



فصلنامه علوم محیطی، دوره بیستم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱

۱۸۳-۲۰۴

مقاله پژوهشی

حذف فلز سنگین سرب (Pb) از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با کاربرد بیوچار تهیه شده از زایدات فضای سبز

مریم ربیعی ایبانه^۱، غلامرضا نبی بیدهندی^{۲*} و علی دریابیگی زند^۲

^۱ گروه مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

^۲ دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۱۲

ربیعی ایبانه، م.، غ. نبی بیدهندی و ع. دریابیگی زند. ۱۴۰۱. حذف فلز سنگین سرب (Pb) از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با کاربرد بیوچار تهیه شده از زایدات فضای سبز. فصلنامه علوم محیطی. ۲۰۴-(۴): ۱۸۳-۲۰۴.

سابقه و هدف: شیرابه موجود در محل دفن پسماندهای شهری، پساب بسیار سمی و خطرناکی است که معمولاً به دلیل ماهیت پیچیده به عنوان منبع بالقوه آلودگی شناخته می‌شود. فلزات سنگین از مهمترین آلاینده‌های موجود در شیرابه هستند که با ورود به زنجیره غذایی و به دلیل توانایی تجمع‌پذیری زیستی، اثرات بهداشتی خطرناکی برای انسان به دنبال خواهند داشت. پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی بیوچار تولید شده از زایدات فضای سبز شهری در جذب فلز سنگین سرب (Pb) از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری، بررسی پارامترهای موثر بر آن و مدل‌سازی سینتیک و ایزوترم واکنش‌های جذب، صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل به عنوان نمونه واقعی برای انجام آزمایش‌های جذب، مورد استفاده قرار گرفت. سرشاخه‌های هرس شده درختان شهری، جمع‌آوری و به عنوان منبع زیست توده برای ساخت بیوچار استفاده شدند. تولید بیوچار با فرآیند پیرولیز در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ماند یک ساعت، صورت گرفت. سپس مشخصات جاذب شامل سطح مخصوص (BET) و ویژگی‌های ظاهری (SEM) تعیین شدند. آزمایش‌های جذب در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت ناپیوسته انجام گرفت. تاثیر پارامترهای زمان تماس (۳۰ تا ۳۰۰ دقیقه)، مقدار بیوچار (یک تا ۵۰ گرم بر لیتر) و اندازه ذرات بیوچار (۲-۱ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر) بر جذب Pb بررسی شد و در نهایت بهترین الگوی فرآیند جذب، از طریق بررسی میزان انطباق داده‌های تجربی جذب با مدل‌های سینتیک و ایزوترم، مشخص گردید.

نتایج و بحث: آنالیز کیفیت شیمیایی نمونه شیرابه برداشت شده از محل دفن پسماندهای شهری بابل مشخص کرد که غلظت یون Pb در آن برابر با ۴/۹۴ میلی‌گرم در لیتر است. سطح ویژه BET بیوچار تولید شده از زایدات فضای سبز شهری ۲۹۲/۴۴ مترمربع به ازای هر گرم تعیین شد که نشان دهنده آن است که جاذب دارای سطح ویژه مناسبی برای جذب است. همچنین میکروگراف SEM نشان داد که بیوچار تهیه شده دارای تخلخل بالا است و سطح ناهمگنی دارد که این مساله می‌تواند قابلیت و شانس این جاذب را در جذب آلاینده افزایش دهد.

* Corresponding Author: Email Address. ghhendi@ut.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.48308/envs.2022.1206>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.4.10.5>

در مراحل بعدی، میزان جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل مورد بررسی قرار گرفت. مطابق یافته‌ها، راندمان جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با افزایش زمان تماس و افزایش نسبت بیوجار به شیرابه، افزایش می‌یابد. همچنین کاهش اندازه ذرات بیوجار موجب افزایش بازده جذب می‌شود. حداکثر راندمان جذب توسط بیوجار با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر در زمان تماس ۹۰ دقیقه و مقدار بیوجار ۲۰ گرم بر لیتر به میزان ۸۹/۰۶ درصد به دست آمد. در حالی که کاربرد بیوجار با اندازه ذرات ۶۳-۷۵ میکرومتر در شرایط زمان تماس ۱۲۰ دقیقه و مقدار بیوجار ۲۰ گرم بر لیتر، منجر به حذف کامل و ۱۰۰ درصدی یون Pb از شیرابه مورد مطالعه گردید. همچنین سینتیک شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمیر به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها جهت توصیف فرآیند جذب Pb تشخیص داده شدند.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج می‌توان اظهار نمود که روش به کار برده شده در پژوهش حاضر می‌تواند در کنار سایر روش‌های مدیریت شیرابه محل دفن پسماندهای شهری و همچنین مدیریت زایدات فضای سبز، مورد مطالعه و مقایسه قرار گیرد. همچنین مطالعات بیشتر برای بررسی امکان حذف سایر فلزات سنگین با این روش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیوجار، جذب سطحی، فلزات سنگین، پسماندهای شهری، شیرابه.

مقدمه

را ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر و حد مجاز این آلاینده در تخلیه به آب‌های سطحی و مصارف کشاورزی و آبیاری را برابر با ۱ میلی‌گرم در لیتر اعلام کرده است (Fan et al., 2020). با توجه به آثار مضر فلز سنگین Pb شامل خاصیت تجمع‌ی در بدن انسان و نیز عدم تجزیه بیولوژیکی (Sayyadian et al., 2020)، حذف این فلز سنگین از شیرابه پسماندهای شهری امری ضروری تلقی می‌شود. در حال حاضر روش‌هایی نظیر ترسیب شیمیایی، فرآیندهای بیولوژیکی، تعویض یون، فیلتراسیون غشایی، تکنیک‌های الکتروشیمیایی و غیره برای حذف فلزات سنگین از محیط آب و فاضلاب وجود دارد (Shokouhi Rad, 2020; Zarei et al., 2020). اغلب این روش‌ها دارای معایب متعدد نظیر سرمایه‌گذاری بالا و هزینه بهره‌برداری زیاد، حجم زیاد مواد مورد نیاز، سمیت مواد شیمیایی، زمان طولانی تصفیه، عدم حذف کامل آلاینده‌ها، مشکل دفع لجن، ممنوعیت در کاربردهای گسترده و محدودیت دسترسی در کشورهای در حال توسعه هستند (Iamsaard et al., 2022; Wu et al., 2022). جذب سطحی نیز یکی از روش‌های مورد استفاده در حذف فلزات سنگین است. جذب فرآیندی است که طی آن ماده‌ای که در حالت محلول قرار دارد، بر روی سطح ماده مناسب دیگری تجمع می‌یابد (Asrari and Nejabat, 2021). به طور معمول،

افزایش جمعیت و پدیده شهرنشینی در چند دهه گذشته باعث تولید روز افزون پسماندهای شهری شده است. با وجود پیشرفت‌هایی که در زمینه روش‌های مختلف دفع و بازیافت صورت گرفته، دفن پسماندها در زمین هنوز به عنوان یکی از روش‌های مطرح در سرتاسر جهان خودنمایی می‌کند (Pap et al., 2021). تولید شیرابه یکی از مشکلات عمده دفن پسماندهای شهری در زمین است. انواع آلاینده‌های آلی، معدنی و آلاینده‌های شیمیایی خطرناک ممکن است در شیرابه محل‌های دفن پسماندهای شهری وجود داشته باشند (Zhang et al., 2016). در این میان، فلزات سنگین به دلایلی نظیر سمیت زیاد، سرطان‌زایی، غیر قابل تجزیه و جهش‌زا بودن، اهمیت ویژه‌ای دارند. این فلزات از طریق منابع گوناگونی مانند استفاده از حشره‌کش‌ها، واکس‌ها، علف‌کش‌ها، باتری‌های ماشین، عایق‌ها و وسایل ساختمانی وارد پسماندهای شهری می‌شوند (Chemerys et al., 2017). سرب (Pb) یکی از مهمترین فلزات سنگین و آلاینده‌های موجود در طبیعت با سمیت و سرطان‌زایی بسیار بالا است که به طور عمده بر سیستم عصبی، گردش خون، گوارش، کلیه، قلب و عروق و سیستم تولید مثل اثر می‌گذارد (Samadi et al., 2019). سازمان بهداشت جهانی (WHO) حداکثر غلظت قابل قبول فلز سنگین Pb در آب آشامیدنی

در تحقیق دیگر (Ji *et al.*, 2022) کاربرد بیوچار حاصل از ساقه قارچ گوش چوب را برای جذب Pb از نمونه‌های آبی در حضور یون‌های بالقوه مزاحم مورد ارزیابی قرار دادند. مطابق یافته‌ها، زمان تماس بهینه به منظور به دست آوردن بیشترین کارایی جذب برابر با ۴۸۰ دقیقه به دست آمد. این در حالی است که در حضور یون مزاحم کادمیوم (Cd) زمان تماس بیشتری برای جذب مقدار مشابه Pb نیاز است (۷۲۰ دقیقه). (Ahmadi *et al.*, 2020) بیوچار ساخته شده از هسته زیتون را برای جذب Pb از فاضلاب سنتتیک به کار برده و تاثیر زمان تماس و مقدار جاذب بر بازدهی جذب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج جذب نشان داد که مقدار ۳۱ تا ۷۱ درصد از Pb در ۴۸۰ دقیقه از زمان شروع آزمایش توسط بیوچار جذب می‌شود و میزان بهینه جاذب برای بیوچار هسته زیتون مقدار چهار گرم در لیتر است. همچنین (Sakhiya *et al.*, 2022) تاثیر دمای پیرولیز (۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) بر کارایی بیوچار تولید شده از کاه برنج در جذب Pb از محیط آبی را بررسی کرده و بیان داشتند که افزایش دما طی فرآیند پیرولیز سبب افزایش خلل و فرج در بیوچار شده و جذب Pb از محیط آبی را به طور معناداری افزایش می‌دهد.

