fávere. 2009. Competitive adsorption of Cu (II) and Cd (II) ions on spray-dried chitosan loaded with Reactive Orange 16. *Materials Science and Engineering: C* 29(2): 613-618.
  35. Wang, F. Y., H. Wang and J. W. Ma. 2010. Adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solution by a new low-cost adsorbent-Bamboo charcoal. *Journal of Hazardous Materials* 177(1-3): 300-306.
  36. Wang, S., B. Gao, Y. Li, A. Mosa, A. R. Zimmerman, L. Q. Ma, W. G. Harris and K. W. Migliaccio. 2015. Manganese oxide-modified biochars: preparation, characterization, and sorption of arsenate and lead. *Bioresource Technology* 181: 13-17.
  37. Yang, Z., Z. Fang, L. Zheng, W. Cheng, P. E. Tsang, J. Fang and D. Zhao. 2016. Remediation of Lead contaminated soil by biochar-supported nano-hydroxyapatite. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 132: 224-230.
  38. Yao, Y., B. Gao, M. Inyang, A. R. Zimmerman, X. Cao, P. Pullammanappallil and L. Yang. 2011. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: characterization and Phosphate removal potential. *Bioresource Technology* 102(10): 6273-6278.
  39. Zhang, Z., J. Abuduwaili and F. Jiang. 2015. Sources, pollution status and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, Northwest China. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue* 36(2): 490-496.
  40. Zhou, Y., B. Gao, A. R. Zimmerman, J. Fang, Y. Sun and X. Cao. 2013. Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. *Chemical Engineering Journal* 231: 512-518.

## Adsorption Efficiency of Biomass, Biochar and Engineered Biochar of Sugarcane Bagasse on Cadmium Removal from Aqueous Solution

H. Shabani<sup>1</sup>, M. A. Delavar<sup>1\*</sup> and S. T. Fardood<sup>2</sup>

(Received: February 17-2019; Accepted: July 1-2019)

### Abstract

Today, to reduce the risks of contaminants, new remediation techniques have been focused on low-cost and environmentally friendly manners. Given the frequency of access, inexpensiveness and good physical and chemical properties, biochar has a high potential for the remediation of water pollutants. In this paper, the efficiency of chitosan engineered biochar (Bc-Ch) and pristine biochar (Bg-Bc) prepared from sugarcane bagasse biomass (Bg) in the Cd<sup>2+</sup> removal in aqueous solution was investigated. To this aim, the effects of contact time, adsorbent dosage and solution pH on cadmium removal were evaluated by adsorption isotherms and Kinetic models. The results indicated that the Langmuir isotherm and the pseudo-second-order kinetic model could be well fitted with the process of cadmium biosorption. The maximum adsorption capacities of Bc-Ch, Bg-Bc and Bg ,according to Langmuir model, were found to be 32/78 mg/g, 11/57 mg/g and 2/23 mg/g, respectively. For these absorbents, the pseudo-second-order kinetic model showed the best fit to the experimental adsorption data. This study, therefore, indicated that the chitosan engineered biochar could be used as an effective, low-cost, and environmentally-friendly sorbent to remediate heavy metals contamination in the environment.

**Keywords:** Sugarcane bagasse, Adsorption, Isotherm, Chitosan, Engineered biochar.

---

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2- Department of Chemistry, College of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: amir-delavar@znu.ac.ir