

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

چکیده

هدف از این مطالعه که در سال ۱۳۹۳ انجام گرفت، بررسی استفاده از خاکاره درخت کنار به‌عنوان جاذبی ارزان قیمت 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 سنتتیک‌های 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 سنتتیک نشان داد که جذب کادمیوم با مدل سنتتیکی جذب مرتبه دوم مطابقت دارد ($R^2=1$). با توجه به راندمان بالای حذف کادمیوم توسط خاکاره درخت کنار می‌توان از این روش به‌عنوان جاذبی نسبتاً کارآمد و ارزان قیمت برای جذب کادمیوم استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: حذف کادمیوم، خاکاره درخت کنار، سنتتیک جذب، ایزوترم 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@iauhvaz.ac.ir

کد مقاله: ۱۳۹۴۰۳۰۱۲۶

تاریخ دریافت: ۲۰۱۴/۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۲۰۱۵/۴/۲۱

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی

ارشد می‌باشد.

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 می‌تواند 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 از جمله می‌توان به روش‌هایی همچون فیلتراسیون، انعقادسازی، اکسیداسیون و تبادل یونی اشاره نمود (O' Connell et al., 2008). اما بسیاری از این روش‌ها اغلب



وقت گیر، دارای بهای بالا و کارایی کم هستند. امروزه روند تحقیقات در جهت یافتن روش‌های ساده و ارزان قیمتی 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. به کارگیری 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 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، 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 ۱۰ پی‌پی‌ام 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 سینتیک 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 در نهایت 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 سانتی‌گراد 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 مورد استفاده دارای درجه خلوص آزمایشگاهی و ساخت شرکت مرک بود و مراحل آزمایش در دمای 20 ± 0.5 درجه سانتی‌گراد 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 مورد استفاده 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 به منظور تعیین مقدار بهینه جاذب، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، مقادیر ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱ میلی لیتر با غلظت اولیه کادمیوم ۱۰ میلی گرم در لیتر و با مقدار pH بهینه به دست آمده 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 آماده سازی محلول های ۵۰ میلی لیتر با غلظت اولیه کادمیوم ۱۰ میلی گرم در لیتر، مقادیر بهینه خاکاره و pH به دست آمده از مراحل قبل در محلول ها اضافه و تنظیم گردید و نمونه ها در فواصل زمانی بین ۱۵ الی ۱۲۰ دقیقه از همزن خارج و مورد آنالیز قرار گرفتند (Ghasemi and Mafi Gholami, 2015).

به منظور بررسی تأثیر غلظت های اولیه کادمیوم بر میزان جذب، با متغیر قرار دادن مقدار غلظت اولیه و ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، محلول های ۵۰ میلی لیتر با غلظت های اولیه کادمیوم ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی گرم در لیتر آماده و پس از تنظیم و افزودن مقادیر بهینه pH و خاکاره و طی زمان تماس بهینه به دست آمده در مرحله قبل از همزن خارج و مورد آنالیز قرار گرفتند (Saki et al., 2013). که مقدار ماده جذب شده به ازای هر گرم جاذب (ظرفیت جذب) در رابطه ۱ ارائه شده است (Saki et al., 2013).

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{W} \quad \text{رابطه ۱}$$

که C_0 (میلی گرم بر لیتر) غلظت اولیه ماده جذب شونده، C_e (میلی گرم بر لیتر) غلظت ماده جذب شونده بعد از جذب، V حجم محلول بر حسب لیتر و W وزن ماده جاذب بر حسب گرم می باشد.

مطالعات ایزوترم های جذب کادمیوم روی خاکاره درخت کنار

آنالیز اطلاعات حاصل از ایزوترم به منظور توسعه معادله ای که توسط آن بتوان طراحی لازم را انجام داد، اهمیت فراوان دارد. علاوه بر این از ایزوترم جذب می توان برای توصیف چگونگی واکنش ماده جذب شونده با جاذب و همچنین بهینه سازی مقدار کاربرد جاذب استفاده نمود (Hameed, 2009).