شهرستان بابل پرجمعیت‌ترین شهرستان استان مازندران و دومین شهرستان پرجمعیت شمال ایران است. روزانه حدود ۲۵۰ تن پسماندهای شهری از سطح شهرستان بابل جمع‌آوری می‌شود. این زایدات توسط ماشین‌های حمل پسماند به ایستگاه انتقال برده شده و از آنجا با تریلرهای مخصوص به مرکز دفن پسماند شهرداری بابل (انجیل‌سی) منتقل و دفع می‌گردند. همچنین به طور متوسط سالیانه ۱۰ هزار تن زایدات فضای سبز شهری شامل حجم گسترده‌ای از سرشاخه‌های هرس شده درختان و درختچه‌ها از سطح شهرستان بابل جمع‌آوری و به محل دفن انجیل‌سی منتقل می‌شود (Babol Municipality, 2019). تاکنون هیچ برنامه مدونی جهت ساماندهی و مدیریت زایدات پارک‌ها، بوستان‌ها و فضاهای سبز شهری

فرآیند جذب سطحی بر روی جاذب‌هایی انجام می‌شود که ظرفیت و سطح جذب بالایی دارد (Nobari *et al.*, 2019). مزایای جذب سطحی در مقایسه با روش‌های متداول حذف فلزات سنگین شامل خاصیت جذب بالا، قابلیت احیای جاذب و بازیافت فلزات، بالا بودن سرعت فرآیند و عدم تولید لجن است (Cho *et al.*, 2019; Hanandeh *et al.*, 2021). از این رو، تحقیقات گسترده‌ای به منظور بالا بردن ظرفیت جذب و در نتیجه افزایش کارایی جذب، در حال انجام است (Abdelfattah *et al.*, 2016; Unugul and Nigiz, 2020).

زغال زیستی (بیوچار) یک جاذب بالقوه و محصول غنی از کربن است که از تجزیه زیست توده در اثر حرارت دادن در شرایط کم یا بدون اکسیژن تولید می‌شود (Tomczyk *et al.*, 2020). بیوچار ماده‌ای با تخلخل و سطح ویژه بالا است که گروه‌های عاملی فراوانی داشته و در جذب سطحی فلزات سنگین به ویژه در محیط‌های آبی بسیار موثر است (Nguyen *et al.*, 2022). به همین دلیل اخیراً استفاده از بیوچار به عنوان یک جاذب کارآمد و به عنوان یک راهکار جدید برای تصفیه آب و فاضلاب، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است.

به عنوان مثال (Yu and He, 2018) در پژوهشی به بررسی جذب فلز سنگین Pb از محلول‌های آبی توسط بیوچار تهیه شده از پوست میوه دارابی و مطالعه اثر زمان تماس و pH محلول پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان جذب بعد از ۲۱۰ دقیقه از زمان شروع آزمایش به دست می‌آید. مقدار جذب با افزایش pH محلول تا حدود سه افزایش و سپس بدون تغییر باقی می‌ماند. (Karimi *et al.*, 2018) مطالعه‌ای را با هدف جذب Pb از آب‌های آلوده به وسیله کلاله ذرت به عنوان بیوجاذب در شرایط آزمایشگاهی انجام دادند. یافته‌های به دست آمده مشخص کرد که جاذب کلاله ذرت به دلیل داشتن سطح موثر بالا، ماکزیمم ظرفیت جذب بالا و سینتیک سریع واکنش، جاذبی موثر در جذب آلاینده Pb از محیط‌های آبی است.

در بابل اجرا نشده است و کلیه زایدات بدون در نظر گرفتن خسارات محیط‌زیستی ایجاد شده و نیز بدون در نظر گرفتن ارزش اقتصادی این زایدات، با استفاده از روش‌های سنتی نظیر انتقال به لندفیل، دفن می‌گردند که این امر هزینه‌های اقتصادی زیادی نیز جهت دفن به دنبال داشته است.

استفاده از بیوچار تهیه شده از زایدات فضای سبز شهری به عنوان جاذب کارآمد، نه تنها می‌تواند در کنار سایر روش‌های مدیریت شیرابه محل دفن پسماندهای شهری برای حذف آلاینده‌های فلزات سنگین و کنترل عوامل بیماری‌زا و کاهش مخاطرات بهداشتی ناشی از آن به کار برده شود، بلکه می‌تواند به عنوان راهکاری برای مدیریت پسماند فضای سبز نیز مورد مطالعه و مقایسه قرار گیرد. از سوی دیگر، به رغم اطلاعات زیادی که در خصوص توانایی جذب فلزات سنگین از طریق بیوچار وجود دارد، اغلب این مطالعات در شرایط مصنوعی و با استفاده از محلول‌های سنتتیک صورت پذیرفته و امکان‌سنجی جذب فلزات سنگین در شرایط طبیعی و پساب‌های آلوده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، تعیین کارایی بیوچار تهیه شده از زایدات فضای سبز شهری در جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل و بررسی اثر عوامل موثر بر فرآیند، شامل زمان تماس، دوز و اندازه ذرات بیوچار و تعیین بهترین مدل سینتیکی و ایزوترمی جذب سطحی است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری

بابل

در پژوهش حاضر، شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل به عنوان محلول جذب مورد استفاده قرار می‌گیرد. روزانه حدود ۲۵۰ تن پسماندهای شهری از سطح شهرستان بابل جمع‌آوری می‌شود. به طور متوسط

اجزای تشکیل دهنده پسماندهای شهری بابل شامل ۶۵/۳ درصد مواد فسادپذیر، ۸/۷ درصد کاغذ و مقوا، ۷/۳ درصد پلاستیک، ۲/۳ درصد فلزات غیر آهنی، ۱/۸ درصد فلزات آهنی، ۱/۲ درصد شیشه، ۱/۲ درصد چوب، ۱/۱ درصد PET، ۱/۱ درصد منسوجات، ۰/۵ درصد لاستیک و ۹/۵ درصد متفرقه است. وجود درصد بالای مواد فسادپذیر (۶۵/۳ درصد) در ترکیب پسماندهای شهرستان بابل، منجر به تولید روزانه حدود ۱۲۵ مترمکعب شیرابه در مرکز دفن انجیل سی می‌شود (Babol Municipality, 2019). پس از جمع‌آوری شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل، نمونه‌ها بلافاصله توسط ظروف پلی‌اتیلنی مخصوص به آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری نانو دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران منتقل و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. حداکثر تا سه روز بعد از انتقال نمونه‌ها، آزمایش‌های مرتبط بر روی آنها انجام گرفت تا از بروز هر گونه تغییرات شیمیایی و زیستی احتمالی جلوگیری شود.

تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شیرابه شامل pH، EC، فلزات سنگین، BOD و COD بر اساس روش‌های استاندارد آزمایش آب و فاضلاب (APHA, 2005) صورت گرفت. میزان pH و EC نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های pH متر مدل sensION1 و EC متر مدل sensION5 ساخت شرکت HACH تعیین شد. به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین، ابتدا مراحل فیلتراسیون و هضم بر روی نمونه‌ها انجام شد و سپس غلظت عناصر فلزی توسط دستگاه ICP-OES مدل VISTA-MPX مورد آنالیز قرار گرفت. غلظت COD با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری DR5000 ساخت شرکت HACH قرائت گردید. همچنین میزان BOD نمونه‌ها نیز به روش رفلکس اندازه‌گیری شد.

آماده‌سازی و تهیه بیوچار

یکی از مهم‌ترین اقداماتی که جهت حفظ پاکیزگی و

گرفته شود. خرده‌های چوب در کوره قرار داده شدند و دمای آنها با میزان ثابت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در هر دقیقه افزایش یافت تا اینکه دما به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد. کل زمان کربنیزه کردن یک ساعت بود. در پایان، نمونه‌های کربونیزه شده از کوره برداشته شده و در دمای اتاق خنک شدند (شکل ۱). برای جلوگیری از جذب رطوبت، بیوچارهای تهیه شده تا قبل از انجام آزمایش‌های جذب در دسیکاتور نگهداری شدند. در نهایت تعیین سطح مخصوص و ویژگی‌های ظاهری بیوچارهای تهیه شده به ترتیب با استفاده از دستگاه TriStar II Plus و دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل FESEM TESCAN MIRA3 XMU صورت گرفت.



(ب)
(b)

ایمنی بوستان‌ها و فضاهای سبز شهری بابل صورت می‌گیرد، حذف علف‌های هرز، چمن‌زنی و هرس کردن درختان و بوته‌ها است. این امر باعث تولید سالیانه حدود ۱۰ هزار تن پسماند فضای سبز شهری در بابل می‌شود (Babol Municipality, 2019). سرشاخه‌های هرس شده درختان شهری به عنوان منبع زیست توده برای ساخت بیوچار در این پژوهش انتخاب شدند. به منظور حذف آلودگی‌ها از روی سطح این مواد، سرشاخه‌ها چندین بار با آب مقطر شستشو داده شده و در هوای محیط خشک شدند. برای آماده‌سازی بیوچار، ابتدا سرشاخه‌ها به قطعات کوچک خرد شده و در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شده تا خشک شوند و رطوبت آنها



(الف)
(a)

شکل ۱- بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری؛ (الف): اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و (ب): ۶۳-۷۵ میکرومتر
Fig. 1- Prepared biochars from woody pruning residues; a) biochar with particle size of 1-2 mm and b) biochar with particle size of 63-75 μ m

بهینه بین فلز سنگین و بیوچار، محلول‌های سینتیک و ایزوترم بر روی شیکر با سرعت ۱۲۰ rpm در دمای محیط اختلاط پیدا کردند. بعد از پایان زمان اختلاط، مخلوط به دست آمده برای ۱۵ دقیقه در سرعت ۶۰۰۰ rpm جهت جدا شدن فاز مایع و جامد، سانتریفیوژ شد و پس از عبور نمونه‌ها از صافی، غلظت Pb باقی مانده مورد آنالیز قرار گرفت. راندمان و ظرفیت جذب Pb به ترتیب با استفاده از معادلات (۱) و (۲) محاسبه شد.

