

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی جاذب بیوچار جهت حذف یون کادمیوم از محلول آبی

زینب ایزدی^۱، فاطمه آبیاری^{۲*}، سمیه سلطانی گرد فرامرز^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

چکیده

آلودگی منابع آبی به فلزات سنگین، به‌ویژه کادمیوم به دلیل سمیت بالا و پایداری زیستی، یکی از بحران‌های جدی محیط‌زیستی محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد جاذب سازگار با محیط‌زیست بیوچار، جهت حذف بهینه یون‌های کادمیوم از محلول‌های آبی است. در این راستا، ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیکی سطح جاذب بیوچار با بهره‌گیری از آنالیزهای سطح‌سنجی (BET)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) و پراش پرتو ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های جذب ناپیوسته در طیف غلظتی ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و با دوزهای متغیر جاذب (۰/۱ و ۰/۵ گرم) انجام گردید و غلظت کادمیوم باقیمانده با استفاده از آنالیز جذب اتمی تعیین شد. یافته‌های تجربی نشان داد که جاذب بیوچار در هر دو دوز مورد بررسی، عملکردی بسیار مطلوب داشته و توانست بازده حذف بیش از ۹۸ درصد را ثبت نماید. بررسی‌های ایزوترم و سینتیک جذب مشخص کرد که داده‌های تجربی بیشترین همخوانی را با مدل ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیک شبه‌مرتبه دوم دارند. این نتایج تأیید می‌کند که فرایند جذب کادمیوم روی بیوچار به‌صورت تک‌لایه بر روی سطحی همگن رخ داده و سازگار غالب، شیمی جذب از طریق تعامل کادمیوم با گروه‌های عاملی سطحی است. بررسی ترمودینامیکی در دمای ۲۹۸K با مقادیر منفی انرژی آزاد گیبس ΔG° بین $-30/46$ تا -30 KJ/mol، نشان‌دهنده ماهیت کاملاً خودبه‌خودی و امکان‌پذیری بالای فرایند جذب کادمیوم توسط بیوچار بود. با توجه به کارایی مطلوب و توجیه اقتصادی، بیوچار به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای تصفیه پساب‌های آلوده به فلزات سنگین پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ایزوترم جذب، بیوچار، تصفیه پساب، سینتیک، کادمیوم

مقدمه

کیفیت محصولات کشاورزی را تحت‌تأثیر قرار دهد و خطرات قابل‌توجهی برای ایمنی غذایی ایجاد کند (یزدانی و همکاران، ۱۴۰۴). آلودگی منابع آبی به فلزات سنگین یکی از چالش‌های مهم و روبه‌رشد زیست‌محیطی در دنیای امروز به شمار می‌رود و به‌ویژه در مناطق صنعتی و شهری روبه‌افزایش است. تخلیه مداوم پساب‌های صنعتی و شهری حاوی ترکیبات سمی، سبب ورود مقادیر قابل‌توجهی از آلاینده‌ها به منابع آب شده و این مسئله به یک معضل جهانی تبدیل شده است. (Mojiri and Bashir., 2022) این عناصر به دلیل پایداری، غیرقابل تجزیه بودن در محیط و قابلیت زیست‌انباشتگی در زنجیره غذایی، به طور گسترده در اکوسیستم‌ها منتشر می‌شوند و تهدیدی جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده به‌حساب می‌آیند. (Ávila et al., 2025) در بین فلزات سنگین، کادمیوم به دلیل سمیت بالا، ماندگاری طولانی در بدن و خطرات شدید برای ارگان‌های حیاتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر اساس استانداردهای بین‌المللی سازمان جهانی بهداشت و انجمن آب آمریکا، حداکثر غلظت مجاز Cd^{2+} در آب آشامیدنی نباید از حدود mg/L

در سال‌های اخیر استفاده مجدد از پساب‌های شهری و صنعتی تصفیه‌شده برای آبیاری اراضی کشاورزی اهمیت روزافزونی یافته است. با توجه به بحران کم‌آبی، بسیاری از کشورها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از پساب تصفیه‌شده به‌عنوان یک منبع آبی جایگزین بهره می‌برند؛ با این حال وجود فلزات سنگینی مانند کادمیوم در این پساب‌ها می‌تواند موجب آلودگی خاک، ورود به بافت گیاه و انتقال به زنجیره غذایی گردد. مطالعات نشان می‌دهد که حضور مقادیر حتی اندک کادمیوم در آب آبیاری می‌تواند سلامت خاک و

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، ایران

(نویسندگان مسئول: *f.abiyar@ardakan.ac.ir & **ssoltani@ardakan.ac.ir)

DOI: [10.22034/ijid.2026.579942.2681](https://doi.org/10.22034/ijid.2026.579942.2681)

۰/۰۰۵ تجاوز کند تا از آسیب‌های بهداشتی جلوگیری شود (Shemy et al., 2025). قرار گرفتن انسان در معرض Cd^{2+} با پیامدهای زیان‌بار متعددی همراه است؛ این فلز می‌تواند از طریق آب، غذا و هوا وارد بدن شده و در بافت‌ها تجمع یابد و منجر به آسیب به کلیه‌ها و کبد، اختلالات اسکلتی مشابه بیماری ایتای - ایتای، افزایش خطر سرطان، مشکلات ریوی و اختلال در سیستم تولیدمثلی گردد (Satarug et al., 2010; et al., 2021). افزون بر این، حضور کادمیوم حتی در غلظت‌های پایین می‌تواند موجب اختلال در زنجیره غذایی آبزیان و کاهش تنوع زیستی شود؛ از این‌رو حذف این یون از آب‌ها و پساب‌های صنعتی پیش از ورود به محیط‌زیست امری ضروری محسوب می‌شود. برای حذف فلزات سنگین از پساب‌ها، روش‌های متعددی از جمله ته‌نشینی شیمیایی، تبادل یونی، فیلتراسیون غشایی، فرایندهای الکتروشیمیایی و روش‌های اکسیداسیون پیشرفته توسعه یافته‌اند. با این حال بسیاری از این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی نظیر هزینه بالا، تولید لجن‌های خطرناک، پیچیدگی عملیاتی و کارایی پایین در غلظت‌های کم آلاینده هستند (Mojiri and Bashir, 2022; azam et al., 2021). در مقابل، فرایند جذب سطحی به‌عنوان یکی از کارآمدترین، ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای حذف آلاینده‌های یونی، توجه گسترده‌ای را در تحقیقات دانشگاهی و کاربردهای صنعتی به خود جلب کرده است (Andrzejewska et al., 2007). با وجود مزایای متعدد فرایند جذب سطحی، این روش با محدودیت‌هایی نیز همراه است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به اشباع تدریجی سطح جذب، نیاز به بازایی یا دفع جذب مصرف‌شده و کاهش کارایی در برخی شرایط عملیاتی اشاره کرد. با این حال، استفاده از جاذب‌های زیستی ارزان‌قیمت و در دسترس می‌تواند بسیاری از این چالش‌ها را کاهش دهد و امکان بهره‌برداری اقتصادی از این روش را در مقیاس‌های بزرگ فراهم سازد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به توسعه جاذب‌هایی معطوف شده است که علاوه بر کارایی بالا، از مواد اولیه فراوان، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست تولید شوند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پسماندهای کشاورزی، زیست‌توده‌ها و بیو جاذب‌های طبیعی می‌توانند عملکرد مناسبی در حذف یون‌های فلزی از محیط‌های آبی داشته باشند. به‌عنوان مثال، استفاده از برگ گیاه ارغوان به‌عنوان بیو جاذب، توانایی مطلوبی در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی نشان داده و داده‌های جذبی آن از مدل ایزوترمی لانگمویر تبعیت کرده است (نبی‌بهدندی و همکاران، ۱۳۸۷). همچنین در یک مطالعه مروری، استفاده از زائادات کشاورزی به‌عنوان جاذب زیستی برای حذف کادمیوم و کروم از پساب‌های صنعتی، روشی کم‌هزینه، در دسترس و سازگار با محیط‌زیست معرفی شد (طیبیان و همکاران، ۱۳۹۱). علاوه بر این، استفاده از جلبک اسپیروژیر به‌عنوان بیو جاذب توانست راندمان بالایی

در حذف کادمیوم از محیط‌های آبی ایجاد کند و رفتار جذب آن از مدل سینتیکی شبه‌مرتبه دوم پیروی نماید (صیادی اناری و شکری، ۱۳۹۶). در کنار بیو جاذب‌های طبیعی، نانوجاذب‌ها و جاذب‌های اصلاح‌شده نیز در حذف فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. (زنگی‌آبادی و یزدان‌پناه، ۱۳۹۹) با بررسی جاذب‌های آلی و نانواکسیدهای فلزی گزارش کردند که جاذب‌های آلی ظرفیت جذب بیشتری برای کادمیوم و روی داشته، درحالی‌که نانواکسیدهای فلزی با سرعت بیشتری به شرایط تعادل رسیدند.

