

بررسی ایزوترم و سینتیک جذب سرب از پساب سنتتیک با استفاده از خاک اره درخت اوکالیپتوس

صادق قاسمی^۱، رویا مافی غلامی^۲

۱- دانشجوی دکترا، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، گروه محیط زیست، تهران، ایران
royagholami123@yahoo.com (نویسنده مسئول)

(دریافت ۹۵/۴/۳ پذیرش ۹۵/۸/۲۶)

چکیده

فلز سرب کاربردهای زیادی در صنایع گوناگون دارد. به دلیل سمی بودن این فلز، تخلیه پساب‌های صنعتی حاوی آن، خطرات جبران‌ناپذیری برای محیط زیست و اکوسیستم‌های زنده دارد. این پژوهش با هدف بررسی استفاده از خاک اره درخت اوکالیپتوس به‌عنوان جاذبی ارزان قیمت برای حذف سرب از پساب انجام شد. آزمایش‌ها در سیستم ناپیوسته انجام شد و تأثیر پارامترهای pH، مقدار جاذب، زمان تماس و غلظت اولیه سرب مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، حداکثر راندمان جذب سرب ۹۶/۲۵ درصد بود که در pH و زمان تماس ۷ و ۳۰ دقیقه و مقدار جاذب ۱۰ گرم در لیتر به دست آمد. با افزایش غلظت اولیه سرب مقدار فلز جذب شده و درصد حذف افزایش یافت. داده‌های این مطالعه تطابق خوبی با ایزوترم لانگمیر نشان دادند. آنالیز سینتیک نشان داد که جذب سرب با مدل سینتیکی جذب مرتبه دوم مطابقت دارد ($R^2=0/998$). با توجه به راندمان بالای حذف سرب توسط خاک اره درخت اوکالیپتوس می‌توان از این روش به‌عنوان روشی کارآمد و ارزان قیمت برای جذب سرب استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: حذف سرب، خاک اره درخت اوکالیپتوس، جذب سطحی، جاذب‌های ارزان قیمت

۱- مقدمه

فرایند تبادل یونی و جذب فیزیکی و شیمیایی در سال‌های اخیر کاربردهای فزاینده‌ای یافته است. خاک اره یک محصول جانبی است که به‌طور گسترده در صنایع چوب‌بری تولید می‌شود و خواص جذب و تبادل یونی دارد. مطالعات نشان می‌دهد که امکان استفاده از این گونه جاذب‌ها برای جذب یون‌های فلزی مختلف وجود دارد. از جمله پژوهش‌هایی که قبلاً در این زمینه انجام گرفته است، حذف فلزات سرب، کروم و کبالت از محیط آبی به‌وسیله مخلوطی از جاذب‌های خاک اره و ساقه درخت بنه، بوده است که بیشترین میزان حذف فلزات در pH، زمان تماس و مقدار جاذب بهینه برای سرب، کروم و کبالت در محلول ۱۰ ppm به ترتیب ۶۷/۴۳، ۴۶/۵۷، ۱۷/۷۰ درصد بوده است و میزان حذف فلز سرب بیشتر از دیگر فلزات است (Hashemi Sharaf Abad 2012). پژوهشی با عنوان جذب یون فلزی کبالت از محلول آبی توسط زغال فعال تهیه شده از چوب درخت انجیر، نشان داده شده است که این جاذب، ظرفیت بالایی برای حذف یون کبالت از محلول‌های آبی آلوده دارد (Miritarhan & Ghasemi 2013). در پژوهشی با

سرب فلزی سمی با هدایت الکتریکی پایین است و در غلظت‌های کم نیز می‌تواند خطرناک و سمی باشد (Sunahara et al. 2002; Malkoc & Nuhoglo 2005) اختلال‌های یادگیری و رفتاری در کودکان، صدمه به اندام‌های کبد، کلیه و قلب از پیامدهای آلودگی سرب است (Sareejalekshmi et al. 2002). یون فلز سرب عمدتاً در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شود (Davis et al. 2000). در حال حاضر روش‌های متنوعی برای کاهش آلودگی آب و خاک وجود دارد که از جمله می‌توان به روش‌هایی همچون فیلتراسیون، انعقاد، اکسیداسیون و تبادل یونی اشاره نمود (O'Connell et al. 2008). بسیاری از این روش‌ها اغلب وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و کارایی کمی دارند. امروزه روند تحقیقات در جهت یافتن روش‌های ساده و ارزان قیمتی است که با همان کارایی برای استفاده در تصفیه فاضلاب‌های آلوده به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که قادر به استفاده از روش‌های پر هزینه نیستند مناسب باشد. در بین این روش‌ها فناوری جاذب‌ها بر پایه

ساخت انگلستان) مشخص شد (APHA, AWWA, WEF, 2005). تمامی آزمایش‌ها حداقل سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها و نتایج مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به متغیر بودن پارامترهای مؤثر در پساب صنایع مختلف، محدوده انتخابی پارامترها به صورتی تنظیم شدند که گستره وسیع از شرایطی که ممکن است در پساب صنایع گوناگون به وجود آید را در برگیرد.

۲-۳- تأثیر pH بر راندمان حذف سرب

برای تعیین pH بهینه، محدوده متغیر pH با استفاده دستگاه pH سنج مدل Inolab pH 720، ساخت کشور آلمان بین ۳ تا ۱۰ انتخاب شد. پس از تنظیم pH با استفاده از اسیدکلریدریک و سود ۰/۱ گرم نرمال، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، مقدار ۰/۵ گرم جذب به ۵۰ میلی‌لیتر نمونه سرب با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر افزوده شد. پس از طی زمان ۳۰ دقیقه غلظت سرب باقیمانده تعیین شد.

