بررسی حذف کادمیوم توسط خاک‌اره درخت کنار از پساب سنتتیک و تعیین ایزوترم‌ها و سینتیک جذب

صادق قاسمی[۱]
رویا مافی غلامی[۲*]

۱. باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. گروه محیطزیست (مهندسی محیطزیست)، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز ، ایران

* **نویسنده مسئول مکاتبات**
r.gholami@iauahvaz.ac.ir

کد مقاله: ۱۳۹۴۰۳۰۱۲۶
تاریخ دریافت:۲۰۱۴/۹/۳۰
تاریخ پذیرش:۲۰۱۵/۴/۲۱
این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.

چکیده

هدف از این مطالعه که در سال ۱۳۹۳ انجام گرفت، بررسی استفاده از خاک‌اره درخت کنار به‌عنوان جاذبی ارزان‌قیمت جهت حذف کادمیوم از پساب می‌باشد. آزمایش‌ها در سیستم ناپیوسته انجام شد و تأثیر پارامترهای pH، مقدار جاذب، زمان تماس و غلظت اولیه کادمیوم جهت جذب کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. از متداول‌ترین ایزوترم‌ها و سینتیک‌های جذب برای بررسی جذب کادمیوم و سرعت واکنش استفاده شد و هم‌چنین خصوصیات مورفولوژی خاک‌اره درخت کنار قبل و بعد از فرآیند جداسازی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تعیین گردید. با توجه به نتایج، حداکثر راندمان جذب کادمیوم ۹۸/۳۳ درصد است که در pH و زمان تماس ۵ و ۳۰ دقیقه و مقدار جاذب ۱۰ گرم در لیتر به‌دست آمد. با افزایش غلظت اولیه کادمیوم مقدار ماده جذب‌شده به ازای هر گرم جاذب افزایش، ولی درصد حذف کاهش یافت. ایزوترم لانگمویر بیش‌ترین تطابق را با داده‌های این مطالعه نشان داد. آنالیز سینتیک نشان داد که جذب کادمیوم با مدل سینتیکی جذب مرتبه دوم مطابقت دارد (R^2=۱). با توجه به راندمان بالای حذف کادمیوم توسط خاک‌اره درخت کنار می‌توان از این روش به‌عنوان جاذبی نسبتاً کارآمد و ارزان‌قیمت برای جذب کادمیوم استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: حذف کادمیوم، خاک‌اره درخت کنار، سینتیک جذب، ایزوترم جذب.

مقدمه

در سال ۱۹۶۹ برای آلودگی آب تعریفی ارائه دادند که عبارت است از افزایش مقدار هر معرف اعم از شیمیایی، فیزیکی یا بیولوژیکی که موجب تغییر خواص و نقش اساسی آن در مصارف ویژه‌اش می‌شود (Hart, 2004).

کادمیوم یکی از فلزات بسیار سمی برای انسان و محیطزیست است (El-Sherif *et al*., 2008)، این فلز حتی در غلظت‌های کم نیز می‌توانند برای موجودات زنده که انسان‌ها را هم شامل می‌شود خطرناک و سمی باشند (Malkoc and Nuhoglo, 2005). مطابق راهنمای آب آشامیدنی پیشنهادشده توسط سازمان سلامت جهانی و انجمن اداره (جنبش) آب آمریکا مقدار مجاز کادمیوم در آب آشامیدنی ۰/۰۰۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (Mohan and Singh, 2002). پساب حاصل از صنایع مختلف نظیر صنایع آبکاری فلزات، باتری‌های کادمیوم – نیکل، کودهای فسفاته، استخراج معادن، رنگ‌ها، تثبیت‌کننده‌ها و صنایع آلیاژی از منابع عمده تولید کادمیوم در محیطزیست به‌شمار می‌روند (Mobasherpour *et al*., 2011). در حال حاضر روش‌های متنوعی برای کاهش آلودگی آب‌وخاک وجود دارد که ازجمله می‌توان به روش‌هایی همچون فیلتراسیون، انعقادسازی، اکسیداسیون و تبادل یونی اشاره نمود (O' Connell *et al*., 2008). اما بسیاری از این روش‌ها اغلب