همچنین (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۴) نشان دادند که نانواکسید آلومینیوم گاما می‌تواند به‌عنوان جاذبی مؤثر در حذف کادمیوم از محیط‌های آبی عمل کند و فرایند جذب آن از مدل سینتیکی شبه‌مرتبه دوم تبعیت می‌کند. باوجود کارایی مناسب این جاذب‌ها، هزینه تولید برخی نانومواد و محدودیت‌های بهره‌برداری در مقیاس وسیع، ضرورت توسعه جاذب‌های ارزان‌تر و پایدارتر را برجسته ساخته است. یکی از رویکردهای نوین و مؤثر در این زمینه، استفاده از زغال زیستی (بیوچار) است که از پیرولیز زیست‌توده تولید می‌شود. بیوچار به دلیل هزینه کم، دسترسی آسان، سازگاری با محیط‌زیست، ساختار متخلخل و وجود گروه‌های عاملی فعال نظیر هیدروکسیل، کربوکسیل و آمینی، توانایی بالایی در جذب یون‌های فلزی دارد و گزینه‌ای مطلوب برای تصفیه پساب‌ها به شمار می‌رود (azam et al., 2021; Bayar et al., 2024; Cheng et al., 2020). در همین راستا، (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۹) گزارش کردند که بیوچار مهندسی‌شده با کیتوسان نسبت به بیوچار خام و زیست‌توده اولیه، ظرفیت جذب بسیار بیشتری برای کادمیوم داشته و مدل لانگمویر و سینتیک شبه‌مرتبه دوم بهترین توصیف را از رفتار جذبی ارائه داده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های سطحی و اصلاح ساختاری بیوچار می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش ظرفیت جذب فلزات سنگین داشته باشد؛ بنابراین، توسعه روش‌های کارآمد برای حذف یون‌های فلزی از پساب پیش از استفاده مجدد در کشاورزی، ضرورتی اساسی در مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. تحلیل دقیق عملکرد جاذب بیوچار مستلزم بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته آنالیز دستگاهی است. طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) برای تعیین دقیق غلظت عناصر فلزی در نمونه‌ها با حساسیت بالا به کار می‌رود (Ritgen et al., 2023). al., 2023). بررسی ویژگی‌های بافتی و تخلخل بیوچار، از جمله تعیین مساحت سطح ویژه، حجم و توزیع منافذ، از طریق تحلیل BET صورت می‌گیرد که نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی عملکرد جاذب دارد (Naderi et al., 2015). علاوه بر این، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اطلاعات جامعی درباره مورفولوژی سطح و توپوگرافی ذرات ارائه می‌دهد (Ali et al., 2023; Davies et al., 2022). مجموعه این روش‌ها امکان درک عمیق‌تر مکانیزم‌های حاکم بر حذف فلزات سنگین را فراهم می‌سازد. باوجود پیشرفت‌های متعدد،

میلی لیتری ایزوله و در دمای محیط $25 \pm 2^\circ \text{C}$ انجام شد. در سری دوم آزمایش‌ها، باهدف انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای و بررسی کارایی ذاتی جاذب در دوز پایین، مقدار بیوچار به $0/01$ گرم کاهش یافت و در 50 میلی لیتر از محلول‌های 50 ، 100 ، 150 و 200 میلی گرم بر لیتر کادمیوم مورد استفاده قرار گرفت. این سری نیز در همان زمان‌های تماس (30 تا 240 دقیقه) و دمای محیط انجام شد تا امکان مقایسه مستقیم عملکرد جاذب در شرایط دوز بالا و پایین فراهم گردد (سلیمیان و همکاران، 1401). در تمامی مراحل، نمونه‌ها بر روی شیکر آزمایشگاهی قرار گرفتند. پس از پایان زمان تماس، نمونه‌های حاوی بیوچار از طریق فیلتراسیون با استفاده از کاغذ صافی جداسازی شدند. محلول صاف‌شده جهت آنالیز غلظت جمع‌آوری گردید و جاذب‌های استفاده‌شده پس از خشک‌شدن، جهت آزمون‌های ساختاری نگهداری شدند.

دستگاه‌ها و روش‌های مشخصه‌یابی جاذب

به‌منظور درک دقیق ساختار و ویژگی‌های سطحی بیوچار، مجموعه‌ای از آزمون‌های مشخصه‌یابی فیزیکی و شیمیایی به کار گرفته شد. جهت بررسی مورفولوژی سطح و توزیع ذرات بیوچار، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی با استفاده از دستگاه مدل Philips XI30 انجام گرفت. تصاویر ثبت‌شده امکان شناسایی جزئیات مورفولوژیکی در مقیاس میکرو را فراهم نمود. شکل (۲). برای تکمیل این آنالیز و شناسایی ترکیب عنصری سطح جاذب، از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS) کوپل شده با دستگاه SEM استفاده گردید. همچنین سطح ویژه و تخلخل بیوچار با استفاده از روش Brunauer–Emmett–Teller (BET) بر اساس ایزوترم جذب گاز نیتروژن در دمای مایع نیتروژن تعیین گردید. نمونه‌ها ابتدا تحت شرایط خلأ پیش خشک شدند و سپس ظرفیت تک‌لایه و مساحت سطح محاسبه گردید (Sinha et al., 2019). برای شناسایی گروه‌های عاملی فعال موجود بر سطح بیوچار که در فرایند جذب نقش دارند، از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه استفاده شد. طیف‌ها در محدوده عدد موج 400 تا 4000 cm^{-1} با استفاده از قرص‌های KBr انجام گرفت. به‌منظور بررسی ساختار کریستالی و شناسایی فازهای معدنی موجود در ساختار بیوچار، از آنالیز پراش پرتو ایکس استفاده شد. الگوهای پراش با استفاده از منبع تابش $\text{Cu} - K\alpha$ در محدوده زاویه‌ای (2θ) مشخصی ثبت گردید. ابن آنالیز توسط دستگاه D8 Advance از شرکت Bruker آلمان واقع در آزمایشگاه دانشگاه یزد انجام شد. غلظت نهایی یون‌های کادمیوم در محلول‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) مدل SavantAA (ساخت شرکت GBC، استرالیا) اندازه‌گیری شد. ظرفیت جذب فلز سنگین (q_t) و راندمان یا درصد حذف (E) توسط جاذب بیوچار با استفاده از معادلات (۱) و (۲) محاسبه گردید:

سیاری از جاذب‌های تجاری همچنان هزینه‌بر بوده و استفاده از آن‌ها در مقیاس وسیع اقتصادی نیست. از این رو توسعه جاذب‌هایی ارزان، کارآمد، پایدار و دارای ظرفیت جذب بالا برای استفاده در سیستم‌های تصفیه پساب ضروری به نظر می‌رسد. براین اساس، پژوهش حاضر باهدف بررسی و ارزیابی کارایی بیوچار به‌عنوان یک جاذب زیستی کم‌هزینه و پرتوان در حذف یون کادمیوم از محلول‌های آبی انجام شد. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر pH محلول، زمان تماس، غلظت اولیه یون فلزی و مقدار جاذب بر فرایند جذب بررسی گردید. همچنین داده‌های حاصل با استفاده از مدل‌های ایزوترمی و سینتیکی تحلیل شد تا رفتار تعادلی و مکانیزم غالب جذب مشخص گردد. انتظار می‌رود بیوچار بتواند به‌عنوان جاذبی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست، ظرفیت مناسبی در حذف یون Cd^{2+} از محیط‌های آبی نشان دهد و زمینه‌ای مناسب برای کاربردهای گسترده‌تر در تصفیه پساب فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی و آماده‌سازی جاذب

در این پژوهش، به‌منظور حذف یون‌های کادمیوم از محلول‌های آبی، از بیوچار به‌صورت تجاری استفاده گردید. این ماده بدون انجام هیچ‌گونه پیش تیمار شیمیایی به‌عنوان جاذب پایه در آزمایش‌ها به کار رفت. جهت تهیه محلول‌های آلوده به کادمیوم، از نمک نیترات کادمیوم چهار به $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ با درجه خلوص تحلیلی، جرم مولکولی $308/48 \text{ g/mol}$ و سهم جرمی کادمیوم برابر با $36/46\%$ ، به‌عنوان منبع یون Cd^{2+} استفاده شد. محلول‌های استاندارد با غلظت‌های موردنیاز بر حسب کادمیوم عنصر تهیه شدند. بدین منظور، مقادیر محاسبه‌شده از نمک نیترات کادمیوم با استفاده از ترازوی آنالیتیک با دقت $0/0001$ وزن‌کشی شد. مقادیر وزن شده ابتدا در حجم کمی از آب مقطر دیونیزه حل گردید و سپس به بالن ژوژه منتقل شده و حجم نهایی با آب مقطر دیونیزه تا خط نشانه تنظیم گردید. محلول‌های تهیه‌شده در ظروف پلی‌اتیلنی ایزوله، دور از نور مستقیم و در دمای محیط (25°C) ذخیره گردیدند.