۲-۴- بررسی تأثیر مقدار جذب بر راندمان حذف سرب

در این مرحله به منظور تعیین مقدار بهینه جذب، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، مقادیر ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱ میلی‌گرم در لیتر و با مقدار pH بهینه به دست آمده از مرحله اول، افزوده شد. پس از ۳۰ دقیقه زمان تماس، غلظت سرب باقیمانده در محلول تعیین شد.

۲-۵- بررسی تأثیر زمان تماس بر میزان جذب سرب

در بررسی اثر زمان، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، پس از آماده‌سازی محلول‌های ۵۰ میلی‌لیتر با غلظت اولیه سرب ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، مقادیر بهینه خاک اره و pH به دست آمده از مراحل قبل در محلول‌ها اضافه و تنظیم شد و نمونه‌ها در فواصل زمانی بین ۱۵ تا ۱۲۰ دقیقه از همزن خارج و مورد آنالیز قرار گرفتند.

۲-۶- تأثیر غلظت اولیه سرب بر راندمان حذف سرب

به منظور بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه سرب بر میزان جذب، با متغیر قرار دادن مقدار غلظت اولیه و ثابت در نظر گرفتن سایر

عنوان بررسی کارایی خاکستر چوب در حذف کادمیم از فاضلاب صنایع تولید رنگ (بینالود کرمان)، خاکستر چوب کارایی بالایی در حذف کادمیم داشته و این کارایی با افزایش میزان جذب تا ۱۰۰ گرم در لیتر فاضلاب به ۹۷ تا ۹۸ درصد رسیده است (Malakotian et al. 2005). اخیراً مواد بیولوژیکی به عنوان ابزاری ساده، مؤثر و مقرون به صرفه برای تصفیه رواناب‌ها و فاضلاب‌ها، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. خاک اره توانایی تبدیل شدن به یک فناوری کارآمد، پاک و ارزان قیمت در سیستم تصفیه را داراست، زیرا در مقایسه با دیگر جذب‌های متداول همچون کربن فعال و رزین‌های تبادل یون، ظرفیت جذب بیشتری دارد و با هزینه‌ای بسیار کم بازیابی می‌شود و همچنین دوست‌دار محیط زیست است. همچنین درخت اوکالیپتوس یک درخت گرمسیری و بومی استان خوزستان است و مقاومت زیادی در برابر کم‌آبی و رشد بسیار خوبی در مناطق گرمسیری دارد و استفاده از آن رواج چشمگیری در سال‌های اخیر در خوزستان داشته است. خاک اره این گیاه یک محصول جانبی است که به طور گسترده در صنایع چوب‌بری تولید می‌شود. به همین منظور در این پژوهش خاک اره این درخت به عنوان جذب فلز سنگین سرب مورد امکان‌سنجی و بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی جذب

بعد از تهیه خاک اره درخت اوکالیپتوس، برای همگن‌سازی ذرات از مش ۳۵ استفاده شد و سپس برای برطرف کردن گرد و غبار و دیگر آلودگی‌ها، خاک اره چندین بار با آب مقطر شسته شد و سپس در دمای ۳۰ درجه سلسیوس در آون خشک شد.

۲-۲- آماده‌سازی محلول‌های سنتتیک

از نمک نترات سرب برای ساخت محلول‌های سنتتیک استفاده شد. به این منظور ابتدا محلول ۲۵ میلی‌گرم در لیتر سرب تهیه و سپس سایر غلظت‌های سرب از رقیق‌سازی محلول اصلی آماده شد. کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده ساخت شرکت مرک^۱ بود و مراحل آزمایش در دمای ۲۰±۰/۵ درجه سلسیوس انجام شد و غلظت باقیمانده فلز توسط دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی (مدل پگی

^۱ Merck

سرب برای نشستن روی مکان‌های جذب رقابت می‌کند و میزان جذب سرب کاهش می‌یابد و در ادامه در pH بالاتر در محیط قلیایی غلظت OH^- بالاست و رسوب سرب مشاهده می‌شود و میزان جذب کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق نبی‌زاده و همکاران مطابقت دارد (Nabizadeh et al. 2005).

۲-۳- بررسی تأثیر مقدار جاذب بر میزان جذب سرب

نتایج حاصل از بررسی تأثیر مقدار جاذب بر جذب سرب در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش میزان مقدار جاذب، درصد حذف سرب توسط خاک اره درخت اوکالیپتوس افزایش می‌یابد زیرا با افزایش مقدار جاذب مقدار سطح تماس جاذب با فلز سرب و کارایی جذب افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده با پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد (Ozer et al. 2008).