آزمایش‌های جذب

این مطالعه از نوع تجربی است و در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت ناپیوسته با استفاده از ارلن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری انجام گرفته است. فاکتورهای بهره‌برداری شامل زمان تماس، دوز بیوچار و اندازه ذرات بیوچار در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفتند. میزان غلظت Pb موجود در نمونه شیرابه به عنوان غلظت اولیه فلز سنگین در نظر گرفته شد. به منظور فراهم آوردن فعل و انفعال

تمام مراحل آزمایش برای پی بردن به خطاهای احتمالی در دو مرحله انجام و از میانگین اعداد استفاده شد. بنابراین نمونه‌های مورد آزمایش با توجه به بهینه بودن پارامترها و تکرار آزمایش‌ها تعداد ۸۴ نمونه است. نرم‌افزار SPSS18 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

مدل‌سازی سینتیک و ایزوترم جذب

مهمترین مساله در مدل‌سازی انتقال و انتشار آلودگی و همچنین سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب، یافتن معادله حاکم بر پدیده جذب در شرایط مختلف است (Zarei et al., 2020). در مطالعات سینتیک و تعادلی، مدل‌های مختلف موجود به داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شده و بهترین آنها به عنوان معادله حاکم انتخاب می‌شوند. در پژوهش حاضر، مدل‌سازی فرآیند سینتیک جذب با کاربرد سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم و میزان انطباق داده‌های تجربی تعادل جذب با مدل‌های ایزوترم جذب لانگمیر، فرنرندلیچ و تمکین مورد بررسی قرار گرفت. فرم خطی، منحنی رسم و پارامترهای مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی مذکور در جدول ۱ آورده شده است. همچنین ضریب همبستگی (R^2) برای نشان دادن این موضوع که تا چه اندازه معادله رگرسیونی نمونه‌ها، داده‌ها را به نیکویی برازش می‌کند، استفاده خواهد شد.

$$R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

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

در معادلات (۱) و (۲) پارامترهای R راندمان جذب (%)، q_e ظرفیت جذب در واحد جرم جاذب (mg g^{-1})، C_0 غلظت اولیه آلاینده (mg L^{-1})، C_e غلظت ثانویه آلاینده (mg L^{-1})، M جرم جاذب (g) و V حجم نمونه (L) است (Ahmadi et al., 2020).

به منظور کنترل اثر اندازه ذرات، دامنه اندازه ذرات بیوچار با عبور ذرات از الک به میزان ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر محدود گردید. جهت تعیین زمان تماس بهینه، مقدار یک گرم از هر کدام از بیوچارها با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر، با مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر از نمونه‌های شیرابه در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰، ۲۷۰ و ۳۰۰ دقیقه تماس داده شدند. پس از تعیین زمان تماس بهینه در مرحله قبل، جهت به دست آوردن دوز بهینه بیوچار از مقادیر ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ گرم بر لیتر از هر کدام از بیوچارها با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر استفاده شد. انتخاب گستره پارامترها بر اساس بررسی سوابق تحقیق قبلی صورت گرفت.

جدول ۱- معادلات سینتیک و ایزوترم مورد استفاده برای مدل‌سازی جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط

بیوچارهای تهیه شده از زایدات فضای سبز (Esmaili et al. 2020; Pap et al., 2021)

Table 1. Kinetic and isotherm equations for adsorption of Pb in Babol landfill leachate onto pruning residues biochars (Esmaili et al. 2020; Pap et al., 2021)

پارامترها Parameters	منحنی رسم Plot	فرم خطی Linear form	مدل Model	معادله Equation
q_e و k_1	$\ln(q_e - q_t) \text{ vs. } t$	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$	سینتیک شبه مرتبه اول Pseudo first-order	(3)
q_e و k_{2p}	$\frac{t}{q_t} \text{ vs. } t$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_{2p} q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	سینتیک شبه مرتبه دوم Pseudo second-order	(4)
q_m و b	$\frac{1}{q_e} \text{ vs. } \frac{1}{C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{b q_m} \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$	ایزوترم لانگمیر Langmuir	(5)
K_f و n	$\log q_e \text{ vs. } \log C_e$	$\log q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \times \log C_e$	ایزوترم فرنرندلیچ Freundlich	(6)
b_T و A_T	$q_e \text{ vs. } \ln C_e$	$q_e = b_T \ln A_T + b_T \ln C_e$	ایزوترم تمکین Temkin	(7)

نتایج و بحث

خصوصیات شیرابه محل دفن پسماندهای شهری
بابل

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه شیرابه خام محل دفن پسماندهای شهری بابل در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، pH شیرابه در محدوده قلیایی قرار داشته و غلظت فلز سنگین Pb در آن برابر با ۴/۹۴ میلی گرم در لیتر است. سایر عناصر فلزی همراه شناسایی شده در نمونه پساب شامل نیکل (Ni) و کادمیوم (Cd) بوده که در مقایسه با عنصر Pb در غلظت کمتری حضور دارند.

در معادلات (۳) الی (۷)، پارامترهای جذب آلاینده در واحد وزن جاذب در زمان t (mg g^{-1})، مقدار آلاینده جذب شده در واحد وزن جاذب در شرایط تعادلی (mg g^{-1})، C_e غلظت آلاینده جذب شده در محلول در شرایط تعادلی (mg L^{-1})، k_1 (min^{-1}) ثابت مدل شبه مرتبه اول، K_{2p} ثابت مدل شبه مرتبه دوم ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)، q_m ثابت مدل لانگمیر که حداکثر ظرفیت جذب را نشان می دهد (mg g^{-1})، b دیگر ثابت مدل لانگمیر که با انرژی جذب مرتبط است (L mg^{-1})، K_f و n ثابت های مدل فرندلیچ وابسته به ظرفیت و شدت جذب، b_T ثابت تمکین و شاخص گرمای جذب (J mol^{-1}) و K_T ثابت پیوندی نشان دهنده حداکثر انرژی پیوندی (L g^{-1}) هستند.

جدول ۲- آنالیز فیزیکی و شیمیایی نمونه شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل

Table 2. Physical and chemical characteristics of raw leachate collected from Babol landfill

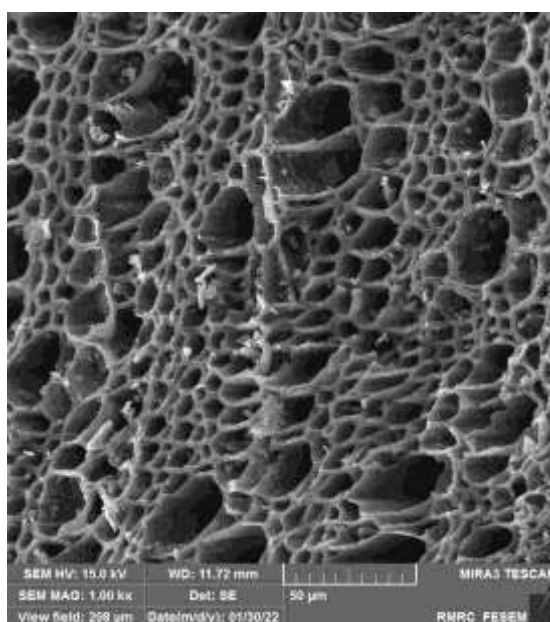
مقدار Concentration	واحد Unit	پارامتر Parameters
7.84	-	pH
33.41	میکروزیمنس بر سانتی متر $\mu\text{S cm}^{-1}$	EC
4.94	میلی گرم در لیتر mg L^{-1}	Pb
3.14	میلی گرم در لیتر mg L^{-1}	Ni
1.81	میلی گرم در لیتر mg L^{-1}	Cd
7899	میلی گرم در لیتر mg L^{-1}	BOD
15673	میلی گرم در لیتر mg L^{-1}	COD

بر گرم تعیین شد. همچنین جهت بررسی ریخت شناسی بیوپچار تهیه شده، از آنالیز SEM استفاده گردید که نتیجه آن در شکل ۲ قابل مشاهده است.

ویژگی های بیوپچار تولیدی از زایدات چوبی فضای

سبز شهری

سطح ویژه BET بیوپچار تولیدی برابر با ۲۹۲/۴۴ مترمربع



شکل ۲- تصویر SEM بیوچار تولیدی از زایدات چوبی فضای سبز شهری

Fig. 2- Scanning electron microscopy (SEM) image of biochar from woody pruning residues

بیوچارهای مشابه تولید شده از زایدات مخلوط چوبی (Aghababaei *et al.*, 2017) (۳۵۴/۰۲ متر مربع بر گرم) و چوب درخت صنوبر (۳۴۱/۰۰ مترمربع بر گرم) (Puppa *et al.*, 2020) دارای سطح تماس مشابهی است و از این نظر با آنها همخوانی دارد. تصویر SEM بیوچار حاکی از آن است که جاذب تهیه شده دارای سطح ناهمگن بوده و روزنه‌هایی در آن دیده می‌شود که می‌تواند برای جذب آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات گوناگونی نشان می‌دهند که این ساختار ناهمگن و نامنظم باعث افزایش سطح تماس و افزایش میزان جذب یون فلزی به درون جاذب می‌شود و بنابراین، نقش ویژه‌ای در توانایی جذب دارد (Nguyen *et al.*, 2022; Xiang *et al.*, 2022).