طراحی آزمایش‌های جذب ناپیوسته

آزمایش‌های جذب یون کادمیوم توسط بیوچار در سیستم ناپیوسته و تحت شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی صورت گرفت. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار مستقل انجام شدند. در سری نخست آزمایش‌ها، تأثیر زمان تماس و غلظت اولیه کادمیوم ارزیابی شد. برای این منظور، چهار زمان تماس 30 ، 60 ، 120 و 240 دقیقه و دو غلظت اولیه 100 و 200 میلی گرم بر لیتر انتخاب گردید. مقدار دوز جاذب بیوچار $0/5$ گرم در 50 میلی لیتر محلول تعیین شد. آزمایش‌ها در ارلن‌های 100

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)v}{w} \quad (1)$$

$$E = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

در این روابط، q_t ظرفیت جذب (برحسب mg/g)، C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه و نهایی کادمیوم در زمان t (برحسب mg/L)، w جرم جاذب بیوچار (برحسب g) و v حجم محلول (برحسب L) می باشد. به منظور تجزیه و تحلیل دقیق داده های تجربی، مدل سازی ریاضی ایزوترم ها و سینتیک های جذب، از نرم افزار تخصصی OriginPro 2024 استفاده گردید. تمامی برازش های خطی و غیرخطی و استخراج شاخص های آماری نظیر ضریب تبیین (R^2) در این بستر انجام پذیرفت (Meng et al., 2025).

نتایج و بحث

در این بخش، داده های تجربی حاصل از فرایند جذب یون های کادمیوم Cd^{+2} توسط جاذب بیوچار به صورت نظام مند تحلیل می شوند. تمرکز اصلی این بخش بر ارزیابی عملکرد این جاذب از نظر ظرفیت جذب، راندمان حذف، رفتار سینتیکی و ترمودینامیکی است. بدین منظور، علاوه بر بررسی مقادیر تعادلی جذب تحت تأثیر متغیرهای عملیاتی (دوز جاذب و غلظت آلاینده)، مدل های ایزوترمی و سینتیکی مناسب به داده های تجربی برازش داده شده اند تا مکانیسم های کنترل کننده فرایند، از جمله نقش انتقال جرم و واکنش های سطحی مشخص گردد. در نهایت، با استفاده از آزمون های آماری دقیق، تکرارپذیری و پایایی داده ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

خصوصیات فیزیکی و بافتی بیوچار

ویژگی های بافتی و تخلخل جاذب، نقش تعیین کننده ای در دسترسی آلاینده ها به سایت های فعال و ظرفیت نهایی جذب ایفا می کنند. بر اساس آنالیز BET، پارامترهای فیزیکی بیوچار مورد استفاده در این پژوهش تعیین گردید جدول (۱). نتایج نشان می دهد که بیوچار دارای مساحت سطح ویژه $12/37 \text{ m}^2/\text{g}$ است. باوجود اینکه این مقدار در مقایسه با نانوساختارهای مهندسی شده عدد کمتری است، اما همراهی آن با قطر متوسط حفره های بسیار بزرگ $5/2164 \text{ nm}$ و حجم کل حفره قابل توجه $2/8344 \text{ cm}^3/\text{g}$ نشان دهنده وجود یک شبکه درشت متخلخل گسترده در ساختار این ماده است. این معماری باز و درشت حفره، مقاومت در برابر انتقال جرم را به حداقل رسانده و مسیرهای نفوذ سریعی را برای انتقال یون های کادمیوم از فاز محلول به لایه های داخلی جاذب فراهم می آورد. شکل (۱).

بازده حذف و ظرفیت جذب یون کادمیوم

عملکرد بیوچار در حذف یون کادمیوم از محلول های آبی با غلظت های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر (ppm) در دو دوز عملیاتی کاملاً متفاوت (۰/۵ و ۰/۱ گرم) ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی مقایسه ای در جدول (۲) تجمیع شده است تا درک عمیق تری از پویایی جذب در شرایط مختلف فراهم گردد.

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و بافتی جاذب بیوچار

جاذب	مساحت سطح ویژه m^2/g	متوسط قطر حفره ها Nm	حجم کل حفره ها cm^3/g
بیوچار	۱۲/۳۷	۵/۲۱۶۴	۲/۸۳۴۴

جدول ۲- مقایسه راندمان حذف و ظرفیت جذب بیوچار در غلظت ها و دوزهای مختلف

دوز بیوچار	غلظت اولیه کادمیوم	درصد حذف %	ظرفیت جذب تعادلی (mg/g)
۰/۵ گرم	۱۰۰ ppm	۹۸/۹۳	۹/۸۹
۰/۵ گرم	۲۰۰ ppm	۹۹/۴۷	۱۹/۸۹
۰/۰۱ گرم	۱۰۰ ppm	۹۸/۷۳	۴۹۳/۶۸
۰/۰۱ گرم	۲۰۰ ppm	۹۹/۲۷	۹۹۲/۷۴

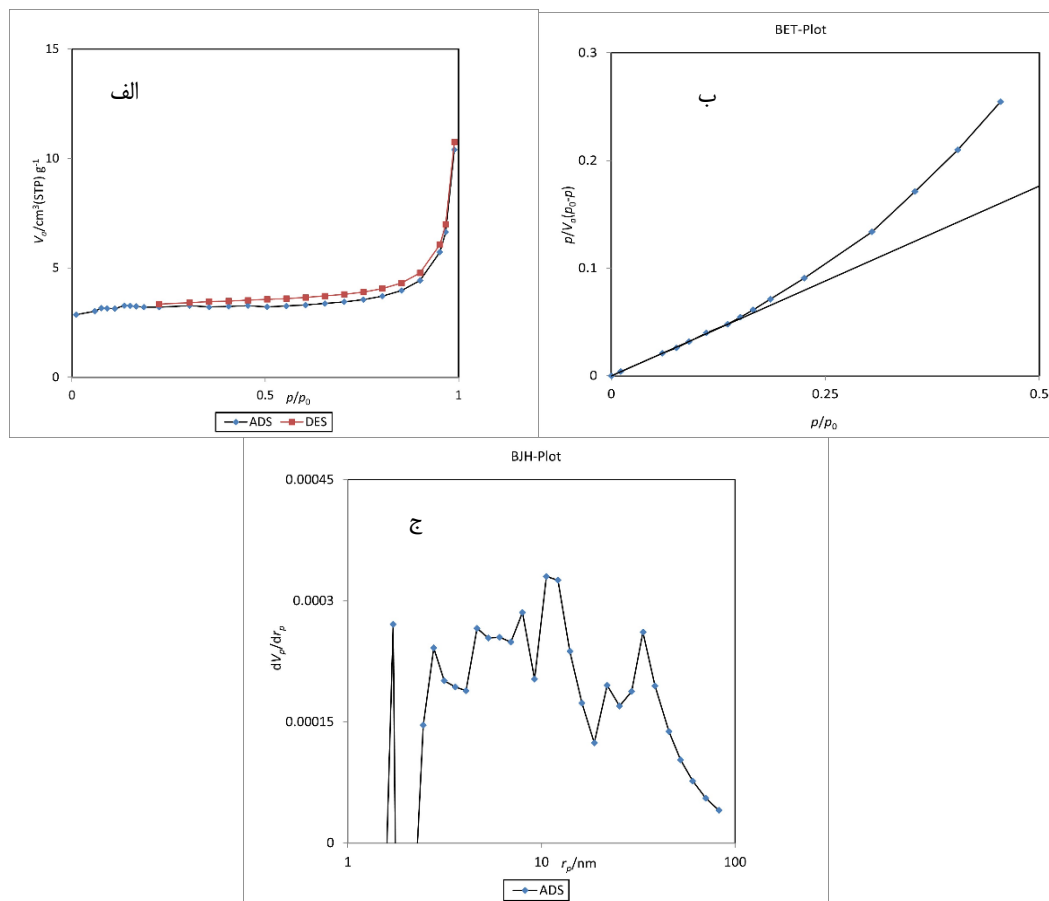
تحلیل رفتار جذب در دوز ۰/۵ گرم

همان طور که داده ها نشان می دهند، در دوز ۰/۵ گرم، بیوچار قادر است بیش از ۹۸٪ کادمیوم را از محیط آبی حذف نماید. با افزایش غلظت از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده حذف از ۹۸/۹۳٪ به