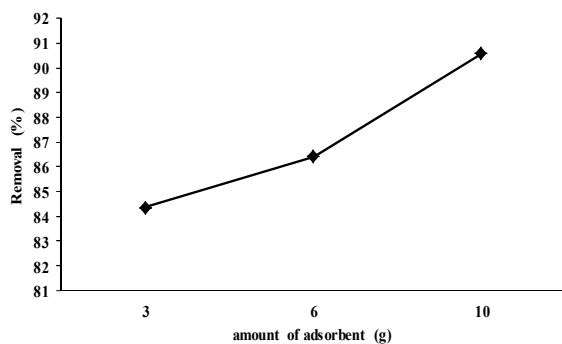


Fig.2. Impact of different adsorbents on lead removal percentage (pH=7, contact time= 30 min, initial concentration of lead= 10 mg/L)

شکل ۲- تأثیر مقدار جاذب مختلف بر درصد جذب سرب (pH=7، زمان تماس = ۳۰ دقیقه، غلظت اولیه سرب = ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر)

۳-۳- بررسی تأثیر زمان تماس بر میزان جذب سرب

نتایج حاصل از تأثیر زمان تماس بر میزان جذب سرب در شکل ۳ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصله با افزایش زمان تماس به مدت ۶۰ دقیقه، راندمان حذف افزایش می‌یابد اما با افزایش بیشتر زمان و رسیدن به زمان ۹۰ دقیقه، میزان جذب کاهش و مجدداً با افزایش زمان تماس میزان جذب افزایش می‌یابد که علت این امر، برگشت پذیر بودن فرایند جذب است که در ابتدا با گذشت زمان به دلیل آزاد بودن باندهای جذب سطح جاذب، واکنش جذب شروع می‌شود و افزایش جذب مشاهده می‌شود با گذشت زمان بیشتر (۹۰ دقیقه) به دلیل اشغال شدن بیشتر باندهای جذب سطح

پارامترها، محلول‌های ۵۰ میلی‌لیتر با غلظت‌های اولیه سرب ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر آماده و پس از تنظیم و افزودن مقدار بهینه pH و خاک اره و طی زمان تماس بهینه به دست آمده در مرحله قبل از همزن خارج و مورد آنالیز قرار گرفتند.

۲-۷- بررسی مورفولوژی ساختمان مولکولی خاک اره درخت اوکالیپتوس

در این مرحله به منظور شناسایی مورفولوژی، ساختمان مولکولی و چگونگی جذب فلز سرب بر روی خاک اره درخت اوکالیپتوس از دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مدل ایکس ال ۳۰ ساخت شرکت فیلیپس کشور هلند و طیف سنجی مادون قرمز فوریه (FTIR) مدل Perkinelmer BX-II ساخت کشور آمریکا استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر pH بر میزان جذب سرب

شکل ۱ نتایج تأثیر pH‌های مختلف بر درصد جذب را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله با افزایش pH تا ۷، راندمان حذف افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. طبق مطالعات انجام شده در pH اسیدی غلظت یون H^+ در محلول بالاست و این کاتیون با

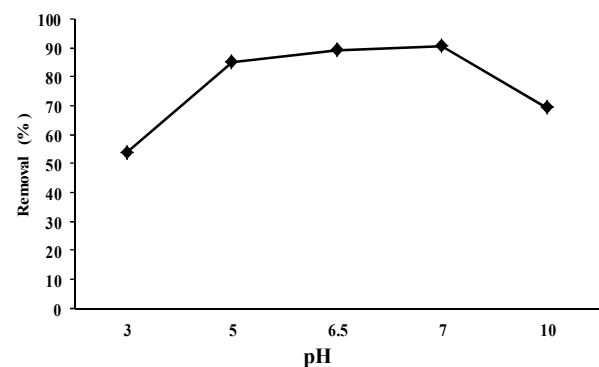


Fig.1. Impact of different pH values on lead removal percentage (amount of adsorbent=10 g/L, contact time =30 min, initial concentration of lead= 10 mg/L)

شکل ۱- تأثیر pH‌های مختلف بر درصد جذب سرب (مقدار جاذب = ۱۰ گرم در لیتر، زمان تماس = ۳۰ دقیقه، غلظت اولیه سرب = ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر)

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

حجم محلول بر حسب لیتر و W وزن ماده جاذب بر حسب گرم می‌باشد.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر غلظت اولیه سرب بر روی جذب در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه سرب، مقدار ماده جذب شده به ازای هر گرم جاذب (ظرفیت جذب) و درصد جذب افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از بیشتر بودن باندهای آزاد جاذب و باندهای تبادل یون در غلظت‌های بالای سرب باشد. علاوه بر این در سیستم‌های جذب ناپیوسته، غلظت ورودی سرب موجود در محلول نقش مهمی را به‌عنوان نیروی محرکه غلبه‌کننده بر مقاومت ناشی از انتقال جرم بین فاز مایع و جامد ایفا می‌نماید و بنابراین با افزایش غلظت سرب در محلول، ظرفیت جذب سرب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت از ۲۰ به ۲۵ میلی‌گرم در لیتر مقدار ماده جذب شده (q_e) به مقداری اندک افزایش و درصد جذب کاهش می‌یابد که نشان از اشباع شدن خاک اره دارد. نتایج به‌دست آمده با نتایج تحقیق ساکی و همکاران مطابقت دارد (Saki et al. 2013)

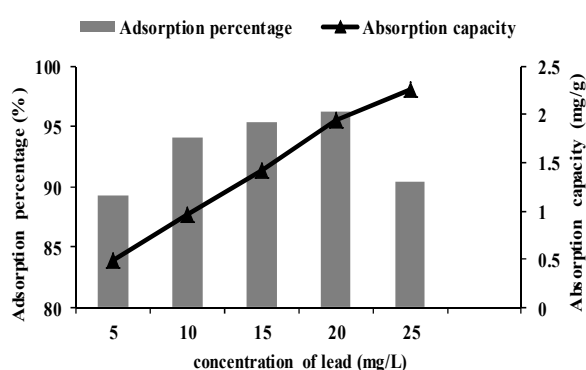


Fig.4. Impact of different initial concentrations on lead capacity and removal percentage (pH=7, amount of adsorbent=10 g/L, contact time= 30 min)