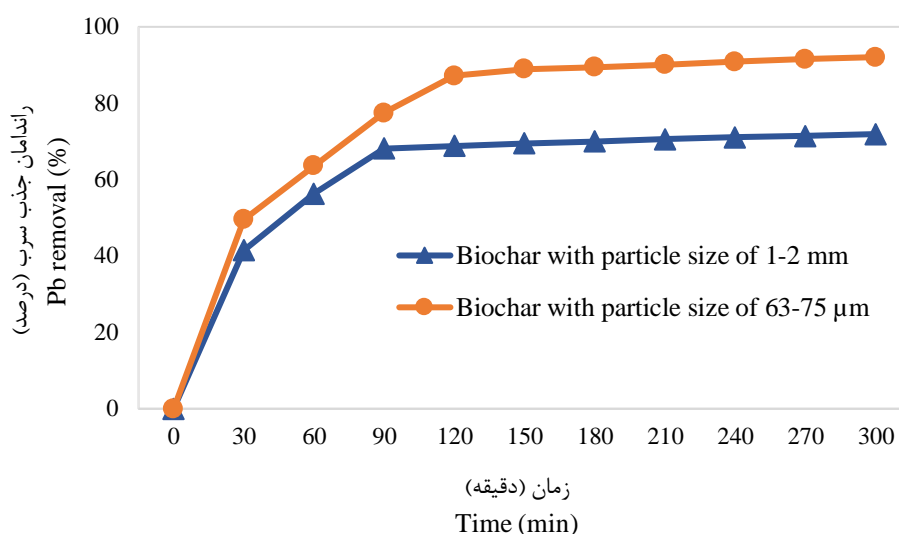
بررسی اثر زمان تماس بر جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچار تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری

نتایج حاصل از آنالیز جذب نمونه‌های شیرابه پسماندهای شهری بابل تحت تاثیر زمان‌های تماس مختلف با استفاده از بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر

یکی از مهمترین ویژگی‌های بیوچار که قبل از شروع آزمایش‌های جذب باید به آن توجه نمود، سطح ویژه جاذب است. اگر جاذب مورد استفاده سطح ویژه بالایی داشته باشد، دارای خلل و فرج بیشتری بوده و در نتیجه سطح تماس بالاتری با ماده جذب شونده خواهد داشت (Wang *et al.*, 2022). سطح ویژه بیوچار تولید شده از زایدات فضای سبز شهری در پژوهش حاضر برابر با ۲۹۲/۴۴ مترمربع بر گرم محاسبه شد که نشان دهنده آن است که جاذب از سطح ویژه و سطح تماس مناسبی برای جذب آلاینده برخوردار است. مقایسه سطح ویژه بیوچارهای تهیه شده از زایدات صنعتی و کشاورزی مانند لجن فاضلاب (۳۷/۵۷ مترمربع بر گرم) (Khaefi *et al.*, 2021)، تفاله زیتون (۸۲/۳۹ مترمربع بر گرم) (Sayyadian *et al.*, 2020)، استخوان گاو (۹۵/۹۰ مترمربع بر گرم) (Saffari *et al.*, 2022)، گل قرمز (۱۰۰/۸۰ مترمربع بر گرم) (Cho *et al.*, 2019) و فضولات طیور (۶۶/۰۷ مترمربع بر گرم) (Tomczyk *et al.*, 2020) با بیوچار تولید شده از زایدات فضای سبز شهری در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که جاذب مورد مطالعه دارای سطح تماس بیشتری است. همچنین این جاذب نسبت به

میزان تغییرات جذب بسیار اندک بوده و غلظت به حالت تعادل رسیده است. راندمان جذب در زمان‌های تماس ۳۰ دقیقه و ۱۲۰ دقیقه برای Pb به ترتیب برابر با ۴۹/۵۶ درصد و ۸۷/۲۰ درصد بوده است. بنابراین، زمان‌های تماس ۹۰ دقیقه و ۱۲۰ دقیقه به عنوان زمان تماس بهینه برای جذب فلز سنگین Pb به ترتیب توسط بیوچار با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر تعیین شدند.

در شکل ۳ آمده است. در کاربرد بیوچار با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر، با افزایش زمان تماس تا ۹۰ دقیقه میزان جذب Pb افزایش یافته است. به طوری که راندمان جذب در زمان‌های تماس ۳۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه برای Pb به ترتیب برابر با ۴۱/۵۲ درصد و ۶۸/۱۸ درصد بوده است. استفاده از بیوچار با اندازه ذرات ۶۳-۷۵ میکرومتر موجب افزایش جذب Pb تا زمان تماس ۱۲۰ دقیقه شده و پس از آن،



شکل ۳- اثر زمان تماس بر جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات گوناگون

Fig. 3- Effect of contact time on removal of Pb from Babol landfill leachate using biochars from woody pruning residues with different particle sizes

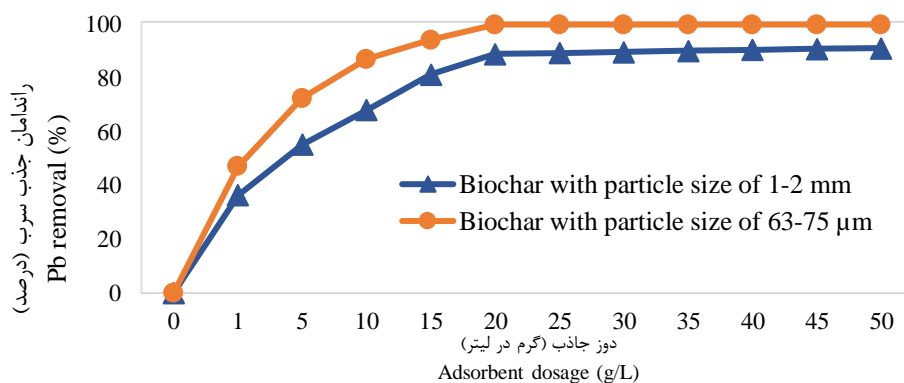
جذب Pb برابر با ۱۲۰ دقیقه است (Elkady *et al.*, 2020). یافته‌های تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش زمان تماس بین بیوچارها و شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل، راندمان جذب Pb بیشتر می‌شود که این نتیجه توسط Chand *et al.* (2015) در رابطه با جذب Pb از فاضلاب صنعت رنگ‌سازی با استفاده از بیوچار تفاله سیب تایید شده است. دلیل این امر آن است که با افزایش زمان تماس، فرصت و شانس برخورد یون‌های فلزی با ذرات بیوچار بیشتر شده و در نتیجه، راندمان جذب افزایش می‌یابد (Fan *et al.*, 2020). به این ترتیب با افزایش مدت زمان تماس، درصد جذب Pb بیشتر می‌شود تا در نهایت راندمان جذب ثابت گردد و به عبارت دیگر، تعادلی بین یون‌های فلزی جذب شده به وسیله فاز جامد

این نتایج با یافته‌های دیگر محققین همخوانی دارد. به عنوان مثال Pap *et al.* (2021) نشان دادند که جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری در منطقه شرقی بوسنی و هرزگوین بر روی بیوچار تولید شده از هسته گیلاس در مدت زمان ۴۷ دقیقه به تعادل می‌رسد که به یافته‌های حاصل در این پژوهش نزدیک است. همچنین Abdelfattah *et al.* (2016) در مطالعه جذب Pb از فاضلاب صنایع فلزی با استفاده از بیوچار پوست بادام زمینی گزارش کردند که جذب Pb بر روی جاذب مطالعه شده در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. در تحقیق دیگر که بر روی جذب Pb از فاضلاب صنایع پتروشیمی توسط جاذب حاصل از زایدات زغال سنگ انجام گرفته، مشاهده شده که زمان تماس تعادلی برای

بررسی اثر دوز جاذب بر جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچار تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری

تأثیر تغییرات مقدار دوز بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر در جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل در شکل ۴ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار بیوچار با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر، درصد جذب Pb نیز افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش دوز از یک گرم بر لیتر تا ۲۰ گرم بر لیتر، درصد جذب برای Pb از ۳۶/۴۷ درصد به ۸۹/۰۶ درصد می‌رسد. در مقادیر بالاتر از ۲۰ گرم بر لیتر، راندمان جذب ثابت باقی مانده و با افزایش دوز بیوچار، تغییری در درصد جذب مشاهده نمی‌شود. همچنین افزایش جرم بیوچار با اندازه ذرات ۶۳-۷۵ میکرومتر تا میزان ۲۰ گرم در هر لیتر شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل، منجر به جذب کامل و ۱۰۰ درصدی Pb از محیط شده است. بنابراین دوز بیوچار برابر با ۲۰ گرم بر لیتر به عنوان دوز بهینه برای جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر انتخاب شد.

و محلول در تماس با آن، ایجاد شود (Liu et al., 2019). فرآیند جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل سه مرحله مختلف را نشان می‌دهد. در مرحله اول، فرآیند جذب Pb از طریق بیوچارها بسیار سریع بوده و درصد زیادی از کل ماده جذب شده در این مرحله حاصل شده است. پس از آن در مرحله دوم، سرعت جذب Pb از طریق انواع بیوچار کاهش می‌یابد تا اینکه این میزان به حد ثابتی می‌رسد (مرحله تعادل). این یافته‌ها با مطالعه Nobari et al. (2019) در خصوص جذب Pb از پساب کارخانه مس سونگون با استفاده از جاذب هماتیت مطابقت دارد. نگارندگان در مطالعه مذکور مطرح کردند که در دقایق ابتدایی، جذب با سرعت بسیار انجام می‌شود که دلیل آن وجود تعداد زیاد مکان‌های جذب فعال در سطح بیوچار است؛ اما با افزایش زمان از سرعت جذب کاسته می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل کاهش نقاط فعال در سطح بیوچار باشد. در مراحل اولیه جذب، مکان‌های خالی بسیاری بر سطح بیوچار در دسترس است و با گذشت زمان، این مکان‌ها به وسیله یون‌های فلزی و دیگر آلاینده‌های موجود (اثر یون‌های مداخله‌گر) اشغال می‌شوند (Alsulami et al., 2022). بنابراین از سرعت جذب کاسته می‌شود و بعد از مدتی هیچ تغییری نمی‌کند. به عبارت دیگر، افزایش زمان تماس تأثیر معناداری در افزایش جذب Pb از شیرابه مورد مطالعه نخواهد داشت.