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

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m \times K_1 \times C_e} \quad \text{رابطه ۲}$$

که q_e (میلی گرم در گرم) مقدار ماده جذب شده 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 جذب اند. مقادیر q_m و K_1 را می توان با رسم تغییرات $1/q_e$ بر حسب $1/C_e$ تعیین کرد. مشخصه اساسی معادله لانگمویر ثابت بدون بعدی به نام پارامتر تعادل می باشد که در رابطه ۳ ارائه شده است (Bayramoglu et al., 2009).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_1 \times C_0} \quad \text{رابطه ۳}$$

R_L بیانگر نوع ایزوترم است. برای جذب مطلوب $R_L < 1$ ، برای جذب نامطلوب $R_L > 1$ ، برای جذب خطی $R_L = 1$ و برای جذب غیرقابل برگشت پذیر $R_L = 0$ است (Bayramoglu et al., 2009).

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

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

که در آن K_F ظرفیت جذب در غلظت واحد، $1/n$ شدت جذب سطحی، C_e غلظت تعادلی برحسب میلی گرم در لیتر و q_e مقدار ماده جذب شده به ازای واحد وزن جسم جاذب برحسب میلی گرم در گرم می باشد. از نمودار خطی $\log(q_e)$ در مقابل $\log(C_e)$ ، K_F و $1/n$ تعیین می شود که مقدار پارامتر $1/n$ بیانگر نوع فرآیند جذب است که اگر $1/n=0$ نوع جذب برگشت ناپذیر، $0 < 1/n < 1$ وضعیت جذب مطلوب و اگر $1/n > 1$ باشد وضعیت جذب نامطلوب می باشد (Siva Kumar *et al.*, 2012).

یکی از مهم ترین فاکتورها برای فرآیند جذب، پیش بینی سرعت جذب می باشد. سینتیک جذب به خواص فیزیکی و شیمیایی مادهی جاذب بستگی دارد که مکانیزم جذب را تحت تأثیر قرار می دهد.

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

$$\text{Log } (q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{K_1}{2/0303} t \quad \text{رابطه ۵}$$

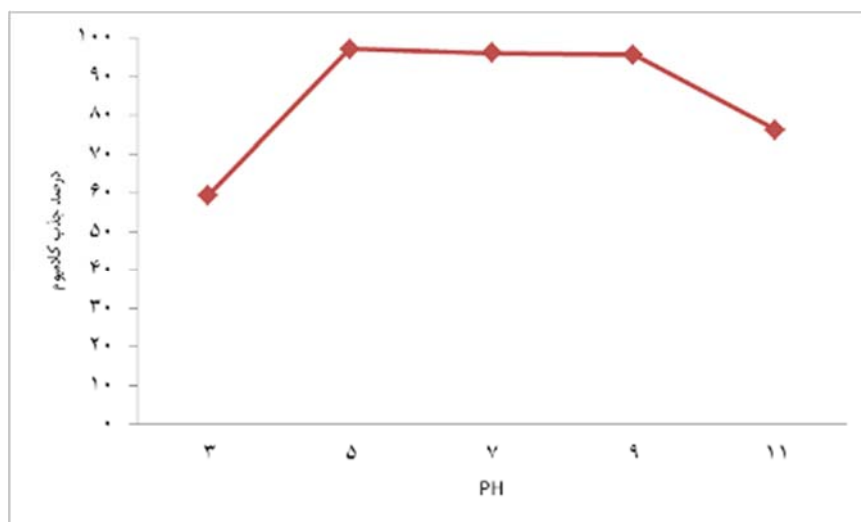
در این معادله q_e ظرفیت جذب خاکاره در حالت تعادل برحسب میلی گرم بر گرم، q_t مقدار کادمیوم جذب شده در زمان t برحسب میلی گرم بر گرم و k_1 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه اول بر مبنای $1/\text{min}$ است. مدل سینتیکی مرتبه اول با رسم خطی $\log(q_e - q_t)$ برحسب t به دست می آید که k_1 و q_e را از شیب و عرض از مبدأ نمودار ترسیم شده و ضریب همبستگی R^2 را نیز می توان از نمودار به دست آورد. مدل سینتیک جذب مرتبه دوم نیز از متداولترین مدل های تجزیه و تحلیل سینتیک واکنش های جذب هستند که در رابطه ۶ ارائه شده است (Azizian, 2004).