وقت‌گیر، دارای بهای بالا و کارایی کم هستند. امروزه روند تحقیقات در جهت یافتن روش‌های ساده و ارزان‌قیمتی است که با همان کارایی برای استفاده در تصفیه فاضلاب‌های آلوده مناسب باشد. در بین این روش‌ها تکنولوژی جاذب‌ها بر پایه فرآیند تبادل یونی و جذب فیزیکی و شیمیایی در سال‌های اخیر کاربردهای فزاینده‌ای یافته است. به‌کارگیری فرآیندهای جذب جهت حذف فلزات از پساب‌ها امیدوارکننده است. خاک‌اره یک محصول جانبی است که به‌طور گسترده در صنایع چوب‌بری تولید می‌گردد و خواص جذب و تبادل یونی دارد. مطالعات نشان می‌دهد که امکان استفاده ازاین‌گونه جاذب‌ها برای جذب یون‌های فلزی مختلف وجود دارد. ازجمله پژوهش‌هایی که قبلاً در این زمینه انجام‌گرفته است، حذف فلزات (سرب، کروم و کبالت) از محیط آبی به‌وسیله مخلوطی از جاذب‌های خاک اره و ساقه درخت بنه، که توسط هاشمی شرف‌آباد و همکاران (۱۳۹۱) صورت گرفته است، بیش‌ترین میزان حذف فلزات در pH، زمان تماس و مقدار جاذب بهینه برای سرب، کروم و کبالت در محلول ۱۰پی‌پی‌ام به ترتیب ۶۷/۴۳، ۴۶/۵۷ و ۱۷/۷۰ درصد بود که میزان حذف فلز سرب بیشتر از دیگر فلزات است. از دیگر پژوهش‌ها، حذف کروم شش ظرفیتی از محیط‌های آبی با استفاده از خاک‌اره درخت راجی اصلاح‌شده و مطالعه سینتیکی که توسط سمرقندی و همکاران (۱۳۸۸) صورت گرفت که نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مشخص ساخت که با افزایش زمان تماس خاک‌اره از ۵ دقیقه به ۱۸۰ دقیقه کارایی حذف از ۵۳/۴۸ درصد به ۷۶/۹۹ درصد افزایش می‌یابد و می‌توان از خاک‌اره به‌عنوان یک روش مؤثر و ارزان در جهت حذف کروم شش ظرفیتی از محلول‌های آبی استفاده کرد. در پژوهشی که با عنوان جذب یون فلزی کبالت از محلول آبی توسط زغال فعال تهیه‌شده از چوب درخت انجیر، توسط میری طرهان و قاسمی (۱۳۹۲) صورت گرفت، نتایج این تحقیق نشان داد که این جاذب، جاذبی با ظرفیت بالا برای حذف یون کبالت از محلول‌های آبی آلوده است و درنهایت در پژوهشی با عنوان بررسی کارایی خاکستر چوب در حذف کادمیوم از فاضلاب صنایع تولید رنگ (بینالود کرمان) که توسط ملکوتیان و همکاران (۱۳۸۴) انجام گرفت نتایج نشان می‌دهد که خاکستر چوب کارایی بالایی در حذف کادمیوم داشته و این کارایی با افزایش میزان جسم جاذب تا ۱۰۰ گرم به ازای هر لیتر فاضلاب به ۹۷ درصد تا ۹۸ درصد رسیده است. هدف از این تحقیق رسیدن به روشی کارآمد و ارزان برای حذف فلز سنگین کادمیوم از پساب صنایع مختلف است و در همین راستا در نظر است، با استفاده از خاک‌اره درخت کنار که یک درخت بومی استان خوزستان می‌باشد و با توجه به سهولت دسترسی و ارزش اقتصادی کم، جهت حذف فلزات سنگین (اختصاصاً کادمیوم) از پساب‌های صنایع، مورد امکان‌سنجی و بررسی قرار گیرد. هم‌چنین در ادامه به بررسی متغیرهای این تحقیق شامل غلظت اولیه محلول کادمیوم، مقدار جاذب (خاک‌اره)، pH و مدت‌زمان لازم برای حذف کادمیوم از پساب سنتتیک پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

بعد از تهیه جاذب خاک‌اره درخت کنار، برای همگن‌سازی ذرات از مش ۳۵ استفاده گردید و سپس برای برطرف کردن گردوغبار و دیگر آلودگی‌ها، خاک‌اره چندین بار با آب مقطر شسته شد و جهت رسیدن به وزن ثابت در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد خشک شد (Saki *et al*., 2013).

از نمک نیترات کادمیوم برای ساخت محلول‌ها استفاده گردید (Saki *et al*., 2013). به این منظور ابتدا محلول ۲۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم تهیه و سپس سایر غلظت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم از طریق رقیق‌سازی محلول تهیه‌شده آماده گردید. کلیه مواد شیمیایی مورداستفاده دارای درجه خلوص آزمایشگاهی و ساخت شرکت مرک بود و مراحل آزمایش در دمای ۰/۵±۲۰ درجه سانتی گراد انجام شد (Ghasemi and Mafi Gholami, 2015) و غلظت باقیمانده فلز توسط دستگاه جذب اتمی مشخص گردید. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها حداقل سه بار تکرار گردید و میانگین داده‌ها و نتایج مورداستفاده قرار گرفت.

برای تعیین pH بهینه محدوده متغیر pH بین ۳ تا ۱۱ انتخاب گردید. پس از تنظیم pH با استفاده از اسیدکلرید و سود ۰/۱ نرمال، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، مقدار ۰/۵ گرم جاذب به ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه کادمیوم با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر افزوده شد (Saki *et al*., 2013). پس از طی زمان ۳۰ دقیقه غلظت کادمیوم باقیمانده تعیین شد.

در این مرحله به‌منظور تعیین مقدار بهینه جاذب، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، مقادیر ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۵ گرم خاک‌اره به محلول‌های ۵۰ میلی‌لیتر با غلظت اولیه کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر و با مقدار pH بهینه به‌دست‌آمده از مرحله اول، افزوده شد. پس از ۳۰ دقیقه زمان تماس، غلظت کادمیوم باقیمانده در محلول تعیین گردید (Ghasemi and Mafi Gholami, 2015).

در بررسی اثر زمان، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، پس از آماده‌سازی محلول‌های ۵۰ میلی‌لیتر با غلظت اولیه کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، مقادیر بهینه خاک‌اره و pH به‌دست‌آمده از مراحل قبل در محلول‌ها اضافه و تنظیم گردید و نمونه‌ها در فواصل زمانی بین ۱۵ الی ۱۲۰ دقیقه از همزن خارج و مورد آنالیز قرار گرفتند (Ghasemi and Mafi Gholami, 2015).

به‌منظور بررسی تأثیر غلظت‌های اولیه کادمیوم بر میزان جذب، با متغیر قرار دادن مقدار غلظت اولیه و ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، محلول‌های ۵۰ میلی‌لیتر با غلظت‌های اولیه کادمیوم ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر آماده و پس از تنظیم و افزودن مقادیر بهینه pH و خاک‌اره و طی زمان تماس بهینه به‌دست‌آمده در مرحله قبل از همزن خارج و مورد آنالیز قرار گرفتند (Saki *et al*., 2013). که مقدار ماده جذب‌شده به ازای هر گرم جاذب (ظرفیت جذب) در رابطه ۱ ارائه‌شده است (Saki *et al*., 2013).