۹۹/۴۷٪ افزایش یافته است. این پدیده حاکی از آن است که در غلظت های بالاتر، گرادیان غلظتی (نیروی محرکه انتقال جرم) تقویت شده و یون ها با سرعت و شدت بیشتری به سمت سطح جاذب هدایت می شوند. با این حال، ظرفیت جذب ویژه q_e در این دوز به مقادیر پایین

بدون استفاده باقی مانده و جاذب به نقطه اشباع ذاتی خود نرسیده است.

۹/۸۹ و ۱۹/۸۹ mg/g محدود شده است. این وضعیت ترمودینامیکی بیانگر آن است که به دلیل وفور شدید سایت‌های فعال نسبت به تعداد یون‌های کادمیوم موجود در محلول، بخش اعظمی از سطح بیوچار



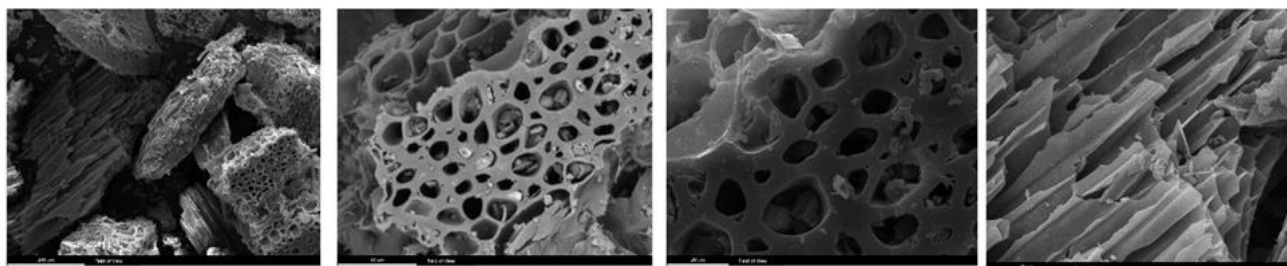
شکل ۱- پلات‌های الف: ADS-DES، ب: BET، ج: BJH جاذب بیوچار

ارزیابی مورفولوژیکی سطحی (SEM)

شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ثبت شده پیش و پس از تماس بیوچار با محلول حاوی کادمیوم، شواهد بصری قدرتمندی از وقوع فرایند جذب ارائه می‌دهند. پیش از جذب، سطح بیوچار ناهموار و دارای شبکه‌ای از خلل و فرج درشت است. این توپوگرافی سطحی، بستر هیدرولیکی مناسبی برای نفوذ سیال فراهم می‌کند. پس از فرایند جذب، تغییرات محسوسی در مورفولوژی سطح رویت می‌شود که شامل پر شدن حفرات و ایجاد یک لایه متراکم‌تر بر روی سطح ناهموار اولیه است. این دگرگونی‌های ریزساختاری ناشی از رسوب و تشکیل کمپلکس‌های کادمیوم با گروه‌های عاملی سطح بیوچار است که تأییدکننده اشغال سایت‌های فیزیکی و شیمیایی ماده می‌باشد.

تحلیل رفتار اشباع در دوز ۰/۰۱ گرم

با کاهش ۵۰ برابری جرم جاذب به ۰/۰۱ گرم، سامانه به سمت شرایط تعادلی واقعی و اشباع سایت‌ها سوق داده شد. در این حالت، رقابت شدیدی میان یون‌های کادمیوم برای دسترسی به محدود سایت‌های فعال سطح بیوچار شکل گرفت. علی‌رغم این کاهش شدید در جرم جاذب، راندمان حذف همچنان در سطوح فوق‌العاده بالا ($>98\%$) حفظ گردید. مهم‌ترین دستاورد این بخش، جهش خیره‌کننده در ظرفیت جذب بود که در غلظت ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر به مقدار بی‌نظیر ۹۹۲/۷۴ mg/g رسید. این جهش چشمگیر را می‌توان با کاهش اثر تجمع ذرات توجیه نمود؛ در دوزهای پایین، ذرات بیوچار به طور کامل در فاز مایع پراکنده شده و تمامی سطح مؤثر آن‌ها در تماس مستقیم با آلاینده قرار می‌گیرد که منجر به بهره‌وری صددرصدی از سایت‌های جذبی می‌شود.



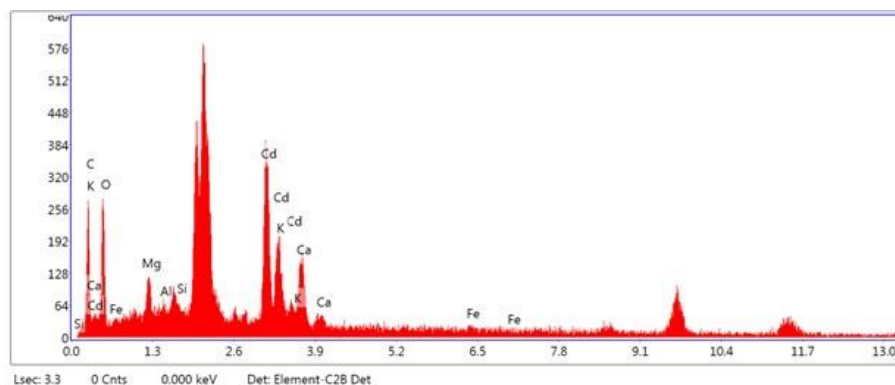
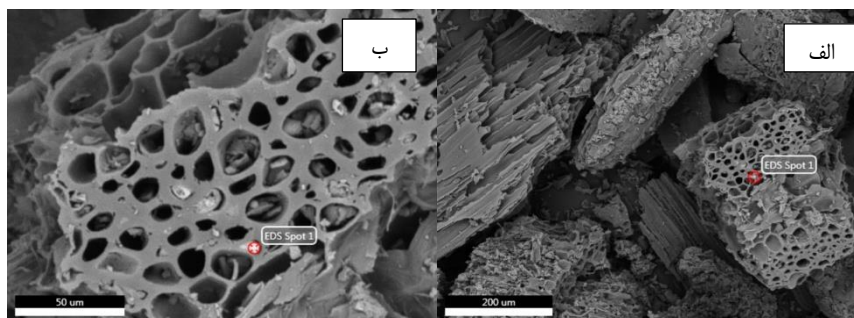
شکل ۲- تصاویر SEM جاذب بیوچار بعد از فرایند جذب