$$\frac{t}{q_t} = \left[\frac{1}{q_e} \right] t + \left[\frac{1}{K_2 \times q_e^2} \right] \quad \text{رابطه ۶}$$

به طوری که در این معادله q_e ظرفیت جذب خاکاره در حالت تعادل برحسب میلی گرم بر گرم، q_t مقدار کادمیوم جذب شده در زمان t برحسب میلی گرم بر گرم و k_2 ثابت سرعت تعادل جذب مرتبه دوم برحسب گرم/میلی گرم/دقیقه می باشد. مدل سینتیکی مرتبه دوم با رسم خطی t/q_t برحسب t به دست می آید که q_e و k_2 را از شیب و عرض از مبدأ نمودار ترسیم شده و ضریب همبستگی R^2 را نیز می توان از نمودار به دست آورد. در این مرحله به منظور شناسایی مورفولوژی و چگونگی جذب فلز کادمیوم بر روی خاکاره درخت کنار از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید.

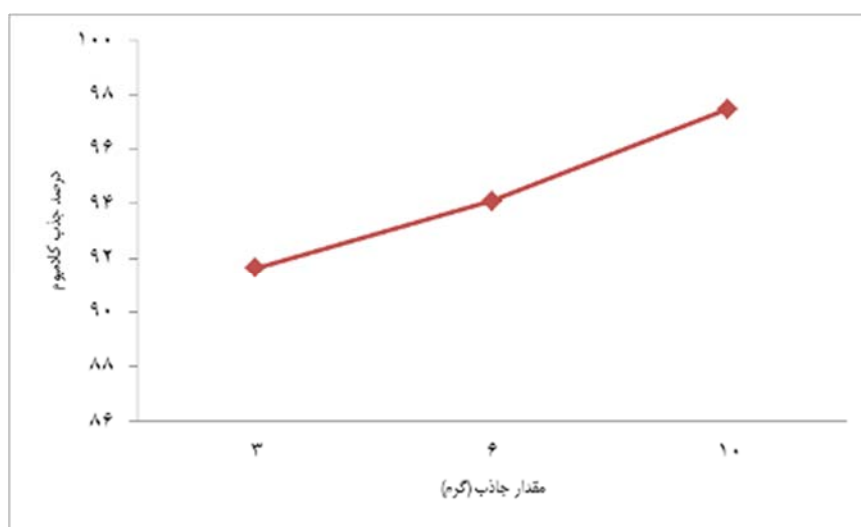
نتایج

شکل ۱ نتایج تأثیر pH های مختلف بر درصد جذب را نشان می دهد.



شکل ۱: تأثیر pHهای مختلف بر درصد جذب کادمیوم.

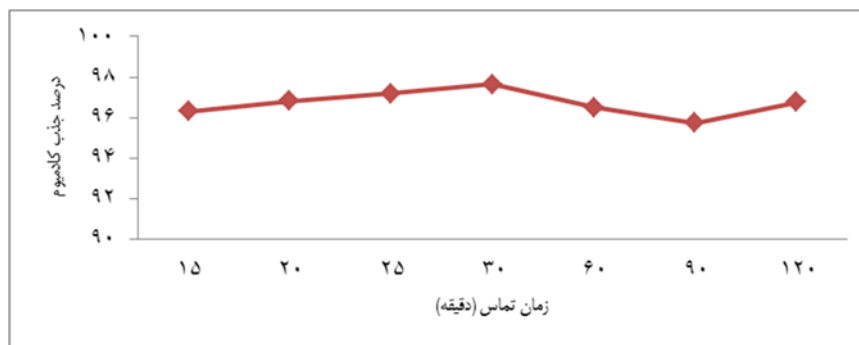
نتایج حاصل از بررسی تأثیر مقدار جاذب روی جذب کادمیوم در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: تأثیر مقدار جاذب مختلف بر درصد جذب کادمیوم.