رابطه ۱

$$q_e = (C_o - C_e) \times \frac{V}{W}$$

که C_0 (میلی‌گرم بر لیتر) غلظت اولیه ماده جذب‌شونده، C_e (میلی‌گرم بر لیتر) غلظت ماده جذب‌شونده بعد از جذب، V حجم محلول برحسب لیتر و W وزن ماده جاذب برحسب گرم می‌باشد .

مطالعات ایزوترم‌های جذب کادمیوم روی خاک‌اره درخت کنار

آنالیز اطلاعات حاصل از ایزوترم به‌منظور توسعه معادله‌ای که توسط آن بتوان طراحی لازم را انجام داد، اهمیت فراوان دارد. علاوه بر این از ایزوترم جذب می‌توان برای توصیف چگونگی واکنش ماده جذب‌شونده با جاذب و هم‌چنین بهینه‌سازی مقدار کاربرد جاذب استفاده نمود (Hameed, 2009).

شکل خطی معادله لانگمویر در رابطه ۲ ارائه‌شده است (Langmuir, 1916; Nemr, 2009).

رابطه ۲

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m \times K_1 \times C_e}$$

که q_e (میلی‌گرم در گرم) مقدار ماده جذب‌شده به ازای هر گرم جاذب، q_m و K_1 هم پارامترهای لانگمویر اند که به ترتیب مربوط به حداکثر ظرفیت جذب و انرژی همبستگی جذب‌اند. مقادیر q_m و k_1 را می‌توان با رسم تغییرات $1/q_e$ برحسب $1/C_e$ تعیین کرد. مشخصه اساسی معادله لانگمویر ثابت بدون بعدی به نام پارامتر تعادل می‌باشد که در رابطه ۳ ارائه‌شده است (Bayramoglu *et al*., 2009).

رابطه ۳

$$R_L = \frac{1}{1 + K_1 \times C_o}$$

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 غیرقابل برگشت‌پذیر $R_L = 0$ است (Bayramoglu *et al*., 2009).

شکل خطی معادله فروندلیچ در رابطه ۴ ارائه‌شده است (Freundlich, 1906; Altin *et al*., 1998).

رابطه ۴

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_F + \frac{1}{n}\text{Log } C_e$$

که در آن K_F ظرفیت جذب در غلظت واحد، ۱/n شدت جذب سطحی، C_e غلظت تعادلی برحسب میلی‌گرم در لیتر و q_e مقدار ماده جذب‌شده به ازای واحد وزن جسم جاذب برحسب میلی‌گرم در گرم می‌باشد. از نمودار خطی $\log(q_e)$ در مقابل $\log(C_e)$، K_F و ۱/n تعیین می‌شود که مقدار پارامتر ۱/n بیانگر نوع فرآیند جذب است که اگر ۱/n=۰ نوع جذب برگشت‌ناپذیر، ۰<۱/n<۱ وضعیت جذب مطلوب و اگر ۱/n>۱ باشد وضعیت جذب نامطلوب می‌باشد (Siva Kumar *et al*., 2012).

یکی از مهم‌ترین فاکتورها برای فرآیند جذب، پیش‌بینی سرعت جذب می‌باشد. سینتیک جذب به خواص فیزیکی و شیمیایی ماده‌ی جاذب بستگی دارد که مکانیزم جذب را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

سینتیک جذب مرتبه اول در رابطه ۵ ارائه‌شده است (Fan *et al*., 2003; Shams Khorramabadi *et al*., 2010).

رابطه ۵

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

در این معادله q_e ظرفیت جذب خاک‌اره در حالت تعادل برحسب میلی‌گرم بر گرم، q_t مقدار کادمیوم جذب‌شده در زمان t برحسب میلی‌گرم بر گرم و k_1 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه اول بر مبنای ۱/min است. مدل سینتیکی مرتبه اول با رسم خطی $\log(q_e-q_t)$ برحسب t به دست می‌آید که k_1 و q_e را از شیب و عرض از مبدأ نمودار ترسیم‌شده و ضریب همبستگی R^2 را نیز می‌توان از نمودار به دست آورد.

مدل سینتیک جذب مرتبه دوم نیز از متداولترین مدل‌های تجزیه‌وتحلیل سینتیک واکنش‌های جذب هستند که در رابطه ۶ ارائه‌شده است (Azizian, 2004).

رابطه ۶

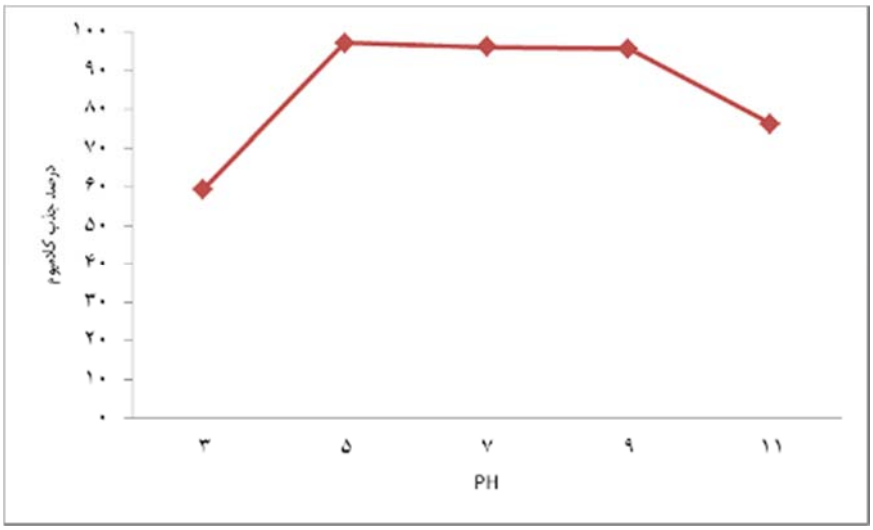
$$\frac{t}{q_t} = \left[\frac{1}{q_e}\right]t + \left[\frac{1}{K_2 \times q_e^2}\right]$$