شکل ۴- تأثیر مقدار غلظت‌های اولیه متفاوت بر ظرفیت و درصد جذب سرب (pH=7، مقدار جاذب = ۱۰ گرم در لیتر، زمان تماس = ۳۰ دقیقه)

۳-۵- مطالعات ایزوترم‌های جذب سرب روی خاک اره درخت اوکالیپتوس

۳-۵-۱- ایزوترم لانگمیر

شکل خطی معادله لانگمیر به‌صورت زیر است (Langmuir 1916; Nemr 2009)

جاذب، واکنش معکوس واجذب نیز انجام خواهد شد و کاهش راندمان جذب مشاهده می‌شود. بالاخره بعد از گذشت زمان معینی این سیکل افزایش و کاهش غلظت ثابت می‌ماند. این رفتار به مفهوم متوقف شدن واکنش‌های رفت و برگشت نیست، بلکه واکنش‌های رفت و برگشتی هنوز در جریان می‌باشند و با سرعت‌های برابر موجب ثابت نگاه داشتن غلظت‌ها می‌شوند و واکنش به تعادل دینامیکی (نه ایستا) می‌رسد. طبق نتایج به‌دست آمده در زمان تماس ۶۰ دقیقه بیشترین میزان جذب مشاهده می‌شود ولی چون میزان جذب در زمان ۶۰ دقیقه تفاوت چشمگیری با میزان جذب در زمان ۳۰ دقیقه ندارد، با توجه به اهمیت زمان در جذب سطحی، زمان تماس بهینه فلز سرب، ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش‌های گذشته مطابقت دارد (Chojancka et al. 2005).

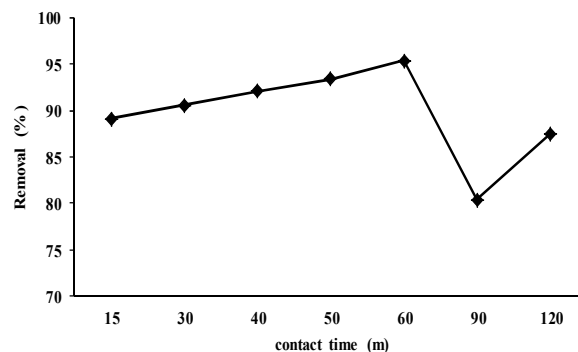


Fig.3. Impact of different contact times on lead removal percentage (pH=7, amount of adsorbent=10 g/L, initial concentration of lead= 10 mg/L)

شکل ۳- تأثیر زمان تماس‌های مختلف بر درصد جذب سرب (pH=7، مقدار جاذب = ۱۰ گرم در لیتر، غلظت اولیه سرب = ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر)

۳-۴- بررسی تأثیر غلظت اولیه سرب بر درصد حذف و ظرفیت جذب سرب

مقدار ماده جذب شده به ازای هر گرم جاذب (ظرفیت جذب) به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{W} \quad (1)$$

که در آن

C_0 غلظت اولیه ماده جذب شونده بر حسب میلی‌گرم در لیتر، C_e غلظت ماده جذب شونده بعد از جذب بر حسب میلی‌گرم در لیتر، V

۳-۵-۲- ایزوترم فروندلیچ

شکل خطی معادله فروندلیچ به صورت زیر است (Freundlich, 1906; Altin et al. 1998).

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

که در آن

K_F ظرفیت جذب در غلظت واحد، $1/n$ شدت جذب سطحی، C_e غلظت تعادلی بر حسب میلی‌گرم بر گرم و q_e مقدار ماده جذب شده به ازاء واحد وزن جسم جاذب بر حسب میلی‌گرم بر گرم است. از نمودار خطی $\log(q_e)$ در مقابل $\log(C_e)$ و K_F و $1/n$ تعیین می‌شود که مقدار پارامتر $1/n$ بیانگر نوع فرایند جذب است که اگر $1/n=0$ نوع جذب برگشت‌ناپذیر، $0 < 1/n < 1$ وضعیت جذب مطلوب و اگر $1/n > 1$ باشد وضعیت جذب نامطلوب است (Siva Kumar 2012).

نتایج حاصل از بررسی ایزوترم فروندلیچ در شکل ۶ و جدول ۲ آمده است که با توجه به مقدار نسبتاً پایین به دست آمده R^2 ، بیانگر عدم تطبیق داده‌ها با ایزوترم فروندلیچ است. نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش حسینی و همکاران مطابقت دارد (Hosseine et al. 2014).

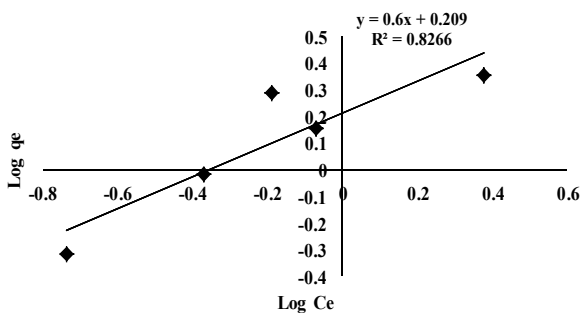


Fig. 6. Freundlich isotherm model for lead adsorption
شکل ۶- مدل ایزوترم فروندلیچ برای جذب سرب

جدول ۲- نتایج محاسبات ایزوترم فروندلیچ

Table 2. Results of Freundlich isotherm calculations

K_F	$1/n$
۱/۶۱۸	۰/۶

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m \times K_L \times C_e} \quad (۲)$$