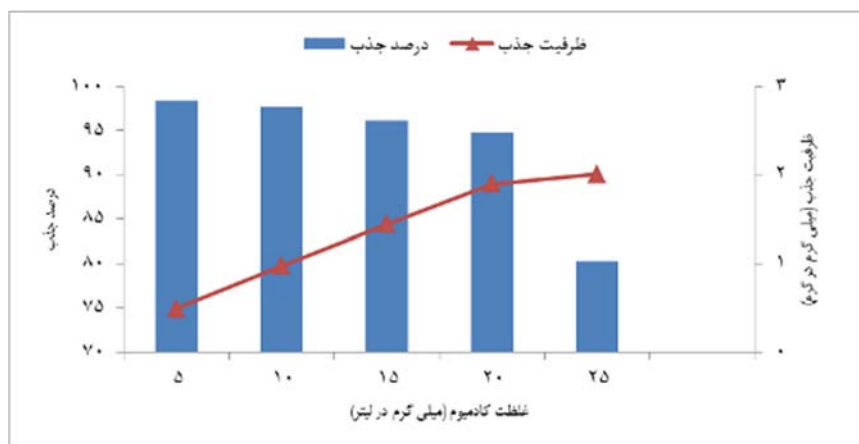
نتایج حاصل از تأثیر زمان تماس بر میزان جذب کادمیوم در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی حذف کادمیوم توسط خاکاره درخت کنار از پساب سنتتیک و تعیین ایزوترمها و سینتیک جذب / قاسمی و مافی غلامی



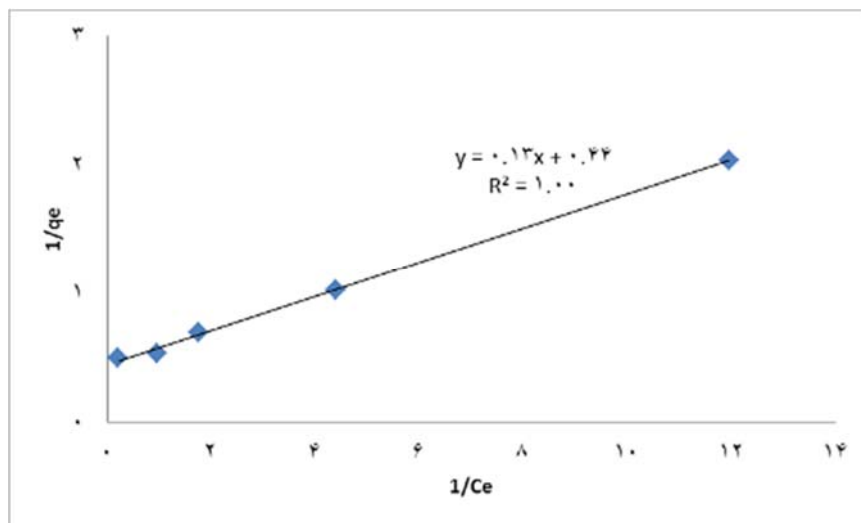
شکل ۳: تأثیر زمان تماس‌های مختلف بر درصد جذب کادمیوم.

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



شکل ۴: 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 $R_L = 0/011$ و ضریب همبستگی $R^2 = 0/9981$ به دست آمده بیان گر تطبیق داده‌ها بر ایزوترم لانگمویر می‌باشد.