به‌طوری‌که در این معادله q_e ظرفیت جذب خاک‌اره در حالت تعادل برحسب میلی‌گرم بر گرم، q_t مقدار کادمیوم جذب‌شده در زمان t برحسب میلی‌گرم بر گرم و k_2 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه دوم برحسب گرم/میلی‌گرم/دقیقه می‌باشد. مدل سینتیکی مرتبه دوم با رسم خطی t/q_t برحسب t به دست می‌آید که q_e و k_2 را از شیب و عرض از مبدأ نمودار ترسیم‌شده و ضریب همبستگی R^2 را نیز می‌توان از نمودار به دست آورد.

در این مرحله به‌منظور شناسایی مورفولوژی و چگونگی جذب فلز کادمیوم بر روی خاک‌اره درخت کنار از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید.

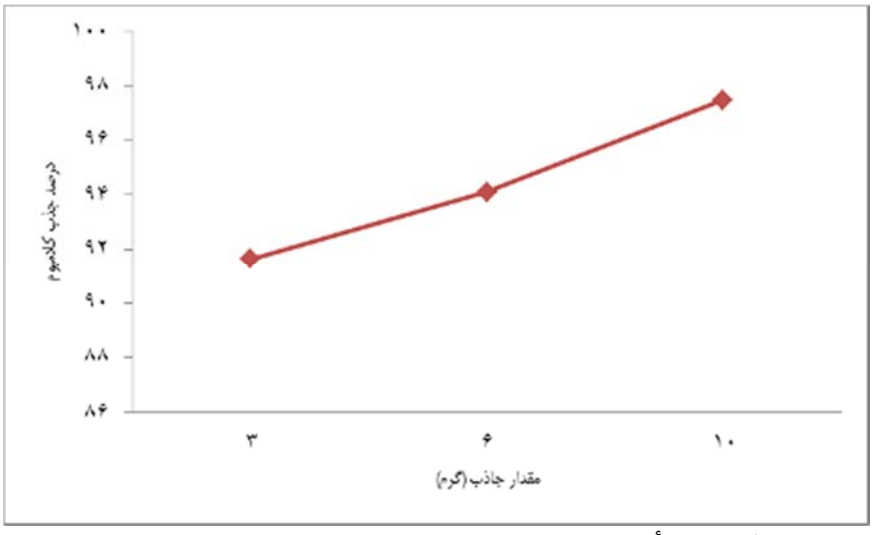
نتایج

شکل ۱ نتایج تأثیر pHهای مختلف بر درصد جذب را نشان می‌دهد.



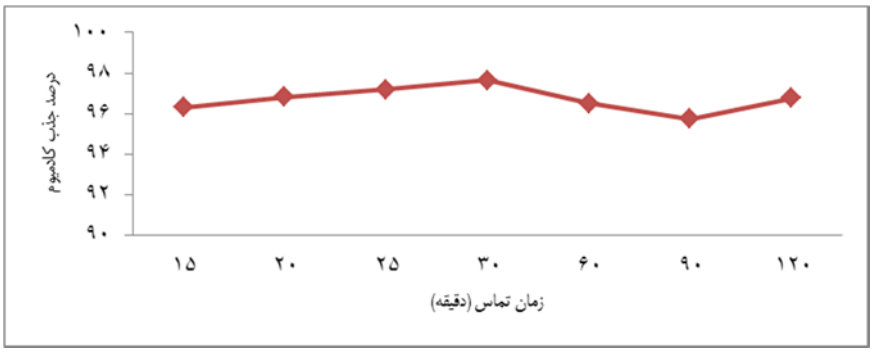
شکل۱: تأثیر pHهای مختلف بر درصد جذب کادمیوم.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر مقدار جاذب روی جذب کادمیوم در شکل ۲ نشان داده‌شده است.



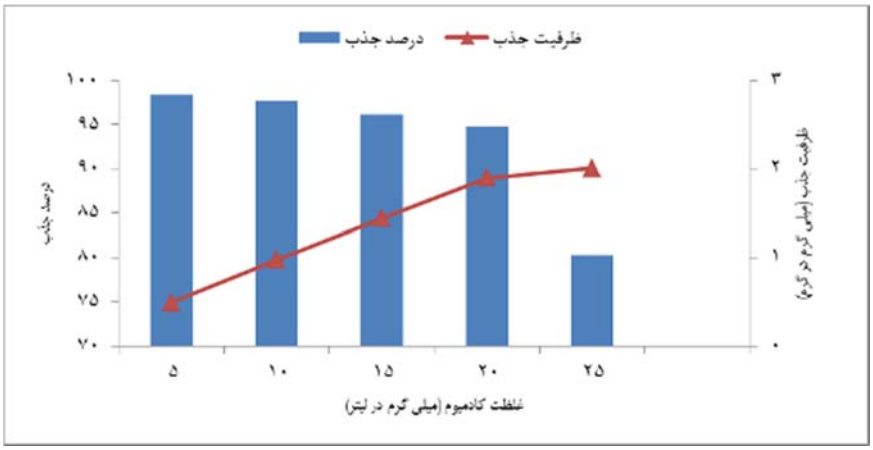
شکل۲: تأثیر مقدار جاذب مختلف بر درصد جذب کادمیوم.

نتایج حاصل از تأثیر زمان تماس بر میزان جذب کادمیوم در شکل ۳ نشان داده‌شده است.