که در آن

q_e مقدار ماده جذب شده به ازای هر گرم جاذب بر حسب میلی‌گرم بر گرم، q_m و K_L هم پارامترهای لانگمیراند که به ترتیب مربوط به حداکثر ظرفیت جذب و انرژی همبستگی جذب‌اند. مقادیر q_m و K_L را می‌توان با رسم تغییرات $1/q_e$ بر حسب $1/C_e$ تعیین کرد. مشخصه اساسی معادله لانگمیر ثابت بدون بعدی به نام پارامتر تعادل است که به شکل زیر تعریف می‌شود

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \times C_0} \quad (۳)$$

R_L بیانگر نوع ایزوترم است. برای جذب مطلوب $0 < R_L < 1$ ، برای جذب نامطلوب $R_L > 1$ ، برای جذب خطی $R_L = 1$ و برای جذب غیر قابل برگشت پذیر $R_L = 0$ است (Bayramoglu et al. 2009). نتایج حاصل از بررسی ایزوترم لانگمیر در شکل ۵ و جدول ۱ آمده است که با توجه به مقدار $R_L = ۰/۰۵۶$ و ضریب همبستگی $(R^2 = ۰/۹۶۳)$ به دست آمده بیانگر تطبیق داده‌ها بر ایزوترم لانگمیر می‌باشد.

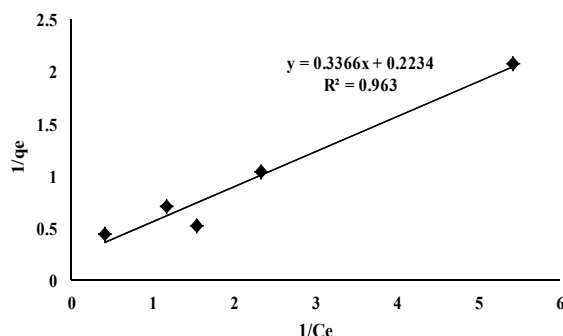


Fig. 5. Langmuir isotherm model for lead adsorption
شکل ۵- مدل ایزوترم لانگمیر برای جذب سرب

جدول ۱- نتایج محاسبات ایزوترم لانگمیر

Table 1. Results of Langmuir isotherm calculations

q_m	K_L	R_L
۴/۴۷۶	۰/۶۶۳	۰/۰۵۶

سینتیک جذب مرتبه دوم سرب در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌ها از مدل سینتیک جذب مرتبه دوم تبعیت می‌کنند. زیرا مقدار R^2 مطلوب است و مقدار q_e به دست آمده از آزمایش با q_e محاسبه شده از طریق نمودار برابر است. نتایج به دست آمده با پژوهشی در سال ۲۰۰۸ مطابقت دارد (Chen et al. 2008).

جدول ۳- نتایج سینتیک جذب مرتبه اول

Table 3. Kinetic results of the first-order adsorption

K_1	q_e (calculated)	q_e (experiment)	R^2
۰/۰۱۴۲	۰/۰۴۳۱	۰/۹۵۳۶	۰/۰۸۲۳

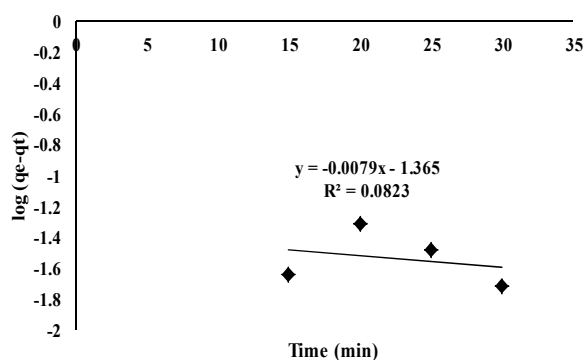


Fig. 7. Kinetic model for the first-order adsorption

شکل ۷- مدل سینتیک جذب مرتبه اول

جدول ۴- نتایج سینتیک جذب مرتبه دوم

Table 4. Kinetic results of the second-order adsorption

K_2	q_e (calculated)	q_e (experiment)	R^2
۲/۲۵۱	۰/۹۴۳	۰/۹۵۳	۰/۹۹۸

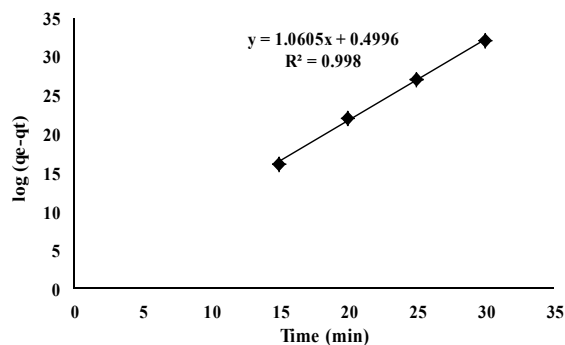


Fig. 8. Kinetic model for the second-order adsorption

شکل ۸- مدل سینتیک جذب مرتبه دوم

۳-۶- مطالعات سینتیک‌های جذب سرب روی خاک اره درخت اوکالیپتوس

۳-۶-۱- مدل سینتیک جذب مرتبه اول

سینتیک جذب مرتبه اول را می‌توان به صورت زیر است (Fan et al. 2003; Shams Khorramabadi et al. 2010).