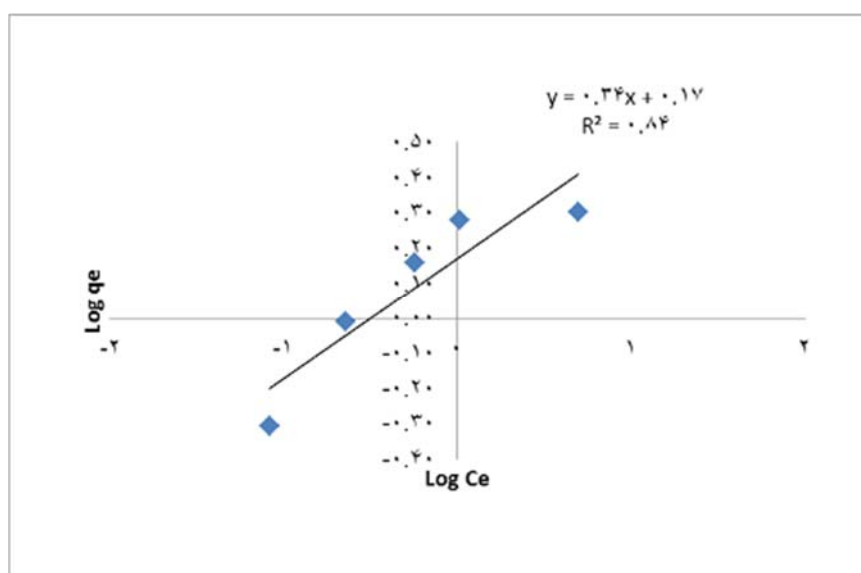


شکل ۵: مدل ایزوترم لانگمویر برای جذب کادمیوم.

جدول ۱: نتایج محاسبات ایزوترم لانگمویر.

q_m	۲/۲۵۸
K_1	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 $1/n$ فرآیند جذب مطلوب می‌باشد ولی به دلیل کمتر بودن مقدار R^2 به دست آمده در این ایزوترم (جدول ۲) نسبت به ایزوترم لانگمویر (جدول ۱) بیانگر تطبیق کامل فرآیند جذب با ایزوترم لانگمویر می‌باشد.



شکل ۶: مدل ایزوترم فروندلیچ برای جذب کادمیوم.

جدول ۲: نتایج محاسبات ایزوترم فروندلیچ

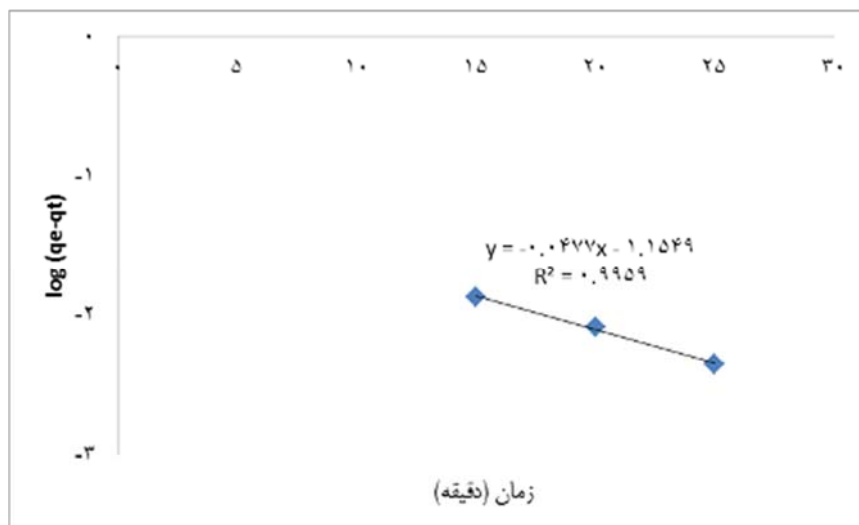
K_F	۱/۴۸۳
$1/n$	۰/۳۴۴۷

نتایج سینتیک جذب مرتبه اول کادمیوم در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. از پارامترها و شکل می توان به این نتیجه رسید که داده ها از مدل سینتیک جذب مرتبه اول تبعیت نمی نمایند. به این دلیل که با وجود اینکه مقدار R^2 مطلوب می باشد ولی مقادیر q_e به دست آمده از آزمایش با q_e محاسبه شده از طریق شکل برابر نمی باشند.