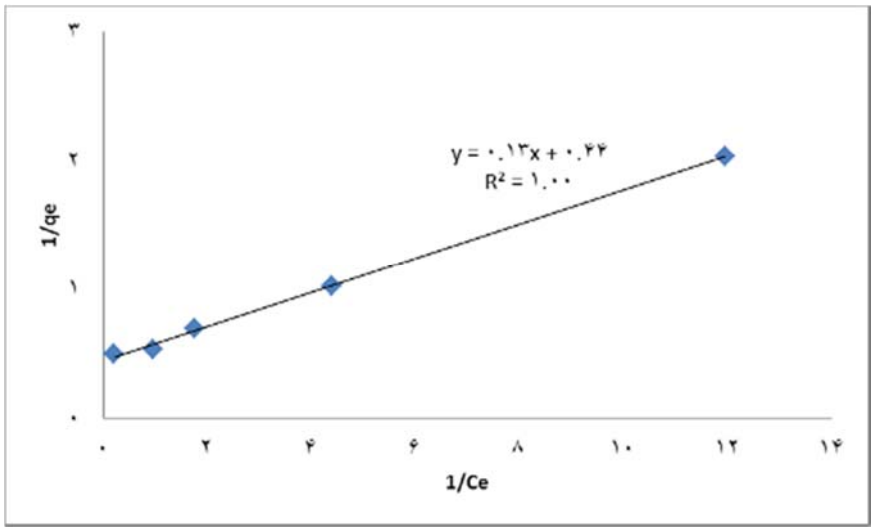
شکل۳: تأثیر زمان تماس‌های مختلف بر درصد جذب کادمیوم.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر غلظت اولیه کادمیوم بر روی جذب در شکل ۴ نشان داده‌شده است.



شکل٤: تأثیر مقدار غلظت‌های اولیه متفاوت بر ظرفیت و درصد جذب کادمیوم.

نتایج حاصل از بررسی ایزوترم لانگمویر در شکل ۵ و جدول ۱ آمده است که با توجه به مقدار R_L=۰/۰۱۱ و ضریب همبستگی R^2=۰/۹۹۸۱ به‌دست آمده بیان‌گر تطبیق داده‌ها بر ایزوترم لانگمویر می‌باشد.

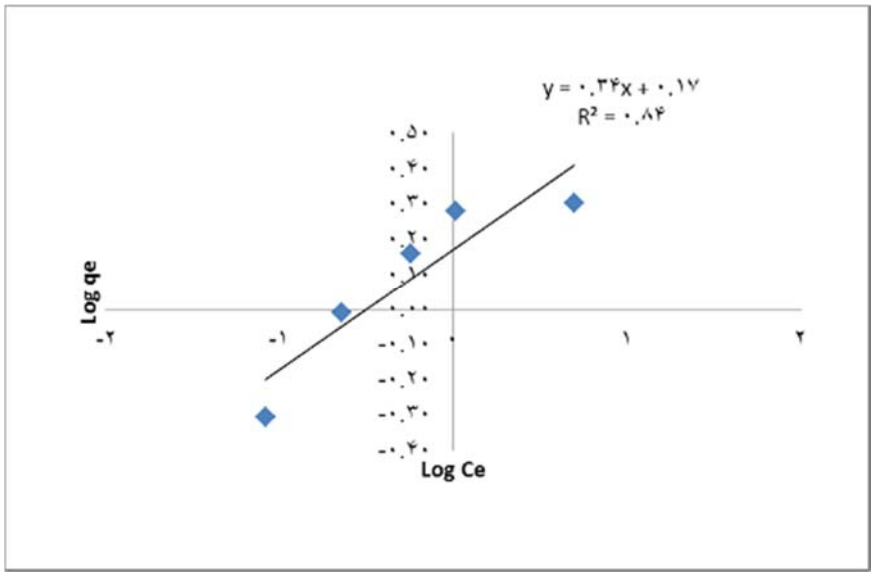


شکل۵: مدل ایزوترم لانگمویر برای جذب کادمیوم.

جدول۱: نتایج محاسبات ایزوترم لانگمویر.

q_m	۲/۲۵۸
K_l	۳/۳۳۶
R_L	۰/۰۱۱

نتایج حاصل از بررسی ایزوترم فروندلیچ در شکل ۶ و جدول ۲ آمده است که با توجه به مقدار ۱/n فرآیند جذب مطلوب می‌باشد ولی به دلیل کمتر بودن مقدار R^2 به‌دست‌آمده در این ایزوترم (جدول ۲) نسبت به ایزوترم لانگمویر (جدول ۱) بیانگر تطبیق کامل فرآیند جذب با ایزوترم لانگمویر می‌باشد.



شکل٦: مدل ایزوترم فروندلیچ برای جذب کادمیوم.