شکل ۴- اثر دوز جاذب بر جذب سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات گوناگون

Fig. 4- Effect of adsorbent dosage on removal of Pb from Babol landfill leachate using biochars from woody pruning residues with different particle sizes

سطحی شوند (Samadi *et al.*, 2019). افزایش دوز بیوچارها از حد مشخصی به بعد، تاثیری در افزایش بازده جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل نداشته است. علت این امر را می‌توان مرتبط با آن دانست که فلز سنگین Pb موجود در شیرابه در ترکیب با سایر مواد آلاینده موجود در آن بوده و این مواد به گونه‌ای به عنوان مداخله‌گر در فرآیند جذب عمل می‌نمایند. به عبارت دیگر، مقادیر اضافی مولکول‌های آلاینده جذب شده توسط بیوچارها، موجب اشباع شدن آنها و مانع از انجام کامل عمل جذب Pb در اثر ایجاد تداخل می‌شوند. چنین نتایجی توسط Hanandeh *et al.* (2021) در ارزیابی کارایی جذب Pb در حضور یون‌های مداخله‌گر Ni و Cu توسط بیوچار به دست آمده از هسته خرما نیز تایید شده است. این محققین گزارش کردند که حضور یون‌های مزاحم بر بازده جذب تاثیر قابل توجهی دارد. هر چند با افزایش دوز بیوچارها، راندمان جذب افزایش می‌یابد ولی میزان Pb جذب شده به ازای هر گرم از بیوچارها کاهش پیدا می‌کند. این روند کاهشی در ظرفیت جذب با افزایش مقدار بیوچارها، به دلیل تعداد زیاد مکان‌های غیراشباع جذب است. Zhang *et al.* (2016) گزارش کردند که با افزایش مقدار جاذب، تعداد زیادی از مکان‌های جذبی که می‌توانند در عمل جذب شرکت کنند، به دلیل محدود بودن تعداد یون‌های فلزی و دیگر آلاینده‌های موجود در شیرابه پسماندهای شهری، به صورت آزاد باقی می‌مانند و همین امر باعث کاهش مقدار جذب در واحد جرم جاذب می‌شود. بر اساس نتایج مطالعه Unugul and Nigiz (2020) یکی دیگر از دلایل کاهش میزان جذب در واحد جرم جاذب می‌تواند به این علت باشد که افزایش جرم منجر به همپوشانی مکان‌های جذب در سطوح جاذب و تجمع آنها شده که برآیند آن، کاهش سطح مفید در دسترس است. همچنین، افزایش مقدار جاذب و تجمع آنها باعث افزایش مسیر انتشار در طی مرحله انتشار آلاینده در سطوح قابل جذب شده که نتیجه آن، کاهش

در این راستا، مطالعه انجام شده توسط Shokouhi Rad (2020) نشان داده است که حداکثر جذب Pb از نمونه پساب صنعتی در شهرک صنعتی شماره یک ساری با استفاده از نانوکامپوزیت Polyaniline/Fe₃O₄ در کاربرد مقدار جاذب برابر با ۳۰ گرم در لیتر حاصل می‌شود. در پژوهش دیگر Esmaili *et al.* (2020) جذب Pb از فاضلاب صنعتی را به وسیله بیوچار صدف حلزون مورد بررسی قرار داده و دوز بهینه جاذب را برابر با ۲۰ گرم بر لیتر به دست آوردند. از سوی دیگر، Foroutan *et al.* (2019) مقدار سه گرم در لیتر از بیوچار تهیه شده از پوسته خرچنگ آبی مرده را به عنوان دوز بهینه برای جذب Pb از فاضلاب بیمارستانی معرفی کردند که با یافته‌های تحقیق حاضر متفاوت بوده و به نسبت کمتری از بیوچار برای جذب بهینه Pb نیاز داشته است. اختلاف در گزارش نتایج را می‌توان با شرایط آزمایش، خصوصیات پساب مورد مطالعه و نوع جاذب توضیح داد. همچنین لازم به ذکر است که غلظت Pb در فاضلاب بیمارستانی در پژوهش مذکور برابر با ۰/۳۲ میلی‌گرم در لیتر بوده که در مقایسه با مقدار موجود در شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل (۴/۹۴ میلی‌گرم در لیتر) بسیار کمتر است. علت افزایش راندمان جذب با افزایش مقدار جاذب آن است که با افزایش مقدار بیوچارها در شیرابه پسماندهای شهری بابل، تعداد محل‌های جذب قابل دسترس که در عملیات جذب شرکت می‌کنند، افزایش می‌یابد و امکان برخورد یون‌های فلزی موجود در شیرابه مورد مطالعه با بیوچارها بیشتر می‌شود؛ لذا به طور منطقی راندمان جذب هم بیشتر می‌شود. نتایج مشابهی در بررسی جذب Pb از نمونه آب چاه مورد استفاده برای آبیاری زمین‌های کشاورزی و سبزی‌کاری منطقه حسن آباد واقع در جنوب تهران با استفاده از زئولیت به دست آمده است. مطابق یافته‌های پژوهش مذکور با افزایش مقدار جاذب، مکان‌های فعال برای جذب آلاینده و بازده جذب افزایش می‌یابد تا زمانی که تمام یون‌های موجود در نمونه جذب

ظرفیت جذب خواهد بود (Abdullah *et al.*, 2019). بر همین اساس، تعیین دوز بهینه به منظور جلوگیری از هدر رفت جاذب بسیار مهم است.

بررسی اثر اندازه ذرات جاذب بر جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچار تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری

بررسی اثر اندازه ذرات جاذب بر جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری (شکل های ۴-۳) نشان داد که با کوچک شدن اندازه ذرات بیوچار، راندمان جذب برای Pb افزایش می یابد. کاربرد بیوچار با اندازه ذرات ۷۵-۶۳ میکرومتر با دوز ۱ گرم در لیتر در پایان زمان تماس ۳۰۰ دقیقه منجر به جذب ۹۲/۰۷ درصد Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل شده است. این در حالی است که در شرایط مشابه، بیوچار با اندازه ذرات ۲-۱ میلی متر در نهایت توانایی جذب ۷۱/۹۲ درصدی را برای Pb داشته است. بدین ترتیب اندازه بهینه ذرات بیوچار تهیه شده بر پایه زایدات چوب برای جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل برابر با ۷۵-۶۳ میکرومتر معرفی می شود.

در مطالعه‌ای که توسط Chemerys and Baltreinaite (2017) به انجام رسیده، نتایج یکسان بوده و استفاده از بیوچار ساخته شده از میوه درخت کاج با اندازه ذرات ۱ میلی متر (در مقایسه با بیوچارهای دیگر با اندازه ذرات ۲.۵، ۴ و ۵ میلی متر)، حداکثر جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری لیتوانی را به دنبال داشته است. همچنین این نتیجه توسط تحقیق Li *et al.* (2020) به تایید رسیده و با کاهش اندازه ذرات از ۴۵ میکرومتر به ۲/۳ میکرومتر، راندمان جذب Pb از پساب مورد مطالعه افزایش پیدا کرده است. چون جذب سطحی یک پدیده سطحی است، میزان جذب به نسبت مساحت سطح مخصوص جسم جاذب بستگی دارد. مساحت سطح

مخصوص عبارت است از کل مساحت سطح جاذب که در عمل جذب شرکت می کند. در این راستا Jin *et al.* (2022) عنوان داشتند که افزایش راندمان جذب آلاینده با کاهش اندازه ذرات جاذب می تواند به دلیل افزایش سطح در دسترس برای جذب در ذرات کوچکتر باشد که کارایی جذب را به وسیله جاذب افزایش می دهد. در واقع با کاهش اندازه ذرات جاذب، سطح ویژه افزایش می یابد و در نتیجه تمایل به شرکت در فعل و انفعالات شیمیایی بیشتر می شود. بنابراین می توان استنباط کرد که سطح خارجی بیوچار ساخته شده از زایدات فضای سبز شهری به عنوان سطح موثر در فرآیند جذب Pb عمل کرده و با ازدیاد سطح خارجی در اثر کاهش اندازه ذرات، مقاومت نفوذی برای جذب یون های فلزی به درون بیوچار کاهش یافته و در نتیجه شاهد افزایش راندمان جذب هستیم. همچنین Albalasmeh *et al.* (2020) گزارش کردند که تاثیر منفی فاکتورهای متفاوت نظیر طول مسیر نفوذ، مقاومت انتقال جرم و انسداد برخی از مسیرهای نفوذ در اندازه های بزرگتر، منجر به بلا استفاده ماندن سطوح داخلی ذرات در جذب شده و باعث کاهش بازده جذب می شود. به طور معمول مواد جاذب دارای خلل و فرج زیادی در سطح خود هستند و دانه های آنها نیز به شکل کروی و یا شکل های نامنظم است. در هر حال هر چه اندازه ذرات ماده جاذب کوچکتر باشد، دانه های آن نیز به شکل کروی نزدیکتر است؛ در نتیجه تماس بیشتری با حالت سیال داشته و راندمان جذب آن بیشتر خواهد بود (Han *et al.*, 2016).

سینتیکها و ایزوترمهای جذب فلز سنگین Pb از

شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل

نتایج حاصل از بررسی سینتیکهای جذب شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس بررسی ضرایب R^2 سینتیکها می توان نتیجه گرفت که سینتیک جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای

جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر، مدل لانگمیر با ضریب R^2 به ترتیب برابر با ۰/۹۶ و ۰/۹۹ است. نتایج برازش داده‌ها با مدل‌های سینتیک و ایزوترم به ترتیب در شکل‌های ۵-۶ ارایه شده است.