طیف FTIR بیوچار و مکانیسم جذب

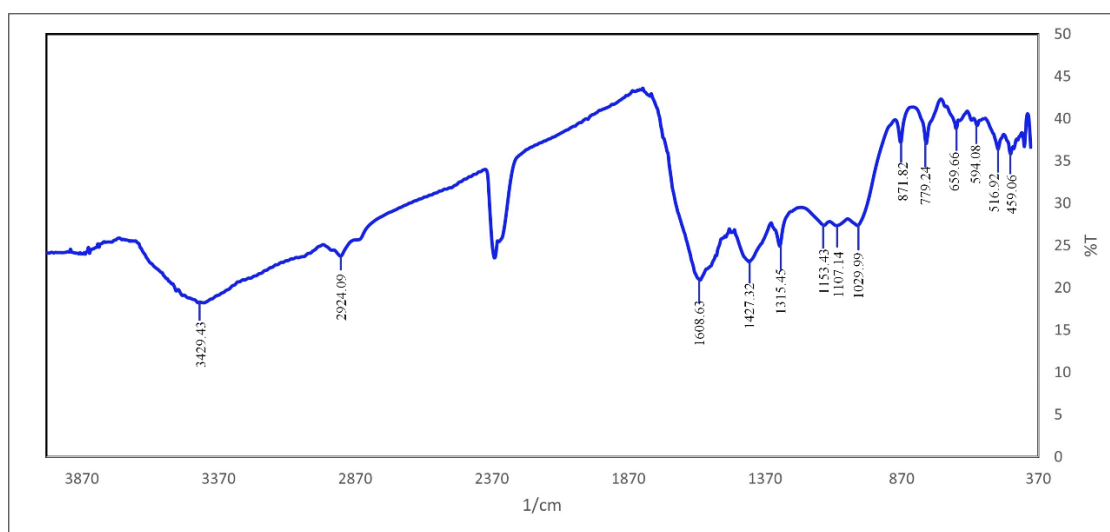
باتوجه به شکل (۴)، آنالیز طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) به منظور شناسایی گروه‌های عاملی سطح بیوچار و درک مکانیسم‌های احتمالی جذب کادمیوم انجام پذیرفت. بررسی طیف به دست آمده نشان دهنده حضور پیک پهنی در ناحیه $3429/43 \text{ cm}^{-1}$ است که به ارتعاشات کششی پیوندهای O-H نسبت داده می‌شود؛ این گروه‌ها از سایت‌های اصلی برای تشکیل پیوند و کمپلکس‌سازی با یون‌های فلزی به شمار می‌روند. همچنین، پیک مشاهده شده در $2929/09 \text{ cm}^{-1}$ نشانگر ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن پیوندهای C-H آلیفاتیک است. در ادامه طیف، حضور یک پیک تیز و قوی در $1608/63 \text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی پیوند C=C حلقه‌های آروماتیک و ارتعاشات C=O (گروه‌های کربونیل یا کربوکسیل) ارتباط دارد که این ساختارهای آروماتیک می‌توانند از طریق برهم‌کنش‌های کاتیون π - در جذب کادمیوم مؤثر باشند. علاوه بر این، ناحیه 1000 تا 1300 cm^{-1} ، به ویژه پیک $1029/99 \text{ cm}^{-1}$ ، نمایانگر ارتعاشات کششی پیوند C-O بوده و حضور گروه‌های استری، اتری، الکلی یا کربوکسیلیک اسید را روی سطح جاذب تأیید می‌کند. در نهایت، پیک‌های ظاهر شده در نواحی زیر 1000 cm^{-1} از جمله $871/82 \text{ cm}^{-1}$ و $779/24 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات خمشی خارج از صفحه C-H در ساختارهای آروماتیک و همچنین حضور ترکیبات معدنی در بخش خاکستر بیوچار هستند. به طور کلی، حضور غنی و متنوع گروه‌های عاملی اکسیژن دار (O-H، C=O و C-O) نشان دهنده قطبیت بالای سطح بیوچار و تمایل شدید آن برای واکنش با یون‌های Cd^{2+} در محلول‌های آبی است؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد که مکانیسم‌های غالب در فرایند حذف، شامل کمپلکس‌سازی سطحی بین یون‌های کادمیوم و گروه‌های عاملی اکسیژن دار، همراه با تبادل یونی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک می‌باشد.

بررسی مورفولوژی و آنالیز عنصری (SEM-EDS)

به منظور بررسی ویژگی‌های ریزساختاری سطح جاذب و تأیید حضور یون‌های کادمیوم جذب شده، از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) استفاده گردید. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، بیوچار سنتز شده دارای یک ساختار به شدت متخلخل، هتروژن و لانه زنبوری با حفرات درشت مقیاس است. این شبکه متخلخل گسترده، مسیرهای نفوذ مناسبی را برای انتقال جرم یون‌های Cd^{2+} از توده محلول به سایت‌های فعال درون حفره‌ای فراهم می‌آورد که با ظرفیت جذب استثنایی و نتایج آنالیز BET تطابق کامل دارد. برای اثبات قطعی تثبیت کادمیوم بر روی سطح جاذب، آنالیز نقطه‌ای EDS از حفرات بیوچار انجام شد. طیف EDS ارائه شده در شکل (۳)، پیک‌های شاخص و قدرتمندی از عناصر کربن و اکسیژن را نشان می‌دهد که اسکلت آلی و گروه‌های عاملی اکسیژن دار سطح بیوچار را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین یافته در این آنالیز، ظهور پیک‌های کاملاً واضح و مشخص عنصر کادمیوم Cd^{2+} در طیف است. حضور این پیک‌ها، سند مستقیمی بر موفقیت آمیز بودن فرایند جذب و به دام افتادن یون‌های Cd^{2+} در ماتریکس بیوچار است. علاوه بر این، در طیف EDS حضور عناصر معدنی دیگری نظیر پتاسیم (K)، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، سیلیکون (Si) و آهن (Fe) نیز رؤیت می‌شود. این عناصر که به طور ذاتی در ساختار خاکستر بیوچار حضور دارند، می‌توانند نقش کلیدی در مکانیسم جذب ایفا کنند. حضور این کاتیون‌ها در کنار کادمیوم جذب شده، قویاً این فرضیه را تقویت می‌کند که مکانیسم **تبادل یونی** یکی از مسیرهای اصلی در فرایند جذب بوده است؛ به نحوی که یون‌های Cd^{2+} موجود در محلول، جایگزین کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی (مانند Ca^{2+} و K^{+}) در سطح بیوچار شده‌اند. ترکیب این یافته‌ها با نتایج مدل‌سازی سینتیکی و ترمودینامیکی، تثبیت شیمیایی کادمیوم را در ساختار متخلخل بیوچار تأیید می‌نماید.



شکل ۳- تصاویر (SEM-EDS) بیوچار. الف: بزرگ‌نمایی $200\ \mu\text{m}$ ، ب: بزرگ‌نمایی $50\ \mu\text{m}$.

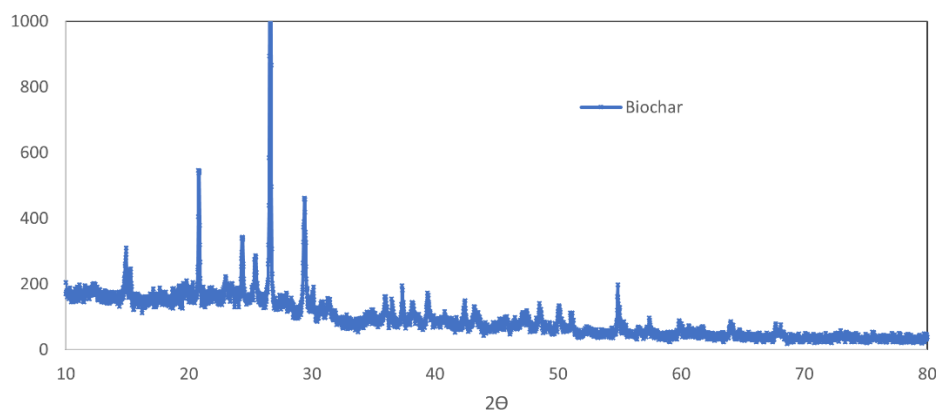


شکل ۴- طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR) جاذب بیوچار

نتیجه آنالیز XRD

الگوی پراش پرتو ایکس بیوچار در شکل (۵) نشان‌دهنده ساختاری ناهمگن متشکل از فازهای آمورف و متبلور است. پس‌زمینه نسبتاً پهن در محدوده 2θ بین ۲۰ تا ۳۰ درجه، مشخصه بارز ساختار کریستالین آمورف در شبکه بیوچار می‌باشد. در کنار این فاز بی‌شکل، حضور پیک‌های پراش تیز و با شدت بالا، به‌ویژه در زوایای 2θ

حدود $26/6^\circ$ و $29/5^\circ$ درجه، حاکی از وجود ترکیبات معدنی متبلور نظیر سیلیکات‌ها (مانند کوارتز) و کربنات‌ها در ساختار جاذب است. حضور این فازهای معدنی (خاکستر بیوچار) از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این ترکیبات می‌توانند با فراهم‌آوردن سایت‌های فعال اضافی، در مکانیسم‌های تبادل یونی و رسوب‌گذاری سطحی مشارکت کرده و ظرفیت جذب یون‌های کادمیوم را به طور قابل توجهی ارتقا دهند.