جدول۲: نتایج محاسبات ایزوترم فروندلیچ

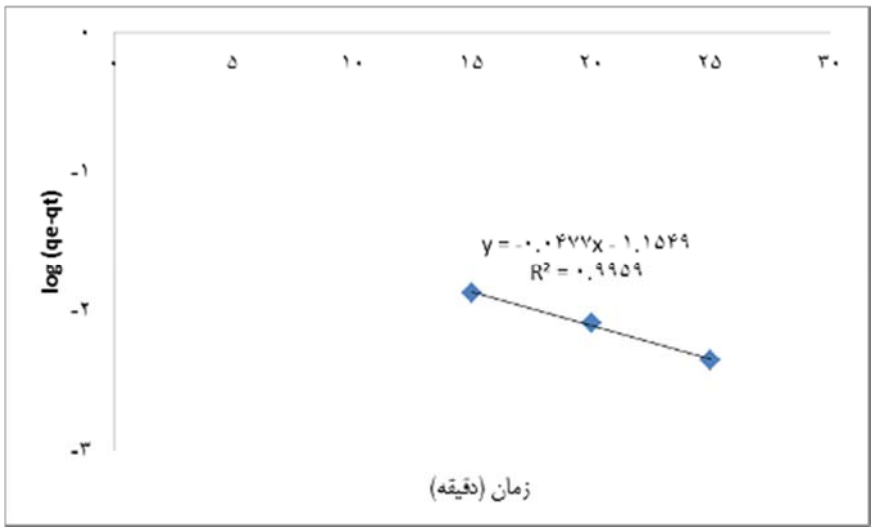
K_F	۱/۴۸۳
$1/n$	۰/۳۴۴۷

نتایج سینتیک جذب مرتبه اول کادمیوم در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده‌شده است. از پارامترها و شکل می‌توان به این نتیجه رسید که داده‌ها از مدل سینتیک جذب مرتبه اول تبعیت نمی‌نمایند. به این دلیل که باوجوداینکه مقدار R^2 مطلوب می‌باشد ولی مقادیر q_e به‌دست‌آمده از آزمایش با q_e محاسبه‌شده از طریق شکل برابر نمی‌باشند.

نتایج سینتیک جذب مرتبه دوم کادمیوم در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده‌شده است. از پارامترها و شکل می‌توان به این نتیجه رسید که داده‌ها از مدل سینتیک جذب مرتبه دوم تبعیت می‌نمایند. به این دلیل که مقدار R^2 مطلوب می‌باشد و مقادیر q_e به‌دست‌آمده از آزمایش با q_e محاسبه‌شده از طریق شکل برابر می‌باشند.

جدول۳: نتایج سینتیک جذب مرتبه اول.

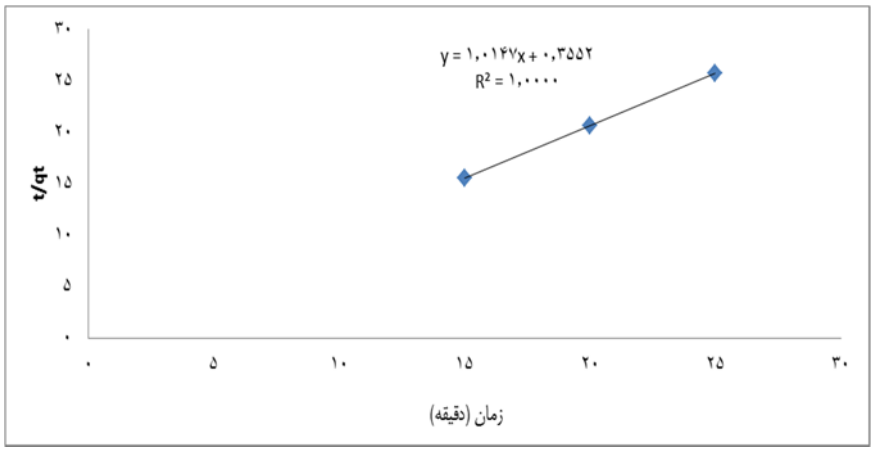
K_1	qe (محاسبه‌شده)	qe (آزمایش)	R^2
۰/۰۹۶۸	۰/۰۷	۰/۹۷۴۶	۰/۹۹۵۹



شکل۷: مدل سینتیک جذب مرتبه اول.

جدول٤: نتایج سینتیک جذب مرتبه دوم.

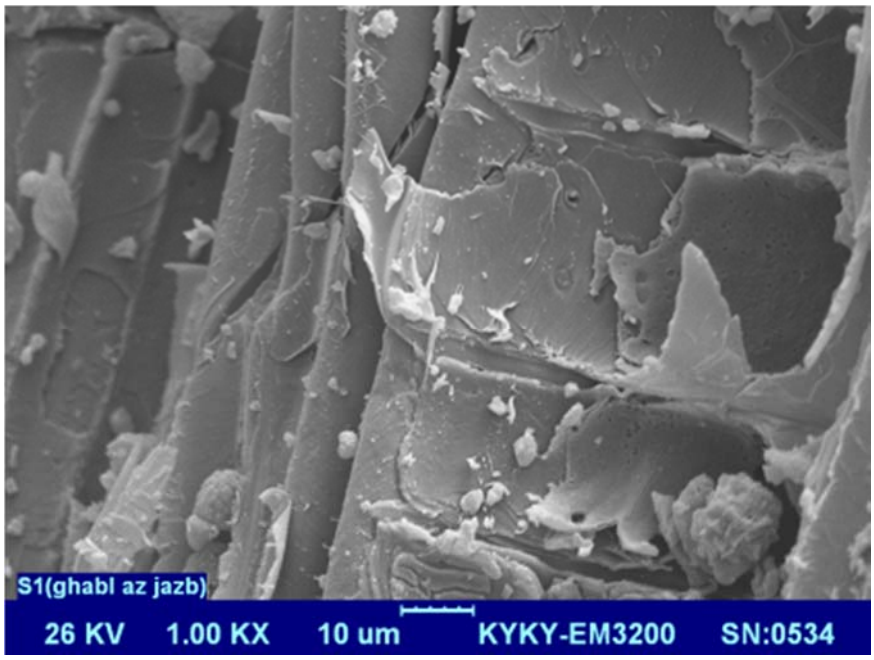
K_2	qe (محاسبه‌شده)	qe (آزمایش)	R^2
۲/۸۹۸۶	۰/۹۸۵۵	۰/۹۷۶۴	۱



شکل۸: مدل سینتیک جذب مرتبه دوم.