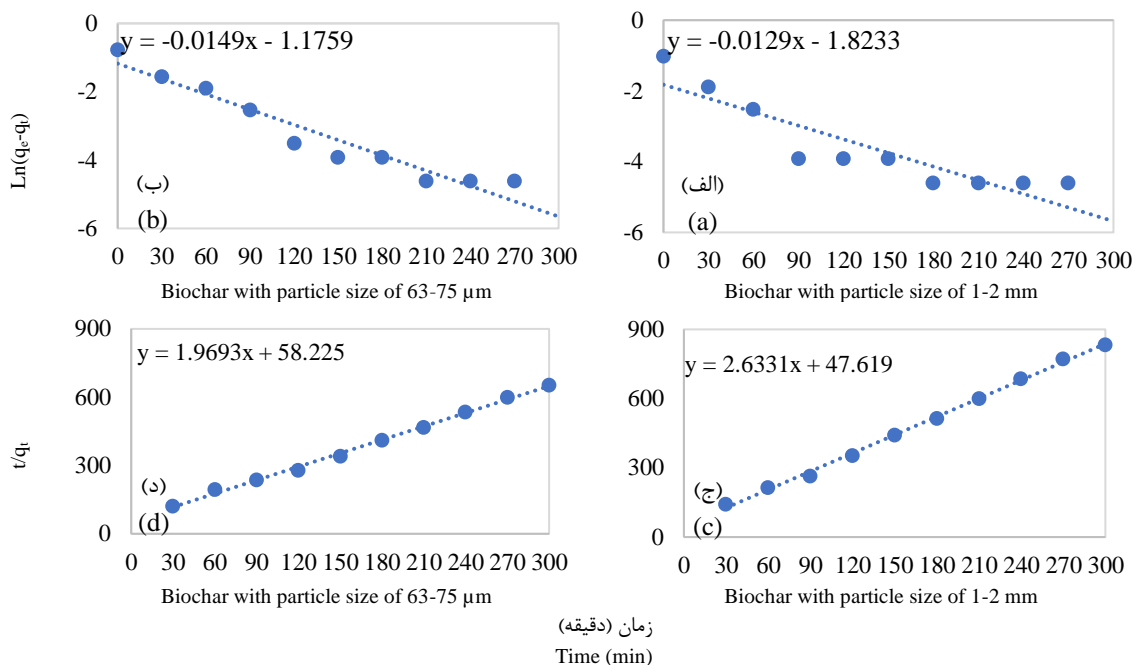
شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات چوبی فضای سبز شهری با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر و ۶۳-۷۵ میکرومتر، مطابق با سینتیک شبه مرتبه دوم بوده و ضریب R^2 آن برای هر دو بیوچار برابر با ۰/۹۹ برآورد شده است. همچنین بر اساس داده‌های ایزوترم جذب که در جدول ۴ ارایه شده، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین مدل ایزوترم برای

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های سینتیک جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات فضای سبز
Table 3. Kinetic parameters of Pb adsorption from Babol landfill leachate onto pruning residues biochars

شبه مرتبه دوم Pseudo second-order			شبه مرتبه اول Pseudo first-order			جاذب Adsorbent
R^2	k_{2p}	q_e	R^2	k_1	q_e	
0.99	0.14	0.37	0.81	0.01	0.16	بیوچار با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر Biochar with particle size of 1-2 mm
0.99	0.06	0.50	0.93	0.01	0.30	بیوچار با اندازه ذرات ۶۳-۷۵ میکرومتر Biochar with particle size of 63-75 μ m

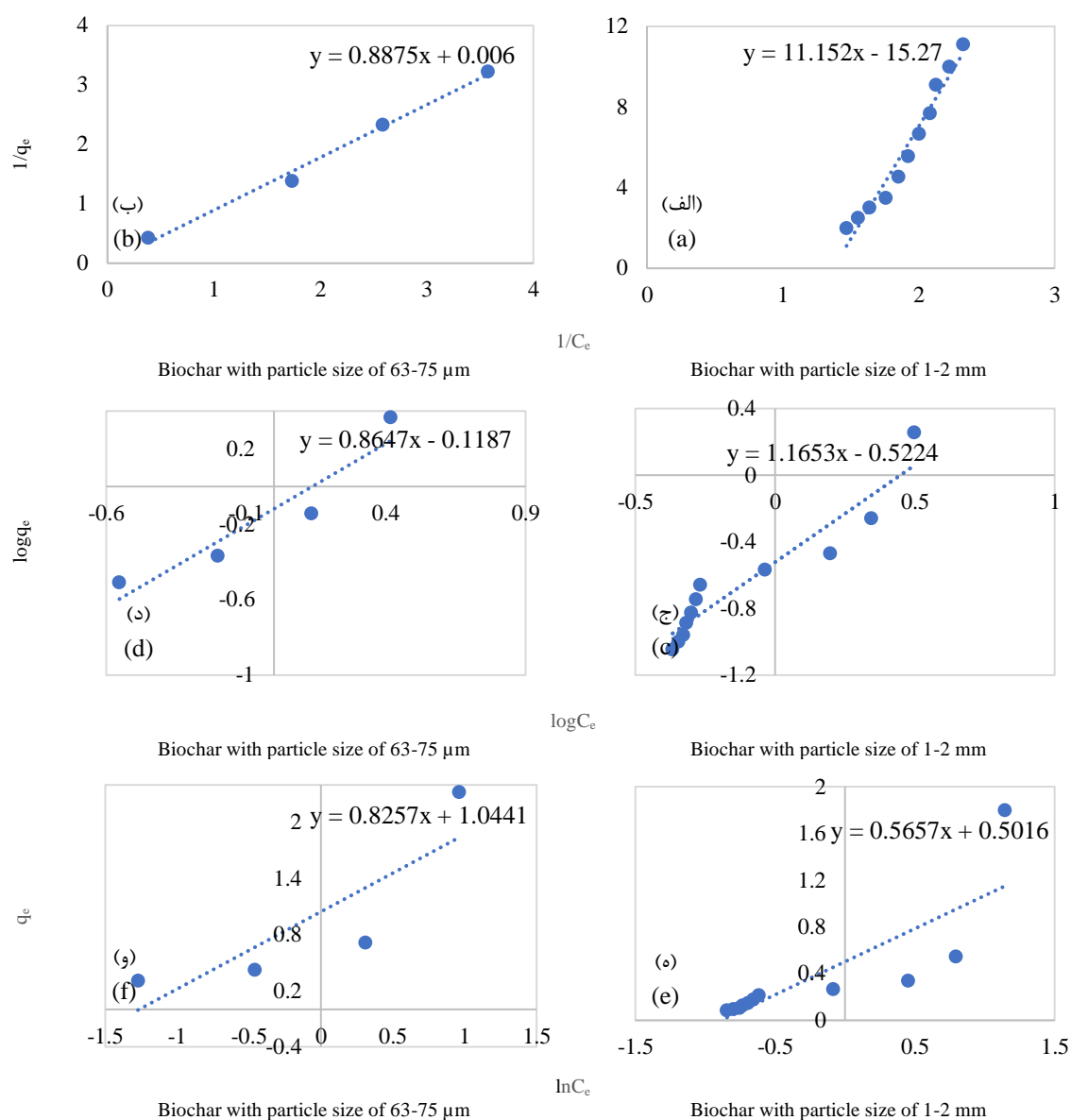
جدول ۴- پارامترهای مدل‌های ایزوترم جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات فضای سبز
Table 4. Isotherm parameters of Pb adsorption from Babol landfill leachate onto pruning residues biochar

تمکین Temkin			فرندلیچ Freundlich			لانگمیر Langmuir			جاذب Adsorbent
R^2	A_T	b_T	R^2	n	K_f	R^2	b	q_m	
0.67	2.42	0.56	0.89	0.85	0.94	0.97	-0.14	-1.71	بیوچار با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر Biochar with particle size of 1-2 mm
0.72	3.54	0.82	0.89	1.15	0.76	0.99	0.76	1.66	بیوچار با اندازه ذرات ۶۳-۷۵ میکرومتر Biochar with particle size of 63-75 μ m



شکل ۵- سینتیک جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات فضای سبز با اندازه ذرات گوناگون؛ (الف) و (ب): شبه مرتبه اول، (ج) و (د): شبه مرتبه دوم

Fig. 5- Kinetics for Pb adsorption from Babol landfill leachate onto pruning residues biochars with different particle sizes; a) and b): Pseudo First-order, c) and d): Pseudo second-order



شکل ۶- ایزوترم جذب Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل توسط بیوچارهای تهیه شده از زایدات فضای سبز با اندازه ذرات گوناگون؛ (الف) و (ب): لانگمیر، (ج) و (د): فرندلیچ، (ه) و (و) تمکین

Fig. 6- Isotherms for Pb adsorption from Babol landfill leachate onto pruning residues biochars with different particle sizes; a) and b): Langmuir, c) and d): Freundlich, e) and f): Temkin

صنعتی با کاربرد بیوچار صدف حلزون (Esmaeili *et al.*, 2020) و فاضلاب صنعت رنگ‌سازی به وسیله جاذب تفاله سیب (Chand *et al.*, 2015) مطابقت دارد و در تمامی مطالعات مذکور، داده‌های آزمایشگاهی از سینتیک شبه مرتبه اول و ایزوترم لانگمیر تبعیت می‌کنند. معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم نشان می‌دهد که جذب شیمیایی، مکانیسم غالب و کنترل‌کننده در فرآیند جذب سطحی بوده (Fathi *et al.*, 2017) و همچنین بر مبنای

در این رابطه نتایج مشابهی برای جذب Pb از پساب‌های واقعی با کاربرد جاذب‌های گوناگون گزارش شده است. الگوی جذب و شرایط حاکم بر جذب به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات صورت گرفته در جذب Pb از پساب کارخانه مس سونگون با استفاده از هماتیت (Nobari *et al.*, 2019)، نمونه پساب صنعتی شهرک صنعتی شماره یک ساری توسط نانوکامپوزیت Polyaniiline/Fe₃O₄ (Shokouhi Rad, 2020)، فاضلاب

نسبت به بیوچار با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر باشد (شکل‌های ۳-۴).