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log} q_e - \frac{K_1}{2/0303} t \quad (5)$$

که در آن

q_e ظرفیت جذب خاک اره در حالت تعادل بر حسب میلی‌گرم بر گرم، q_t مقدار کادمیم جذب شده در زمان t بر حسب میلی‌گرم بر گرم و k_1 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه اول بر مبنای یک بر دقیقه است. مدل سینتیک مرتبه اول با رسم خطی $\log(q_e - q_t)$ بر حسب t به دست می‌آید که k_1 و q_e از شیب و عرض از مبدا نمودار ترسیم شده و ضریب همبستگی R^2 از نمودار به دست می‌آید. نتایج سینتیک جذب مرتبه اول سرب در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌ها از مدل سینتیک جذب مرتبه اول تبعیت نمی‌کنند. زیرا با وجود اینکه مقدار R^2 مطلوب است ولی مقادیر q_e به دست آمده از آزمایش با q_e محاسبه شده از طریق نمودار برابر نیستند.

۳-۶-۲- مدل سینتیک جذب مرتبه دوم

مدل سینتیک جذب مرتبه دوم نیز از متداول‌ترین مدل‌های تجزیه و تحلیل سینتیک واکنش‌های جذب است که به صورت زیر بیان می‌شود (Azizian 2004).

$$\frac{t}{q_t} = \left[\frac{1}{q_e} \right] t + \left[\frac{1}{K_2 \times q_e^2} \right] \quad (6)$$

که در آن

q_e ظرفیت جذب خاک اره در حالت تعادل بر حسب میلی‌گرم بر گرم، q_t مقدار کادمیم جذب شده در زمان t بر حسب میلی‌گرم بر گرم و k_2 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه دوم بر حسب یک بر دقیقه می‌باشد. مدل سینتیک مرتبه دوم با رسم خطی t/q_t بر حسب t به دست می‌آید که q_e و k_2 از شیب و عرض از مبدا نمودار ترسیم شده و ضریب همبستگی R^2 نیز از نمودار به دست می‌آید. نتایج

فرج را پر کرده‌اند. به عبارتی سطح جاذب در این مرحله نسبت به سطح خاک اره قبل از فرایند جذب افزایش یافته است و فرایند جذب صورت گرفته است. نتایج به دست آمده با نتایج جعفرزاده و همکاران مطابقت دارد (Jaafarzadeh et al. 2013).

۳-۸- بررسی تعیین ساختمان مولکولی ترکیبات خاک اره درخت اوکالیپتوس

شکل ۱۱ پیوندهای تشکیل شده بر اساس گستره فرکانس ها و شکل ۱۲ نتایج به دست آمده از آنالیز خاک اره درخت اوکالیپتوس توسط

۳-۷- بررسی مورفولوژی خاک اره درخت اوکالیپتوس

شکل های ۹ و ۱۰ عکس های SEM تهیه شده از سطح خاک اره را نشان می دهند. در این شکل ها تفاوت ساختار سطحی در مراحل قبل و بعد از جذب به خوبی مشخص شده است. شکل ۹ عکس های قبل از جذب خاک اره درخت اوکالیپتوس در بزرگنمایی های متفاوت را نشان می دهد که سطح خاک اره صاف، دارای منافذ ریز و ساختار درونی نفوذپذیر است و شکل ۱۰ عکس های بعد از فرایند جذب خاک اره درخت اوکالیپتوس در بزرگنمایی های متفاوت را نشان می دهد که فلزات توسط گروه های عاملی خاک اره، سطح خلل و

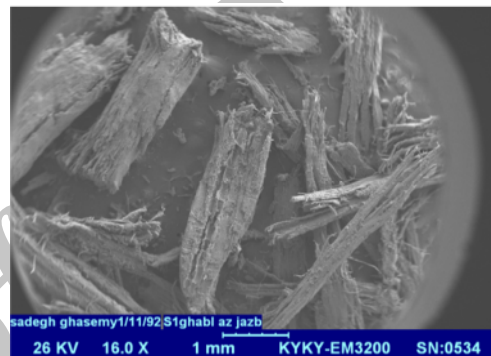
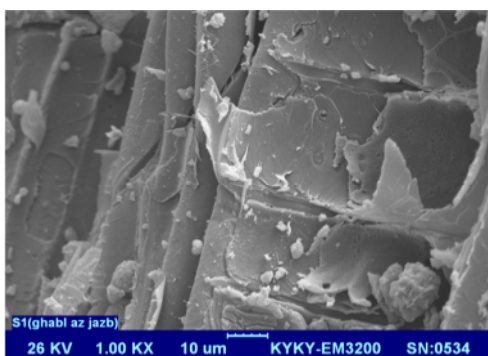


Fig. 9. SEM images before metal adsorption by Eucalyptus sawdust with 16 X and 1 KX magnifications

شکل ۹- عکس SEM قبل از جذب فلز توسط خاک اره درخت اوکالیپتوس با بزرگنمایی های 16X و 1KX

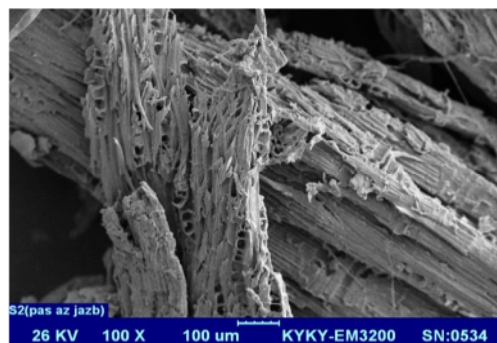
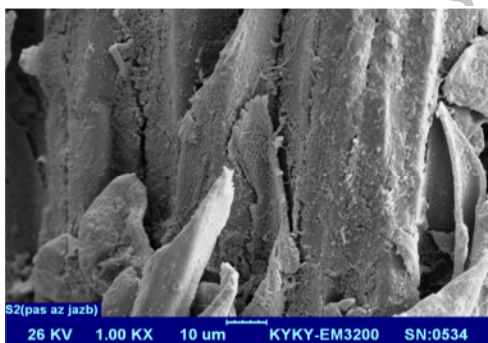