شکل ۵- آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) جاذب بیوچار

بررسی سینتیک جذب

مطالعات سینتیکی برای درک سرعت انتقال آلاینده و مکانیسم کنترل کننده فرایند (انتقال جرم فیزیکی در مقابل واکنش سطحی) انجام گرفت. در جدول (۳)، نتایج نشان داد که زمان رسیدن به تعادل، تابعی از دوز جاذب است. در دوز ۰/۵ گرم، به دلیل تراکم بالای سایت‌های در دسترس، سیستم بسیار سریع (طی ۱۵ تا ۳۰ دقیقه نخست) به حالت شبه تعادل می‌رسد. اما در دوز ۰/۱ گرم (جایی که

رقابت برای سایت‌ها بالاست)، سیستم یک‌فاز سریع اولیه (تا ۶۰ دقیقه) ناشی از جذب لایه‌مرزی را تجربه کرده و پس از آن با شیبی ملایم‌تر در حدود زمان ۱۲۰ دقیقه به شبه تعادل و در نهایتاً در ۲۴۰ دقیقه به تعادل کامل دست می‌یابد. به‌منظور تعیین دقیق مکانیسم، داده‌های سینتیکی با مدل‌های شبه‌مرتب اول، شبه‌مرتب دوم و نفوذ درون‌ذره‌ای برازش شدند.

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های سینتیکی برای جذب کادمیوم بر روی بیوچار

مدل سینتیک	پارامتر	بیوچار
شبه‌مرتب اول	$q_{e,exp}(mg/g)$	۹۹۳/۰۲
	K_1	۰/۰۰۷۱
	$q_{e,cal}(mg/g)$	۱/۱۵
	R^2	۰/۸۱
شبه‌مرتب دوم	K_2	۰/۰۱۱۲
	$q_{e,cal}(mg/g)$	۹۹۳/۱۲
	R^2	۰/۹۹
	K_{dif}	۰/۰۵۲۸
نفوذ درون‌ذره‌ای	C	۹۹۲/۲۶
	R^2	۰/۵۱

جاذب می‌باشد. عدم عبور خط روند مدل نفوذ درون‌ذره‌ای از مبدأ مختصات نیز تأیید می‌کند که نفوذ داخل حفرات تنها مکانیسم کنترل کننده نیست و مقاومت لایه‌مرزی نیز در این فرایند دخیل است.

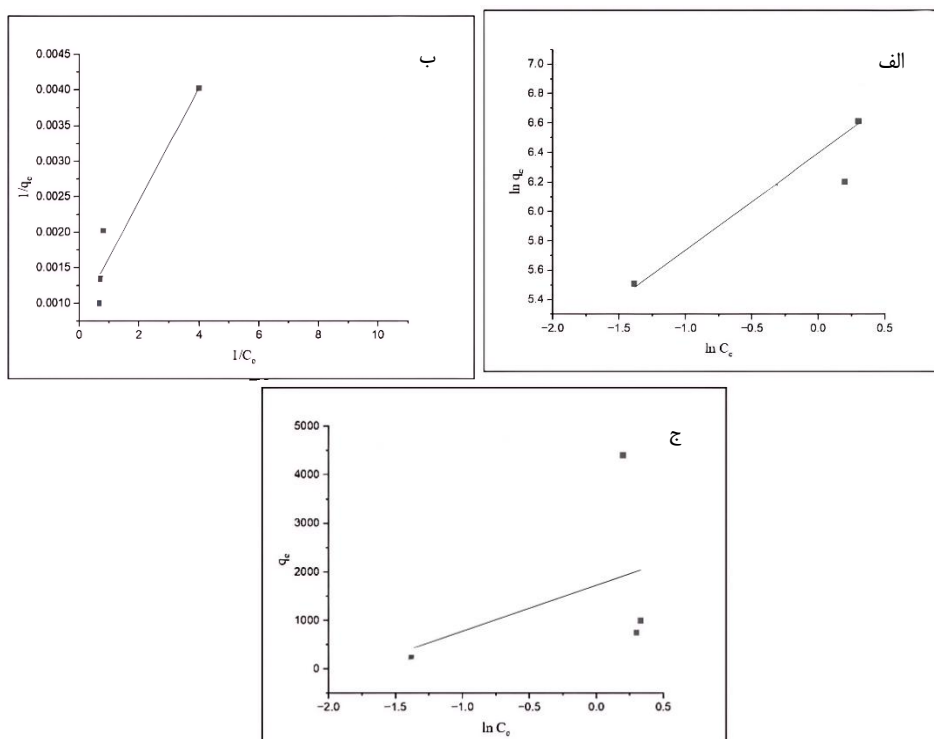
بررسی ایزوترم‌های جذب سطحی

بنا بر جدول (۴) و شکل (۶) رفتار تعادلی جذب کادمیوم بر روی بیوچار از طریق برازش داده‌ها با سه مدل ایزوترمی رایج شامل لانگمویر، فروندلیچ و تمکین ارزیابی شد.

تحلیل ضرایب تبیین (R^2) به‌وضوح نشان می‌دهد که داده‌های تجربی با مدل شبه‌مرتب دوم $R^2=0/99$ تطابق کامل دارند. همچنین مقدار ظرفیت جذب محاسبه‌شده از این مدل $q_{ecal}=993/12 mg/g$ کمترین میزان خطا را با ظرفیت تجربی $992/74 mg/g$ دارد. این انطباق قدرتمند اثبات می‌کند که گام کنترل کننده سرعت جذب یون کادمیوم بر روی بیوچار، واکنش شیمیایی سطحی است که شامل اشتراک یا تبادل الکترون بین یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی سطح

جدول ۴- پارامترهای ایزوترم‌های جذب کادمیوم توسط بیوچار

مدل	پارامتر	بیوچار
لانگمویر	q_m	۰/۱۱۷۴
	k_L	۱/۰۷۰۲
	R^2	۰/۸۷
فروندلیچ	k_F	۶۰۰/۳۹
	N	۱/۵۱
	R^2	۰/۷۴
تمکین	A_T	۶/۱۸۹۱
	b_T (kJ/mol)	۲/۶۱۲۰
	R^2	۰/۱۷



شکل ۶- برازش ایزوترم‌های، الف: لانگمویر، ب: فروندلیچ، ج: تمکین جاذب بیوچار

بیوچار در دمای استاندارد محیط (۲۹۸ K) مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه آزمایش‌های جذب به صورت هم‌دما و منحصراً در دمای ۲۵°C انجام پذیرفت، بررسی‌های ترمودینامیکی صرفاً بر تعیین تغییرات انرژی آزاد استاندارد گیبس (ΔG°) متمرکز گردید. این پارامتر به عنوان شاخص اصلی برای ارزیابی امکان‌پذیری و خودبه‌خودی بودن فرایند عمل می‌کند. مقدار ΔG° با استفاده از معادله بنیادین ترمودینامیکی شماره (۳) محاسبه شد:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (3)$$

که در این رابطه، R ثابت جهانی گازها، T دمای مطلق و K_c

مقایسه آماری نشان می‌دهد که مدل لانگمویر با ضریب تعیین بالاتر $R^2 = 0.87$ بهترین توصیف را از سیستم ارائه می‌دهد. انطباق با ایزوترم لانگمویر دلالت بر آن دارد که جذب کادمیوم به صورت تک‌لایه‌ای و بر روی سایت‌های کاملاً همگن سطح بیوچار صورت می‌گیرد و هیچ‌گونه برهم‌کنش جانبی بین مولکول‌های جذب‌شده در فاز تعادلی وجود ندارد.

ترمودینامیک جذب

در این مطالعه، رفتار ترمودینامیکی جذب یون‌های Cd^{2+} بر روی

ثابت تعادل ترمودینامیکی بدون بعد است که از داده‌های جذب استخراج شده است.