نتیجه‌گیری

مطالعه جذب فلز سنگین Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری بابل با استفاده از بیوچار تولید شده بر پایه زایدات فضای سبز شهری نشان داد که متغیرهای مختلف از جمله زمان تماس، غلظت جاذب و اندازه ذرات جاذب، تاثیر به سزایی بر راندمان جذب دارند. مطابق یافته‌ها، راندمان جذب Pb با افزایش زمان تماس و افزایش نسبت جاذب به محلول، افزایش می‌یابد. همچنین کاهش اندازه ذرات بیوچار از ۲-۱ میلی‌متر به ۷۵-۶۳ میکرومتر، بازده جذب Pb را از نمونه پساب مورد مطالعه افزایش می‌دهد. حداکثر راندمان جذب Pb در مقدار جاذب ۲۰ گرم بر لیتر، اندازه ذرات بیوچار ۷۵-۶۳ میکرومتر و در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه به میزان ۱۰۰ درصد به دست آمد. برازش مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی مشخص کرد که سینتیک شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمیر دارای ضریب رگرسیون بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها هستند و لذا فرآیند جذب Pb از مدل‌های مذکور پیروی می‌کند. استاندارد WHO برای یون Pb در آب آشامیدنی ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر و برای آب سطحی و مصارف کشاورزی و آبیاری ۱ میلی‌گرم در لیتر تعریف شده است. با توجه به حذف ۱۰۰ درصدی یون Pb از پساب مورد مطالعه، استفاده از بیوچار تهیه شده از زایدات فضای سبز شهری می‌تواند راهکار مناسبی برای جداسازی Pb از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری باشد.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه با عنوان "امکان‌سنجی استفاده از بیوچار تهیه شده از زایدات فضای سبز در جذب فلزات سنگین از شیرابه محل دفن پسماندهای شهری" در مقطع دکتری در سال ۱۴۰۱ است که با حمایت پردیس بین‌المللی کیش دانشگاه تهران اجرا شده است. نویسندگان از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح

جذب فاز جامد بیان می‌دارد که جذب شیمیایی، مرحله کند کننده فرآیند جذب سطحی است (Konczyk *et al.*, 2022). مدل لانگمیر بر اساس فرض همگن بودن سطح جاذب و یا مکان‌های جذبی یکسان استوار است. به عبارت دیگر، اگر داده‌های آزمایشگاهی همخوانی بیشتری با مدل لانگمیر داشته باشند، نشان دهنده توزیع هموزن جایگاه‌های فعال بر سطح جاذب است (Iamsaard *et al.*, 2022). در این نوع ایزوترم، یک لایه از مولکول‌های ماده حل شده، جذب سطح جاذب شده و در تمامی سطوح جاذب، مقدار انرژی جذب یکسان و پیوندهای جذب برگشت‌پذیر فرض می‌شود (Rallet *et al.*, 2022). همچنین مدل لانگمیر به در دست بودن سطح محدودی از ماده برای جذب سطحی اشاره دارد (Azari *et al.*, 2017). از آنجایی که ایزوترم لانگمیر نشان دهنده جذب تک لایه است (Asrari and Nejabat, 2021)، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جذب Pb بر روی بیوچارهای تهیه شده از زایدات فضای سبز شهری به صورت تک لایه انجام می‌شود. پارامتر q_m در ایزوترم لانگمیر که نشان دهنده مقدار یون فلزی مورد نیاز برای جذب تک لایه است (Wu *et al.*, 2022)، بیان می‌نماید که مقدار بیشتری از Pb برای تکمیل لایه‌های جذب توسط بیوچار با اندازه ذرات ۷۵-۶۳ میکرومتر مورد نیاز بوده و بنابراین ظرفیت این بیوچار برای جذب Pb بیشتر از بیوچار با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر است که این نتیجه با یافته‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی همخوانی دارد (شکل‌های ۳-۴). همچنین با توجه به اینکه مقادیر n در ایزوترم فرنرندلیچ و b_T در ایزوترم تمکین بیانگر انرژی جذب بوده (Tayebi and Navaei Diva, 2018) و مشاهده می‌گردد که انرژی جذب Pb توسط بیوچار با اندازه ذرات ۷۵-۶۳ میکرومتر بیشتر از بیوچار با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر است (جدول ۴)، بنابراین بیوچار با اندازه ذرات ۷۵-۶۳ میکرومتر، Pb را با انرژی و توان بیشتری جذب می‌کند که می‌تواند به عنوان دلیل راندمان جذب بیشتر Pb توسط این بیوچار

مدیریت محترم آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری نانو دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران، به دلیل همکاری بی‌دریغ در استفاده از امکانات آزمایشگاه، قدردانی نمایند.

پژوهشی (۹۹۰۱۲۶۴۶) که هزینه‌های اجرای این پژوهش را تامین کرده است، تشکر می‌کنند. همچنین نویسندگان لازم می‌دانند که از جناب آقای دکتر مجید بغدادی،

منابع

Abdelfattah, I., Ismail, A.A., Al Sayed, F., Almedolab, A. and Aboelghait, K.M., 2016. Biosorption of heavy metals ions in real industrial wastewater using peanut husk as efficient and cost effective adsorbent. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 6, 176-183.

Alsulami, Q.A., Hussein, M.A., Alsheheri, S.Z., Elshehy, E.A. and El-Said, W.A., 2022. Unexpected ultrafast and high adsorption performance of Ag (I) and Hg (II) ions from multiple aqueous solutions using microporous functional silica-polymer sponge-like composite. *Journal of Materials Research and Technology*. 17, 2000-2013.

Abdullah, N.H., Shameli, K., Abdullah, E.C. and Abdullah, L.C., 2019. Solid matrices for fabrication of magnetic iron oxide nanocomposites: synthesis, properties, and application for the adsorption of heavy metal ions and dyes. *Composites Part B: Engineering*. 162, 538-568.

APHA, 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA), Washington, D.C., USA.

Aghababaei, A., Ncibi, M.C. and Sillanpää, M., 2017. Optimized removal of oxytetracycline and cadmium from contaminated waters using chemically-activated and pyrolyzed biochars from forest and wood-processing residues. *Bioresource technology*. 239, 28-36.

Asrari, E. and Nejabat, M., 2021. Cadmium Elimination Feasibility Study Using Bentonite Modified Green Concrete. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 5, 153-160. (In Persian with English abstract)

Ahmadi, M., Delavar, M., Golchin, A. and Hassani, A., 2020. Lead removal from contaminated water using biochar and biomass of olive waste in batch adsorption systems: isotherms and kinetic studies. *Journal of Water and Soil Conservation*. 27, 109-126. (In Persian with English abstract)

Azari, A., Salari, M., Dehghani, M.H., Alimohammadi, M., Ghaffari, H., Sharafi, K., Shariatifar, N. and Baziar, M., 2017. Efficiency of Magnitized Graphene Oxide Nanoparticles in Removal of 2,4-Dichlorophenol from Aqueous Solution. *Journal of Mazandaran University of Medical Science*. 26, 265-281. (In Persian with English abstract)

Albalasmeh, A., Gharaibeh, M.A., Mohawesh, O., Alajlouni, M., Quzaih, M., Masad, M. and El Hanandeh, A., 2020. Characterization and Artificial Neural Networks Modelling of methylene blue adsorption of biochar derived from agricultural residues: Effect of biomass type, pyrolysis temperature, particle size. *Journal of Saudi Chemical Society*. 24, 811-823.

Babol Municipality, 2019. Integrated waste management plans of Babol. Deputy of Urban Services, Babol Municipality, Babol, Iran. (In Persian with English abstract)

Chemerys, V. and Baltrėnaitė, E., 2017. Pine-derived biochar as option for adsorption of Cu, Zn, Cr, Pb, Ni and decreasing of BOD₅ in landfill leachate. *Mokslas-Lietuvos ateitis/Science-Future of Lithuania*, 9, 406-412.

- Chand, P., Bafana, A. and Pakade, Y.B., 2015. Xanthate modified apple pomace as an adsorbent for removal of Cd (II), Ni (II) and Pb (II), and its application to real industrial wastewater. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 97, 60-66.
- Cho, D.W., Yoon, K., Ahn, Y., Sun, Y., Tsang, D.C., Hou, D., Ok, Y.S. and Song, H., 2019. Fabrication and environmental applications of multifunctional mixed metal-biochar composites (MMBC) from red mud and lignin wastes. *Journal of Hazardous Materials*. 374, 412-419.
- Elkady, M., Shokry, H. and Hamad, H., 2020. New activated carbon from mine coal for adsorption of dye in simulated water or multiple heavy metals in real wastewater. *Materials*. 13, 2498.
- Esmaeili, H., Tamjidi, S. and Abed, M., 2020. Removal of Cu (II), Co (II) and Pb (II) from synthetic and real wastewater using calcified Solamen Vaillanti snail shell. *Desalination and Water Treatment*. 174, 324-335.
- Fan, Y., Wang, H., Deng, L., Wang, Y., Kang, D., Li, C. and Chen, H., 2020. Enhanced adsorption of Pb (II) by nitrogen and phosphorus co-doped biochar derived from *Camellia oleifera* shells. *Environmental Research*. 191, 110030.
- Fathi, S., Rezei Kalantary, R., Rashidi, A. and Karbasi, A., 2017. Removal of hexavalent chromium from water by functionalized magnetic nano porous graphene (NPG/Fe₃O₄@COOH). *Journal of Environmental Studies*. 43, 135-148. (In Persian with English abstract)
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Farjadfard, S., Esmaeili, H., Saberi, M., Sahebi, S., Dobaradaran, S. and Ramavandi, B., 2019. Characteristics and performance of Cd, Ni, and Pb bio-adsorption using *Callinectes sapidus* biomass: real wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 26, 6336-6347.
- Ji, Y., Zheng, N., An, Q., Sun, S., Wang, S., Li, X., Li, P., Hua, X., Dong, D., Zhao, C. and Li, Z., 2022. The effect of carbonization temperature on the capacity and mechanisms of Cd (II)-Pb (II) mix-ions adsorption by wood ear mushroom sticks derived biochar. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 239, 113646.
- Han, Y., Cao, X., Ouyang, X., Sohi, S.P. and Chen, J., 2016. Adsorption kinetics of magnetic biochar derived from peanut hull on removal of Cr (VI) from aqueous solution: effects of production conditions and particle size. *Chemosphere*. 145, 336-341.
- Hanandeh, A.E., Mahdi, Z. and Imtiaz, M.S., 2021. Modelling of the adsorption of Pb, Cu and Ni ions from single and multi-component aqueous solutions by date seed derived biochar: Comparison of six machine learning approaches. *Environmental Research*. 192, 110338.
- Iamsaard, K., Weng, C.H., Yen, L.T., Tzeng, J.H., Poonpakdee, C. and Lin, Y.T., 2022. Adsorption of metal on pineapple leaf biochar: Key affecting factors, mechanism identification, and regeneration evaluation. *Bioresource Technology*. 344, 126131.
- Jin, Z., Xiao, S., Dong, H., Xiao, J., Tian, R., Chen, J., Li, Y. and Li, L., 2022. Adsorption and catalytic degradation of organic contaminants by biochar: Overlooked role of biochar's particle size. *Journal of Hazardous Materials*. 422, 126928.
- Karimi, Y., Marofi, S. and Zare, M.A., 2018. Removal of Lead from Polluted Water Using Corn Silk as a Cheap Biosorbent. *Journal of Health Research in Community, Mazandaran University of Medical Sciences*. 4, 35-48. (In Persian with

English abstract)

Khaefi, F., Hosseinpour, A. and Motaghian, H., 2021. Short-Term Effect of Sewage Sludge Biochar on Availability and Fractionation of Pb in a Contaminated Calcareous Soil. *Iranian Journal of Soil Research*. 34, 501-513. (In Persian with English abstract)

Kończyk, J., Kluziak, K. and Kołodyńska, D., 2022. Adsorption of vanadium (V) ions from the aqueous solutions on different biomass-derived biochars. *Journal of Environmental Management*. 313, 114958.