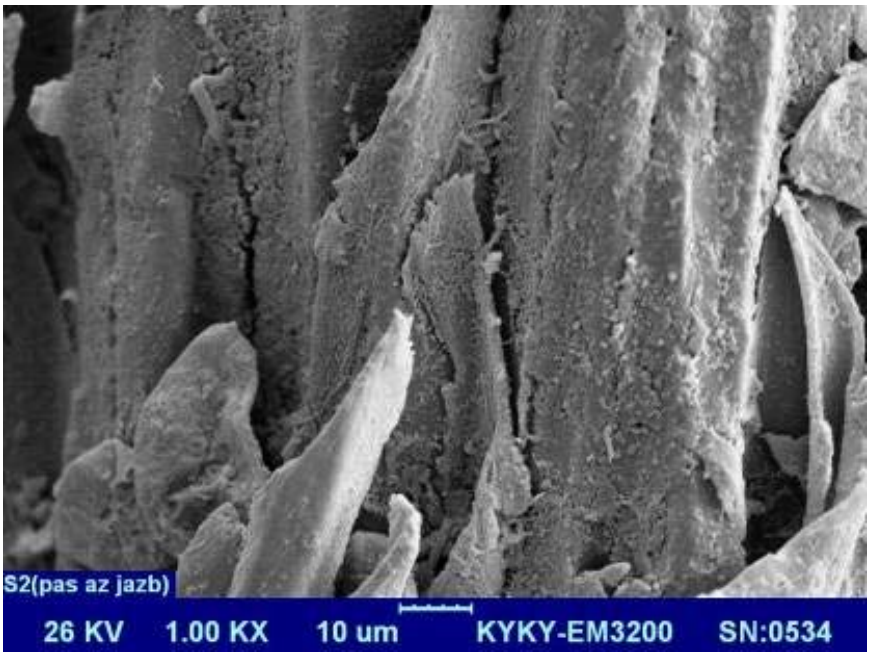
شکل‌های ۹ الی ۱۲ عکس‌های تهیه‌شده از سطح خاک‌اره به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (Scanning Electron Microscope) را نشان می‌دهند. شکل‌های ۹ و ۱۰ قبل از جذب خاک‌اره درخت کنار در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت را نشان می‌دهد که این سطح دارای خلل و فرج و دارای ساختار درونی نفوذپذیر می‌باشد و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بعد از جذب خاک‌اره درخت کنار در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت را نشان می‌دهد که فلزات سطح خلل و فرج را پرکرده‌اند و فرآیند جذب صورت گرفته است.

شکل۹: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از جذب فلز توسط خاک‌اره درخت کنار با بزرگ‌نمایی ۱۶X.



شکل۱۰: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از جذب فلز توسط خاک‌اره درخت کنار با بزرگ‌نمایی ۱KX.

شکل۱۱: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از جذب فلز توسط خاک‌اره درخت کنار با بزرگ‌نمایی ۱۰۰X.



شکل۱۲: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از جذب فلز توسط خاک‌اره درخت کنار با بزرگ‌نمایی 1KX.

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصله با افزایش pH از ۳ تا ۵، راندمان حذف افزایش‌یافته و بعدازآن کاهش می‌یابد. طبق مطالعات انجام‌شده در pHمای اسیدی‌تر از pH برابر با ۵، غلظت یون H^+ در محلول بالاست و این کاتیون با کادمیوم برای نشستن روی مکان‌های جذب رقابت می‌کند و میزان جذب کادمیوم کاهش می‌یابد و در ادامه در pH بالاتر از pH برابر با ۵، در محیط قلیایی غلظت OH^- بالاست و رسوب کادمیوم مشاهده می‌شود و میزان جذب کاهش می‌یابد (Saki *et al*., 2013). در بررسی تأثیر مقدار جاذب بر راندمان جذب، نتایج نشان داد که با افزایش میزان مقدار جاذب، درصد حذف کادمیوم توسط خاک‌اره درخت کنار افزایش می‌یابد زیرا با افزایش مقدار جاذب مقدار سطح تماس جاذب با فلز کادمیوم افزایش می‌یابد، لذا کارایی جذب افزایش می‌یابد (Ghasemi and Mafi Gholami, 2015). در بررسی اثر زمان تماس بر راندمان حذف، طبق نتایج حاصله با افزایش زمان تماس، راندمان حذف افزایش‌یافته و بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از شروع آزمایش به حداکثر مقدار خود می‌رسد اما با افزایش زمان و رسیدن به زمان ۹۰ دقیقه، میزان جذب کاهش و با افزایش بیشتر زمان مجدداً میزان جذب افزایش می‌یابد که علت این امر، برگشت‌پذیر بودن فرآیند جذب می‌باشد که در ابتدا باگذشت زمان واکنش جذب شروع می‌شود و باگذشت بیشتر زمان واکنش معکوس واجذب نیز انجام خواهد شد. بالاخره بعد از گذشت زمان معینی این سیکل افزایش و کاهش غلظت ثابت می‌ماند که این رفتار به مفهوم متوقف شدن واکنش‌های رفت‌وبرگشت نیست، بلکه واکنش‌های رفت و برگشتی هنوز در جریان می‌باشند و با سرعت‌های برابر موجب ثابت نگاه‌داشتن غلظت‌ها می‌شود که در این صورت واکنش به تعادل دینامیکی (نه ایستا) رسیده است (Ghasemi and Mafi Gholami, 2015). هم‌چنین نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه کادمیوم، مقدار ماده جذب‌شده به ازای هر گرم جاذب (ظرفیت جذب) افزایش ولی درصد جذب کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش غلظت اولیه کادمیوم از ۵ به ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر، میزان ظرفیت جذب از ۰/۴۹۱ به ۲ میلی‌گرم بر گرم، افزایش اما درصد حذف از ۹۸/۳۳ به ۸۰/۳۳ درصد کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از بیشتر بودن باندهای آزاد جاذب و باندهای تبادل یون در غلظت‌های پایین کادمیوم باشد. علاوه بر این در سیستم‌های جذب ناپیوسته، غلظت ورودی کادمیوم موجود در محلول نقش مهمی را به‌عنوان نیروی محرکه غلبه کننده بر مقاومت ناشی از انتقال جرم بین فاز مایع و جامد ایفا می‌نماید و بنابراین با افزایش غلظت کادمیوم در محلول، ظرفیت جذب کادمیوم افزایش می‌یابد. نکته

حائز اهمیت دیگر این می‌باشد که با افزایش غلظت از ۲۰ به ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر مقدار ماده جذب‌شده (q_e) به مقداری اندک افزایش می‌یابد که نشان از اشباع شدن خاک‌اره دارد.