مقادیر ΔG° محاسبه شده برای سیستم جذب، به شدت منفی بودند (در محدوده $-30/46$ تا -32 KJ/mol). علامت منفی و قدرمطلق بالای ΔG° به طور قاطع تأیید می‌کند که فرایند پیوند یون‌های کادمیوم بر سطح بیوپچار، از نظر ترمودینامیکی کاملاً امکان‌پذیر بوده و در دمای اتاق به صورت کاملاً خودبه‌خودی پیش می‌رود. علاوه بر این، بزرگ بودن مقدار مطلق ΔG° (بیشتر از ۲۰ KJ/mol) تطابق کاملی با یافته‌های مدل‌سازی سینتیکی دارد و نشان می‌دهد که برهم‌کنش میان Cd^{2+} و سطح بیوپچار دارای میل ترکیبی شیمیایی بالایی است که از ویژگی‌های بارز مکانیسم شیمی جذب به شمار می‌رود.

دقت و پایایی آماری داده‌ها

برای تضمین اعتبار علمی مدل‌سازی‌های صورت گرفته، تمامی آزمایش‌های جذب بیوپچار در سه تکرار مستقل اجرا گردید. تحلیل انحراف معیار داده‌ها حاکی از تکرارپذیری استثنایی فرایند است. به عنوان نمونه، ظرفیت جذب تعادلی بیوپچار در غلظت ۱۰۰ ppm و دوز ۰/۰۱ گرم برابر با $493/85 \pm 0/8$ mg/g و در غلظت ۲۰۰ ppm با دوز ۰/۵ گرم برابر با $19/89 \pm 0/04$ mg/g ثبت گردید. این انحراف معیارهای بسیار ناچیز همگنی سایت‌های فعال سطحی بیوپچار و دقت بالای آزمایشگاهی را تأیید نموده و اعتبار استنتاج‌های عرضه شده را کاملاً تضمین می‌نماید.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف ارزیابی کارایی بیوپچار حاصل از پسماندهای کشاورزی به عنوان یک جاذب کم‌هزینه و پایدار برای حذف یون‌های سمی کادمیوم از محلول‌های آبی انجام شد. نتایج نشان داد که بیوپچار مورد مطالعه دارای ظرفیت جذب قابل توجهی برای حذف یون‌های کادمیوم بوده و در شرایط بهینه توانست راندمان حذف بالاتر از ۹۸ درصد را فراهم نماید. این یافته بیانگر قابلیت بالای بیوپچار در کاهش آلودگی فلزات سنگین و امکان استفاده از آن در فرایندهای تصفیه پساب است.

نتایج حاصل از آنالیزهای مشخصه‌یابی، نقش ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار در عملکرد جذبی آن را آشکار ساخت. آنالیز BET توسعه تخلخل‌ها و مساحت سطح ویژه مناسب بیوپچار را نشان داد که در کنار مورفولوژی ناهموار و متخلخل مشاهده شده در تصاویر SEM، بستر مناسبی برای تماس و جذب یون‌های فلزی فراهم می‌کند. همچنین، طیف‌سنجی FTIR وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار نظیر هیدروکسیل و کربوکسیل را تأیید نمود که می‌توانند در برهم‌کنش با

یون‌های کادمیوم و تشکیل کمپلکس‌های سطحی نقش مؤثری ایفا کنند.

نتایج XRD نیز حضور هم‌زمان فازهای آمورف کربنی و ترکیبات معدنی متبلور را نشان داد که احتمال مشارکت مکانیسم‌هایی نظیر تبادل یونی را تقویت می‌کند. افزون بر این، ظهور پیک مشخصه کادمیوم در آنالیز EDS پس از فرایند جذب، تثبیت موفق این فلز بر سطح بیوپچار را تأیید نمود. این نتایج با مطالعات انجام شده توسط (Liu & fan, 2018) و همچنین (khan et al., 2020) همخوانی دارد که نقش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، رسوب‌گذاری معدنی و کمپلکس‌سازی سطحی را از مهم‌ترین مکانیسم‌های حذف کادمیوم توسط بیوپچار معرفی کرده‌اند.

بررسی رفتار سینتیکی و تعادلی فرایند جذب نشان داد که داده‌های تجربی انطباق مناسبی با مدل سینتیکی شبه‌مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر دارند. تبعیت از مدل شبه‌مرتبه دوم بیانگر نقش غالب برهم‌کنش‌های شیمیایی در کنترل سرعت جذب بوده و انطباق با مدل لانگمویر نشان می‌دهد که جذب عمدتاً به صورت تک‌لایه و بر سطحی نسبتاً همگن انجام می‌شود. نتایج حاضر با یافته‌های (Goswami et al., 2016) و (Singh et al., 2023) و (li et al., 2024) مطابقت دارد که گزارش کردند جذب کادمیوم توسط انواع بیوپچار و بیوپچارهای مغناطیسی عمدتاً از مدل شبه‌مرتبه دوم تبعیت کرده و فرایند جذب تحت تأثیر برهم‌کنش‌های شیمیایی سطحی قرار دارد. همچنین، منفی بودن مقدار انرژی آزاد گیبس استاندارد (ΔG°) در پژوهش حاضر بیانگر خودبه‌خودی بودن فرایند جذب کادمیوم بر روی بیوپچار در شرایط مورد مطالعه است.

ظرفیت جذب به دست آمده در این پژوهش (حدود ۹۹۲/۷۴ میلی گرم بر گرم) نشان‌دهنده عملکرد مطلوب بیوپچار در حذف کادمیوم، حتی در دوزهای پایین جاذب، است. این ویژگی از دیدگاه عملیاتی و اقتصادی اهمیت بالایی دارد؛ زیرا کاهش مصرف جاذب می‌تواند هزینه‌های بهره‌برداری و حجم پسماند ثانویه تولیدی را کاهش دهد. در مقایسه با برخی مطالعات پیشین، ظرفیت جذب مشاهده شده در این پژوهش قابل توجه است؛ به طوری که (Komkiene & Baltreinaite, 2016) ظرفیت جذب محدودتری را برای حذف فلزات سنگین توسط بیوپچارهای حاصل از چوب گزارش کردند و (khan et al., 2020) نیز حداکثر ظرفیت جذب حدود ۴۶/۹۰ میلی گرم بر گرم را برای بیوپچار مغناطیسی اصلاح شده گزارش نمودند. تفاوت مشاهده شده را می‌توان به ویژگی‌های ساختاری بیوپچار مورد استفاده، نوع ماده اولیه، شرایط پیرولیز، توسعه سطح ویژه و فراوانی گروه‌های عاملی فعال نسبت داد. علاوه بر این، (Liu & fan, 2018) نشان دادند که افزایش دمای پیرولیز و حضور ترکیبات معدنی محلول، نقش مهمی در افزایش ظرفیت حذف کادمیوم دارند که این موضوع با نتایج حاصل از آنالیزهای ساختاری در پژوهش حاضر نیز

همخوانی دارد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیوچار به‌عنوان جاذبی مؤثر، توان بالایی در حذف کادمیوم از پساب‌های صنعتی دارد و می‌تواند کیفیت این پساب‌ها را برای باز استفاده ایمن ارتقا دهد. از سوی دیگر، باتوجه به گسترش استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده در آبیاری اراضی کشاورزی، کاهش غلظت فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم از طریق به‌کارگیری بیوچار، نه تنها به حفاظت از خاک و جلوگیری از انتقال این عناصر به گیاهان کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در ارتقای امنیت غذایی و پایداری منابع آب نیز مؤثر باشد. براین اساس، یافته‌های این تحقیق علاوه بر جنبه‌های زیست‌محیطی، دارای کاربرد بالقوه در مدیریت پساب‌های صنعتی و توسعه سامانه‌های پایدار تصفیه آب هستند.