Li, S.Q., Yu, C., Wu, Z.X., Cai, X.Q. and Zha, F.S., 2020. Effect of Kaolin particle size on the removal of Pb (II) from aqueous solutions by Kaolin-supported nanoscale zero-valent iron. *Materials Research Express*. 7, 045002.

Liu, L., Huang, Y., Zhang, S., Gong, Y., Su, Y., Cao, J. and Hu, H., 2019. Adsorption characteristics and mechanism of Pb (II) by agricultural waste-derived biochars produced from a pilot-scale pyrolysis system. *Waste Management*. 100, 287-295.

Nguyen, B.T., Dai Dinh, G., Dong, H.P. and Le, L.B., 2022. Sodium adsorption isotherm and characterization of biochars produced from various agricultural biomass wastes. *Journal of Cleaner Production*. 346, 131250.

Nobari, S., Khodadadi Darban, A. and Jamshidi-Zanjani, A., 2019. Investigation of Lead and Copper Removal from Synthetic Sewage Sludge of Sungun Copper Plant Using Hematite Adsorbent. *Journal of Mineral Resources Engineering*. 4, 135-149. (In Persian with English abstract)

Pap, S., Boyd, K.G., Taggart, M.A. and Sekulic, M.T., 2021. Circular economy based landfill

leachate treatment with sulphur-doped microporous biochar. *Waste Management*. 124, 160-171.

Puppa, L.D., Ducouso, M., Batisse, N., Dubois, M., Verney, V., Xavier, V. and Delor-Jestin, F., 2020. Poplar wood and tea biochars for trichloroethylene remediation in pure water and contaminated groundwater. *Environmental Challenges*. 1, 100003.

Rallet, D., Paltaha, A., Tsamo, C. and Loura, B., 2022. Synthesis of clay-biochar composite for glyphosate removal from aqueous solution. *Heliyon*. 8, e09112.

Saffari, M. Moazallahi, M. and Modiri, S., 2022. Evaluation of Animal Bone and Its Bone Char Application Effects on Desorption Kinetics and Chemical forms of Nickel in a Saline Calcareous Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52, 3047-3058. (In Persian with English abstract)

Sakhiya, A.K., Vijay, V.K. and Kaushal, P., 2022. Efficacy of rice straw derived biochar for removal of Pb⁺² and Zn⁺² from aqueous: Adsorption, thermodynamic and cost analysis. *Bioresource Technology Reports*. 17, 100920.

Samadi, S., Karkhaneh, A, Moghaddamborna, M. and Zakaria, S.A., 2019. Removal of Lead (II) and cadmium ions from south Tehran wastewater using zeolite N.P./GO nanocomposites. *Journal of Applied Research in Chemistry*. 3, 61-73. (In Persian with English abstract)

Sayyadian, K., Moezi, A., Gholami, A., Panahpour, E. and Mohsen far, K., 2020. Different Biochars Production and Their Effect on Removal of Cd (II), Ni (II) and Pb(II) from Irrigation water. *Journal of Environmental Science and Technology*. 22, 51-63. (In Persian with English abstract)

Shokouhi Rad, A., 2020. The Synthesis of Polyaniline/Fe₃O₄ to Removal of Lead Ions from Water and Wastewater Samples. *Journal of Water and Wastewater*. 31, 169-183. (In Persian with English abstract)

Tayebi, H. and Navaei Diva, T., 2018. Adsorption of Cu²⁺ ions from aqueous solution using surface modification of carbon nanotubes. *Journal of Nanomaterials*. 10, 189-199. (In Persian with English abstract)

Tomczyk, A., Sokółowska, Z. and Boguta, P., 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 19, 191-215.

Unugul, T. and Nigiz, F.U., 2020. Preparation and characterization an active carbon adsorbent from waste mandarin peel and determination of adsorption behavior on removal of synthetic dye solutions. *Water, Air, and Soil Pollution*. 231, 1-14.

Wang, X., Chang, V.W.C., Li, Z., Song, Y., Li, C. and Wang, Y., 2022. Co-pyrolysis of sewage sludge and food waste digestate to synergistically improve biochar characteristics and heavy metals immobilization. *Waste Management*. 141, 231-239.

Wu, F., Chen, L., Hu, P., Zhou, X., Zhou, H., Wang, D., Lu, X. and Mi, B., 2022. Comparison of properties, adsorption performance and mechanisms to Cd (II) on lignin-derived biochars under different pyrolysis temperatures by microwave heating. *Environmental Technology*

and Innovation. 25, 102196.

Xiang, W., Zhang, X., Cao, C., Quan, G., Wang, M., Zimmerman, A.R. and Gao, B., 2022. Microwave-assisted pyrolysis derived biochar for volatile organic compounds treatment: characteristics and adsorption performance. *Bioresource Technology*. 355, 127274.

Yu, X.L. and He, Y., 2018. Optimal ranges of variables for an effective adsorption of lead (II) by the agricultural waste pomelo (*Citrus grandis*) peels using Doehlert designs. *Scientific Reports*. 8, 1-9.

Zarei, F., Marjani, A. and Hassani Joshaghani, A., 2020. Synthesis and Characterization of Novel Adsorbent Based on Mesoporous Fibrous Silica (KCC-1) for Removal of Heavy Metal from Aqueous Solution via Adsorption Approach. *Journal of Water and Wastewater*. 31, 58-72. (In Persian with English abstract)

Zhang, J., Gong, J.L., Zenga, G.M., Ou, X.M., Jiang, Y., Chang, Y.N., Guo, M., Zhang, C. and Liu, H.Y., 2016. Simultaneous removal of humic acid/fulvic acid and lead from landfill leachate using magnetic graphene oxide. *Applied Surface Science*. 370, 335-350.





Environmental Sciences Vol.20 / No.4 / Winter 2023

183-204

Original Article

Adsorption of Lead (Pb) from Landfill Leachate onto Pruning Residues Biochar

Maryam Rabiee Abyaneh,¹ Gholamreza Nabi Bidhendi^{2*} and Ali Daryabeigi Zand²

¹ Department of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran

² Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2022.06.18 Accepted: 2022.09.03

Rabiee Abyaneh, M., Nabi Bidhendi, Gh. and Daryabeigi Zand, A., 2023. Adsorption of Lead (Pb) from Landfill Leachate onto Pruning Residues Biochar. *Environmental Sciences*. 20(4): 183-204.

Introduction: Landfill leachate is a highly toxic and hazardous form of wastewater due to its complex composition characteristics. Effective removal of heavy metals from landfill leachate is of great concern due to the fact that toxic metals can seriously threaten the food chain, and therefore the human health. The main objective of this work was to study the utilizing of low-cost pruning residues in the production of biochar and its application in removal of lead (Pb) from landfill leachate.

Material and methods: Leachate produced in Babol municipal solid waste landfill was used as an adsorbent solution. Pruning residues were collected and used for biochar preparation. Biochar produced under the pyrolytic temperature of 700°C with a 1-hour retention time. The adsorption mechanism of pruning waste biochar to Pb was analyzed through BET surface area and scanning electron microscope (SEM) tests. Batch experiments were performed to study the effects of adsorption parameters on Pb removal. The influence of contact time (30-300 min), adsorbent dosage (1-50 g/L), as well as particle size (1-2 mm and 63-75 μm) was investigated. Moreover, the kinetic and isotherm models were applied to the experimental data to predict the adsorption parameters.

Results and discussion: The results obtained from the analysis of the untreated Babol landfill leachate was revealed that the Pb concentration was about 4.94 mg L⁻¹. The surface area of the produced biochar was determined to be 292.44 m² g⁻¹. SEM microstructure of the biochar showed the developed surface area with visible pores. All of these data seem to suggest a great potential for pruning residues biochar to Pb removal. The adsorption of Pb was mainly affected by contact time, adsorbent dose, and biochar particle size. Higher contact time and adsorbent dosage showed higher uptake of Pb. Whereas, the uptake of Pb ions onto pruning

* Corresponding Author: *Email Address.* ghhendi@ut.ac.ir

residues biochar was substantially reduced with increase the biochar particle size. Maximum Pb percentage removal was observed at a contact time of 90 min and with an optimum biochar dosage of 20 g L^{-1} (89.06% removal) for biochar with 1-2 mm particle size. While, biochar with particle size of 64-75 μm can removed Pb to almost 100% at a contact time of 120 min and with an optimum biochar dosage of 20 g L^{-1} . The kinetic study showed that adsorption can be well described by the pseudo-second order kinetic model. This supports the chemisorption theory behind the pseudo-second order kinetic model for the adsorption system. The results of isotherm models implied that the behaviors of the isotherms are more appropriate for the Langmuir model, showing a monolayer adsorption capacity for Pb.

Conclusion: Based on the results, it can be stated that the removal method used in the present research can be studied and compared along with other methods of landfill leachate treatment and pruning waste management. Also, further studies are recommended to investigate the possibility of removing other heavy metals with this method.

Keywords: Biochar, Adsorption, Heavy metals, Municipal waste, Leachate.