درنهایت نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که بیش‌ترین راندمان جذب برابر با ۹۸/۳۳ درصد است که در شرایط بهینه مقدار pH برابر با ۵، مقدار جاذب ۱۰ گرم در لیتر، زمان تماس ۳۰ دقیقه و مقدار غلظت اولیه فلز کادمیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر انجام گرفت. با توجه به درصد حذف بالای خاک‌اره درخت کنار در حذف فلز کادمیوم می‌توان این نوع روش را به‌عنوان روشی مؤثر در حذف فلزات سنگین به‌حساب آورد.

مراجع

سمرقندی، م.، عزیزیان، س.، شیرزاد سیبنی، م.، علیجانزاده، م.، ۱۳۸۸. حذف کروم شش ظرفیتی از محیط‌های آبی با استفاده از خاک‌اره درخت راجی اصلاح‌شده: مطالعه تعادلی و سینتیکی، دوازدهمین همایش ملی بهداشت محیط، تهران، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی.

ملکوتیان، م.، کرمی، ا.، یغمائیان، ک.، ۱۳۸٤. بررسی کارای خاکستر چوب در حذف کادمیم از فاضلاب صنایع تولید رنگ (بینالود کرمان)، هشتمین همایش ملی بهداشت محیط، تهران، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران.

میری طرهان، ف.، قاسمی، ن.، ۱۳۹۲. جذب یون فلزی کبالت از محلول آبی توسط زغال فعال تهیه‌شده از چوب درخت انجیر، اولین همایش ملی فناوری‌های نوین در شیمی و مهندسی شیمی، تهران، شرکت تعاونی علمی پژوهشی ویستا.

هاشمی شرف آباد، س.، رحیمی، م.، قائدی، م.، دانایی، م.، ۱۳۹۱. حذف فلزات (سرب، کروم و کبالت) از محیط آبی به‌وسیله مخلوطی از جاذب‌های خاک‌اره و ساقه درخت بنه، همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

Altin, O., HO, O. and Dogu, T., 1998. Use of general purpose adsorption isotherms for heavy metal claymineral interactions. Journal of Colloid and Interface Science. 198(1): 130-140.

Azizian, S., 2004. Kinetic models of sorption: A theoritical analysis. Journal of Colloid and Interface Science. 276(1): 47-52.

Bayramoglu, G., Gursel, I., Tunali, Y. and Arica, M.Y., 2009. Biosorption of phenol and 2-chlorophenol byFunalia trogii pellets. Bioresour, Technol. 100(10): 2685-2691.

El-Sherif, I.Y., Ashmawy, A. and Badr, S., 2008. Biosorption of Cadmium and Nickel by nile water algae. Journal of Applied Sciences Research. 4(4): 391-396.

Fan, X., Parker, D.J. and Smith, M.D., 2003. Adsorption kinetics of fluoride on low cost materials. Water Research. 37(20): 4929-4937.

Freundlich, H.M.F., 1906. Uber die adsorption in losungen. The Journal of Physical Chemistry. 57(A): 385-470.

Ghasemi, S. and Mafi Gholami, R., 2015. Lead Adsorption From Synthetic Wastewater by Prosopis Mimosaceae Sawdust. Jundishapur Journal of Health Sciences. 7(1): 1-7.

Hameed, B.H., 2009. Evaluation of papaya seed as a novel non-conventional low-cost adsorbent for removal of methylene blue. Journal of Hazardous Materials. 162(2): 939-944.

Hart, J., 2004. Encarta, Encyclopedia " water pollution.

Langmuir, I., 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Journal of the American Chemical Society. 38(11): 2221-2295.

Malkoc, E. and Nuhoglo, Y., 2005. Investigations of nickel(II) removal from aqueous solutions using tea factory waste. Journal of Hazardous Materials. B127: 120–128.

Mohan, D. and Singh, K.P., 2002. Single- and multi-component adsorption of Cadmium and Zinc using activated carbon derived from bagasse–an agricultural waste. Journal Water Research. 36(9): 2304-2318.

Mobasherpour, I., Salahi, E. and Pazouki, M., 2011. Removal of divalent cadmium cations by means of synthetic nano crystallite hydroxyapatite. Journal Desalination. 266(1): 142-148.

Nemr, A.E., 2009. Potential of pomegranate husk carbon for Cr(VI) removal from wastewater: Kinetic andisotherm studies. Journal of Hazardous Materials. 161(1): 132-141.

O'Connell, D.W., Birkinshaw, C. and O'Dwyer, T.F., 2008. Heavy metal adsorbents prepared from the

modification of cellulose. Journal Bioresource Technol. 99(15): 6709-6724.

Shams Khorramabadi, Gh., Darvishi Cheshmeh Soltani, R. and Jorfi, S., 2010. Cd(II) adsorption using waste sludge from a municiap wastewater treatment system. Journal of Water and Wastewater. 1: 57-62.

Siva Kumar, N., Woo, .H.S. and 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: 125-132.

Saki, P., Mafi Gholami, R. and Takdastan, A., 2013. Removal of cadmium from industrial wastewater by steel slag. Jundishapur Journal of Health Sciences.5(1): 24-33.