منابع

- ابراهیمی، م.، فرخی، م.، تقوی، ک. و شیرزاد سبینی، م. ۱۳۹۴. بررسی کارایی حذف کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از نانواکسید آلومینیوم تجاری: مطالعه تعادلی سینتیکی. *مجله مهندسی بهداشت محیط*. ۲ (۳): ۱۶۶-۱۷۶.
- بید هندی، غ.ن.، آقاجانی یاسینی، آ.، زاهدی، ع. و عباسی، م. ۱۳۸۷. استفاده از بیو جاذب در حذف فلزات سنگین از پساب. *دومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد بهره‌برداری*.
- شعبانی، ح.، تقوی فردود، س.، دلاور، م. ۱۳۹۹. کارایی جذب بیوماس، بیوچار و بیوچار مهندسی شده با گاس نیشکر در حذف کادمیوم از محلول‌های آبی. *علوم آب و خاک*. ۲۴ (۱): ۱۰۷-۱۱۹.
- صیادی اناری، م.ج. و شکری، ح. ۱۳۹۶. بررسی زیست جذب فلزات سنگین کادمیوم و سرب از محیط‌های آبی با استفاده از جلبک اسپروژیر. *محیط‌شناسی*. ۴۳ (۳): ۳۷۹-۳۹۰.
- طیبیان، س.م.، ترابی، ا.، نجف‌پور، ع.ا.، علیدادی، ح. و ززولی، م.ع. ۱۳۹۱. بررسی روش‌های بیو جذب فلزات سنگین کروم و کادمیوم از پساب‌های صنعتی با استفاده از زائادات کشاورزی (مطالعه مروری). *نوید نو*، ۱۶ (۵۸): ۱-۱۴.
- زنگی‌آبادی، م. و یزدان‌پناه، ن. ۱۳۹۹. حذف فلزات سنگین روی و کادمیوم از فاضلاب صنعتی با استفاده از جاذب‌های آلی و نانواکسیدهای فلزی. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*. ۱۰ (۴): ۱۱۹-۱۳۵.
- سلیمانیان، س.، گنجی‌نوروزی، ز.، درستکار، و.، موحد نژاد، م. و رضا کاظمی، م. ۱۴۰۱. بررسی مدل‌های هم‌دمای جذب و مدل‌های سینتیکی در حذف کادمیوم از آب‌های آلوده توسط رس، زغال
- زیستی و کمپلکس آنها. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۳ (۳): ۴۸۵-۵۰۰.
- یزدانی، م.ر.، سلطانی گرد فرامرزی، س.، قاسمی، م. و آبیاری، ف. ۱۴۰۴. امکان‌سنجی حذف یون‌های شوری از پساب شور حاوی یون‌های سرب و روی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۹ (۳): ۳۹۵-۴۰۸.
- Ali, A., Zhang, N. and Santos, R.M. 2023. Mineral characterization using scanning electron microscopy (SEM): A review of the fundamentals, advancements, and research directions. *Applied Sciences*. 13 (23): 12600.
- Andrzejewska, A., Krysztafkiewicz, A. and Jesionowski, T. 2007. Treatment of textile dye wastewater using modified silica. *Dyes and Pigments*. 75 (1): 116-124.
- Avila, F.G., Cabrera-Sumba, J., Valdez-Pilataxi, S., Villalta-Chungata, J., Valdiviezo-Gonzales, L. and Alegria-Arnedo, C. 2025. Removal of heavy metals in industrial wastewater using adsorption technology: Efficiency and influencing factors. *Cleaner Engineering and Technology*. 24: 100879.
- Azam, M., Wabaidur, S.M., Khan, M.R., Al-Resayes, S.I. and Islam, M.S. 2021. Removal of chromium (III) and cadmium (II) heavy metal ions from aqueous solutions using treated date seeds: An eco-friendly method. *Molecules*. 26 (12): 3718.
- Bayar, J., Ali, N., Dong, Y., Ahmad, U., Anjum, M.M., Khan, G.R. et al. 2024. Biochar-based adsorption for heavy metal removal in water: A sustainable and cost-effective approach. *Environmental Geochemistry and Health*. 46 (11): 428.
- Cheng, S., Chen, T., Xu, W., Huang, J., Jiang, S. and Yan, B. 2020. Application research of biochar for the remediation of soil heavy metals contamination: A review. *Molecules*. 25 (14): 3167.
- Davies, T.E., Li, H., Bessette, S., Gauvin, R., Patience, G.S. and Dummer, N.F. 2022. Experimental methods in chemical engineering: Scanning electron microscopy and X-ray ultra-microscopy—SEM and XuM. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 100 (11): 3145-3159.
- Goswami, R., Shim, J., Deka, S., Kumari, D., Katak, R. and Kumar, M. 2016.

- treatment: Current and future techniques. *Water*. 14 (3): 448.
- Naderi, M. 2015. Surface area: Brunauer–Emmett–Teller (BET). In: Tarleton, S. (Ed.), *Progress in Filtration and Separation*. Academic Press. pp. 585-608.
- Ritgen, U. 2023. Atomic absorption spectroscopy (AAS). In: *Analytical Chemistry I*. Springer Berlin Heidelberg. pp. 247-253.
- Satarug, S., Garrett, S.H., Sens, M.A. and Sens, D.A. 2010. Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environmental Health Perspectives*. 118 (2): 182-190.
- Shemy, M.H., Mohamed, R.A., Abdel-Khalek, A.A., Alqhtani, H.A., Al Zoubi, W. and Abukhadra, M.R. 2025. Engineering high-performance CTAB-functionalized magnesium silicate nano-adsorbent for efficient removal of Cd^{2+} , Co^{2+} , and Cu^{2+} from single-metal aqueous solutions. *Frontiers in Chemistry*. 13: 1583305.
- Singh, V., Pant, N., Sharma, R.K., Padalia, D., Rawat, P.S., Goswami, R. et al. 2023. Adsorption studies of Pb (II) and Cd (II) heavy metal ions from aqueous solutions using a magnetic biochar composite material. *Separations*. 10 (7): 389.
- Sinha, P., Datar, A., Jeong, C., Deng, X., Chung, Y. G. and Lin, L. C. 2019. Surface area determination of porous materials using the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method: Limitations and improvements. *The Journal of Physical Chemistry C*. 123 (33): 20195-20209.
- Characterization of cadmium removal from aqueous solution by biochar produced from *Ipomoea fistulosa* at different pyrolytic temperatures. *Ecological Engineering*. 97: 444-451.
- Khan, Z.H., GAO, M., Qiu, W., Islam, M.S. and Song, Z. 2020. Mechanisms for cadmium adsorption by magnetic biochar composites in an aqueous solution. *Chemosphere*. 246: 125701.
- Komkiene, J. and Baltreinaite, E. 2016. Biochar as adsorbent for removal of heavy metal ions [cadmium (II), copper (II), lead (II), zinc (II)] from aqueous phase. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 13 (2): 471-482.
- Li, Z., Niu, R., Yu, J., Yu, L. and Cao, D. 2024. Removal of cadmium from aqueous solution by magnetic biochar: Adsorption characteristics and mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*. 31 (4): 6543-6557.
- Liu, L. and Fan, S. 2018. Removal of cadmium in aqueous solution using wheat straw biochar: Effect of minerals and mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*. 25 (9): 8688-8700.
- Meng, K., Dong, Y., Liu, J., Xie, J., Jin, Q., Lu, Y. and Lin, H. 2025. Advances in selective heavy metal removal from water using biochar: A comprehensive review of mechanisms and modifications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 13 (2): 116099.
- Mojiri, A. and Bashir, M.J. 2022. Wastewater

Investigation of Biochar as an Adsorbent for Cadmium Removal from Aqueous Solution

Z. Izadi¹, F. Abyar^{2*}, S. Soltani-Gerdefaramarzi^{3**}

Recived: May.02, 2026

Accepted: May.20, 2026

Abstract

The contamination of water resources by heavy metals, particularly cadmium, represents a severe environmental crisis due to its high toxicity and biopersistence. This research evaluates the performance of an eco-friendly biochar adsorbent for optimal cadmium ion removal from aqueous solutions. The structural and morphological characteristics of the biochar surface were investigated using Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), and X-ray Diffraction (XRD). Batch adsorption experiments were conducted at cadmium concentrations ranging from 50 to 200 mg/L with varying adsorbent doses (0.01 to 0.5 g). Residual cadmium concentrations were determined using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The biochar adsorbent demonstrated excellent performance at both investigated doses, achieving removal efficiencies exceeding 98%. Adsorption isotherm and kinetic studies revealed that the experimental data best fit the Langmuir isotherm and pseudo-second-order kinetic models, indicating that cadmium adsorption occurs as a monolayer on a homogeneous surface through chemisorption via interaction with surface functional groups. Thermodynamic analysis at 298 K yielded negative standard Gibbs free energy values ($\Delta G^\circ = -30$ to -30.46 kJ/mol), demonstrating the spontaneous nature and high feasibility of the cadmium adsorption process. Given its superior efficiency and economic viability, biochar is proposed as an effective option for treating heavy metal-contaminated wastewater.

Keywords: Adsorption isotherm, Biochar, Cadmium, Kinetics, Wastewater treatment

1- Student of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran

2- Associate Professor of Physical Chemistry, Department of Chemical Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Collage of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran

(*- Corresponding Author Email: *f.abyar@ardakan.ac.ir & **ssoltani@ardakan.ac.ir)