Fig. 10. SEM images after metal adsorption by Eucalyptus sawdust with 100 X and 1 KX magnifications

شکل ۱۰- عکس SEM بعد از جذب فلز توسط خاک اره درخت اوکالیپتوس با بزرگنمایی های 100X و 1KX

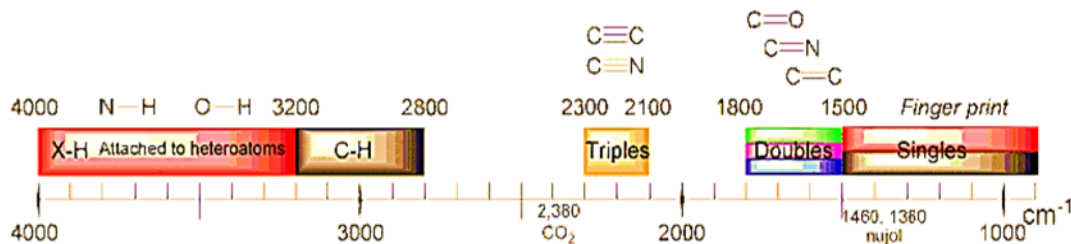


Fig. 11. Links formed based on frequency range

شکل ۱۱- پیوندهای تشکیل شده بر اساس گستره فرکانس ها

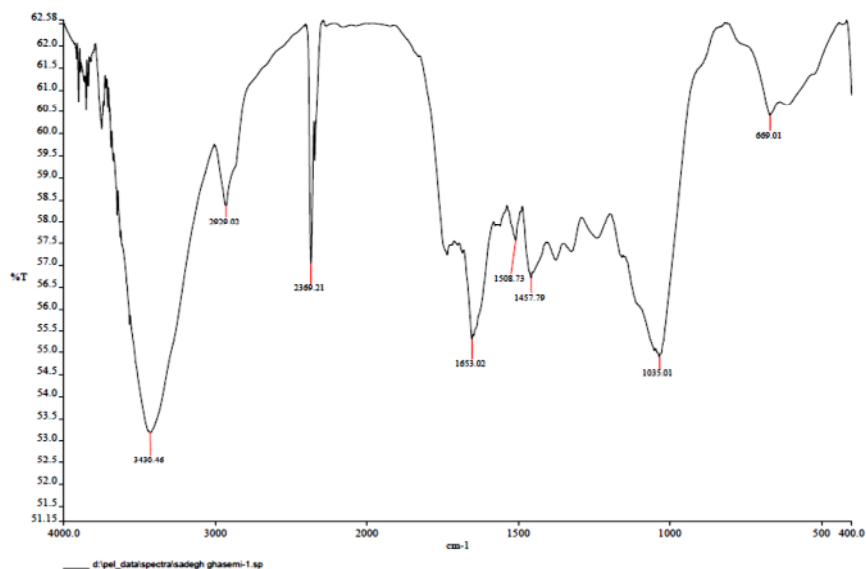


Fig. 12. Eucalyptus sawdust analysis by FTIR
 شکل ۱۲- آنالیز خاک اره درخت اوکالیپتوس توسط دستگاه FTIR

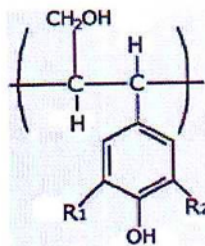


Fig.14. Lignin structure
 شکل ۱۴- ساختار لیگنین

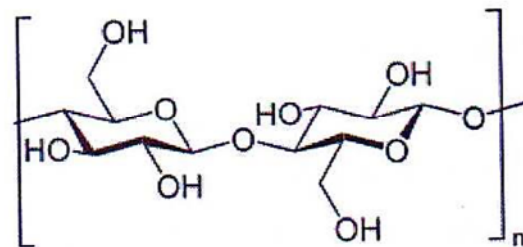


Fig.13. Cellulose structure
 شکل ۱۳- ساختار سلولز

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بیشترین راندمان جذب فلز سرب توسط خاک اره درخت اوکالیپتوس برابر با ۹۶/۲۵ درصد است که در شرایط بهینه مقدار pH برابر با ۷، مقدار جاذب ۱۰ گرم در لیتر، زمان تماس ۳۰ دقیقه و مقدار غلظت اولیه فلز سرب ۲۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد. با توجه به درصد حذف بالای خاک اره درخت اوکالیپتوس در حذف فلز سرب می‌توان این روش را به‌عنوان روشی مؤثر در حذف فلزات سنگین به حساب آورد.

دستگاه FTIR را نشان می‌دهد. با توجه به فرکانس‌های به دست آمده ۳۴۳۰/۴۶، ۲۹۲۹/۰۲ و ۲۳۶۹/۲۱ که به ترتیب در گستره فرکانس‌های تشکیل پیوندهای O-H، C-H و C≡C می‌باشند، مشخص است که دیواره‌های سلولزی این نوع خاک اره عموماً حاوی سلولز (فرمول مولکولی C₆H₁₀O₅) و لیگنین (فرمول مولکولی C₉H₁₀O₂، C₁₀H₁₂O₃، C₁₁H₁₄O₄) و مقدار زیادی گروه هیدروکسیل مانند تانن یا دیگر ترکیبات فنولی است. ساختار سلولز و لیگنین به ترتیب در شکل ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

References

- Altin, O., Ho, O. & Dogu, T., 1998, "Use of general purpose adsorption isotherms for heavy metal claymineral interactions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 198, 130-140.
 APHA, AWWA, WEF, 2005, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, USA.

- Azizian, S., 2004, "Kinetic models of sorption: A theoretical analysis", *Colloid and Interface Sci.*, 726, 47-52.
- Bayramoglu, G., Gursel, I., Tunali, Y. & Arica, M.Y., 2009, "Biosorption of phenol and 2-chlorophenol by *Funalia trogii* pellets", *Bioresource Technology* 100(10), 2685-2691.
- Chen, Z., Ma, W. & Han, M., 2008, "Biosorption of nickel and copper onto treated alga (*Undaria pinnatifida*): Application of isotherm and kinetic models", *Journal of Hazardous Materials*, 155(1), 327-33.
- Chojnacka, K., Chojnacki, A. & Gorecka, H., 2005, "Biosorption of Cr^{3+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} ions by blue-green algae *Spirulina* sp. Kinetics, equilibrium and the mechanism of the process", *Chemosphere*, 59(1), 75-84.
- Davis, T.A., Volesky, B. & Vieira, R.H.S.F., 2000, "Sargassum seaweed as biosorbent for heavy metals", *Water Research*, 34(17), 4270-4278.
- Fan, X., Parker, D.J. & Smith, M.D., 2003, "Adsorption kinetics of fluoride on low cost materials", *Water Research*, 37, 4929-4937.
- Freundlich, H.M.F., 1906, "Über die adsorption in losungen", *Journal of Physical Chemistry*, 57(A), 385-470.
- Hashemi Sharaf Abad, S., Rahimi, M., Ghaedi, M. & Danayi, M., 2012, "The removal of metals (lead, chrome and cobalt) from the aqueous environment by a mix of adsorbents of sawdust and stalk of Persian turpentine tree", *Natioanl Conference of Water and Wastewater Engineering Sciences*, Industrial and High-tech. Postgraduate University, Kerman. (In Persian)
- Hosseini, S.M., Farrokhan Firouzi, A., Babaei, AA. & Heidarizadeh, F., 2014, "Removal of Cu (II) from aqueous solution by modified tea waste with magnetic nanoparticles", *Journal of Water & Wastewater*, Vol. 24 No. 4 (88), 112-119. (In Persian)
- Jaafarzadeh, N., Mengelizadeh, N. & Hormozinejad, M., 2013, "Adsorption of Zn (II) from aqueous solution by using chitin extracted from shrimp shells", *Jentashapir Journal of Health Research*, 5(3), 131-139.
- Langmuir, I., 1916, "The constitution and fundamental properties of solids and liquids", *J. An. Chem. Soc.*, 38, 2221-2295.
- Malkoc, E. & Nuhoglo, Y., 2005, "Investigations of nickel(II) removal from aqueous solutions using tea factory waste", *Journal of Hazardous Materials*, 127, 120-128.
- Malakotian, M., Karami, A. & Yaqmayian, K., 2005, "The analysis of wood ash in removing cadmium from the sewage of color-producing industries (Binalood Kerman)", *8th National Conference of Environment Hygiene, Medical and Hygiene Services University, Tehran*. (In Persian)
- Miritarhan, F. & Ghasemi, N., 2013, "The adsorption of metal ion of cobalt from the aqueous solution by active coal from pig wood", *First National Conference of New Technologies in Chemistry and Chemistry Engineering*, Vista Cooperative Research & Science Company, Tehran. (In Persian)
- Nabizadeh, R., Naddafi, K., Saedi, R., Mahvi, A., Vaezi, F. & Nazmara, K.Y.S., 2005, "Kinetic and equilibrium studies of Lead and Cadmium biosorption from aqueous solutions by *Sargassum* Spp. Biomass", *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2(3), 159-168.
- Nemr, A.E., 2009, "Potential of pomegranate husk carbon for Cr(VI) removal from wastewater: Kinetic and isotherm studies", *Journal of Hazardous Materials*, 161, 132-141.
- O'Connell, D.W., Birkinshaw, C. & O'Dwyer, T.F., 2008, "Heavy metal adsorbents prepared from the modification of cellulose", *Journal of Bioresource Technology*, 99(15), 6709-6724.
- Özer, D., Özer, A. & Dursun, G., 2008, "Investigation of zinc (II) adsorption on *Cladophora crispata* in a two-staged reactor", *Journal of Chem. Technol. Biotechnol.*, 75(5), 410-416.
- Saki, P., Mafi Gholami, R. & Takdastan, A., 2013, "Removal of cadmium from industrial wastewater by steel slag", *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 5(1), 23-33.
- Shams Khorramabadi, Gh., Darvishi Cheshmeh Soltani, R. & Jorfi, S., 2010, "Cd(II) adsorption using waste sludge from a municipal wastewater treatment system", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 21 No. 1(73), 57-62. (In Persian).
- Siva Kumar, N., Woo, H.S. & Min, K., 2012, "Equilibrium and kinetic studies on biosorption of 2,4,6-trichlorophenol from aqueous solutions by *Acacia leucocephala* bark", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 94(0), 125-132.
- Sreejalekshmi, K.G., Krishnan, K.A. & Anirudhan, T.S., 2002, "Adsorption of Pb(II) and Pb(II)-citric acid on sawdust activated carbon: Kinetic and equilibrium isotherm studies", *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 1506-1513.