نتایج سینتیک جذب مرتبه دوم کادمیوم در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده است. از پارامترها و شکل می توان به این نتیجه رسید که داده ها از مدل سینتیک جذب مرتبه دوم تبعیت می نمایند. به این دلیل که مقدار R^2 مطلوب می باشد و مقادیر q_e به دست آمده از آزمایش با q_e محاسبه شده از طریق شکل برابر می باشند.

جدول ۳: نتایج سینتیک جذب مرتبه اول.

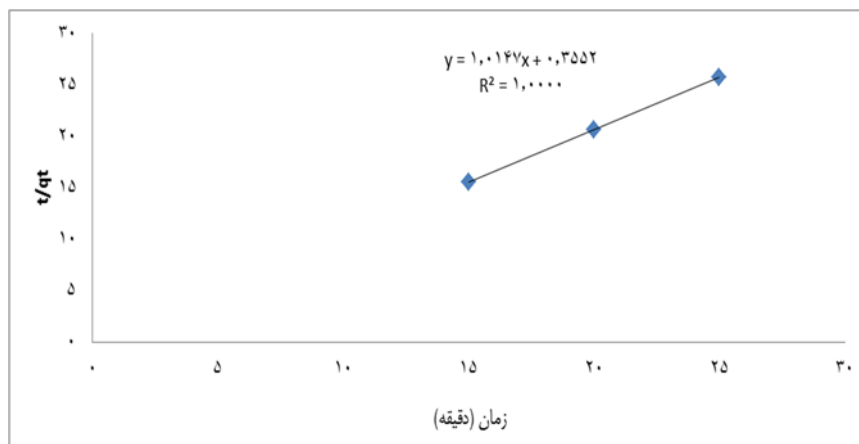
K_1	q_e (محاسبه شده)	q_e (آزمایش)	R^2
۰/۰۹۶۸	۰/۰۷	۰/۹۷۴۶	۰/۹۹۵۹



شکل ۷: مدل سینتیک جذب مرتبه اول.

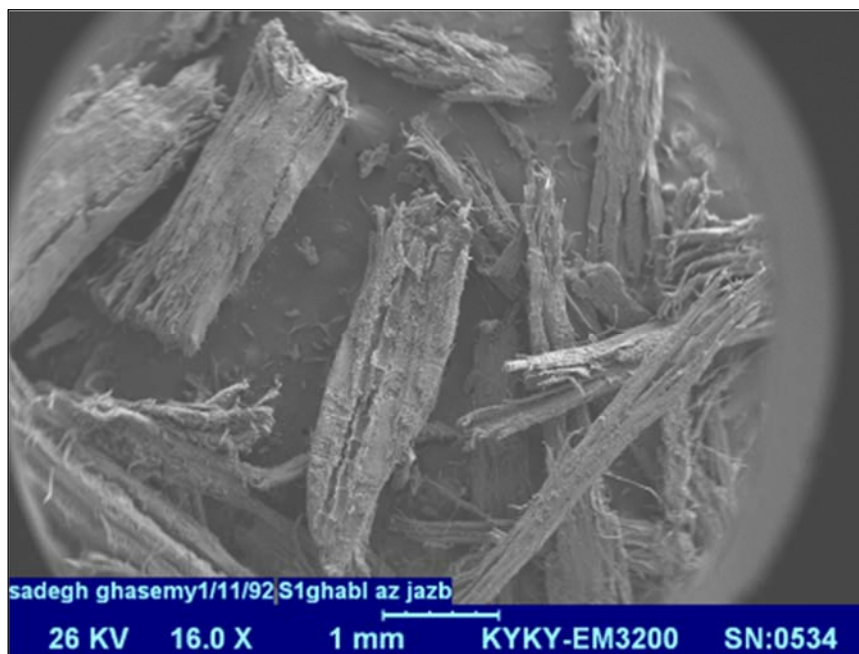
جدول ۴: نتایج سینتیک جذب مرتبه دوم.

K_2	q_e (محاسبه شده)	q_e (آزمایش)	R^2
۲/۸۹۸۶	۰/۹۸۵۵	۰/۹۷۴۴	۱

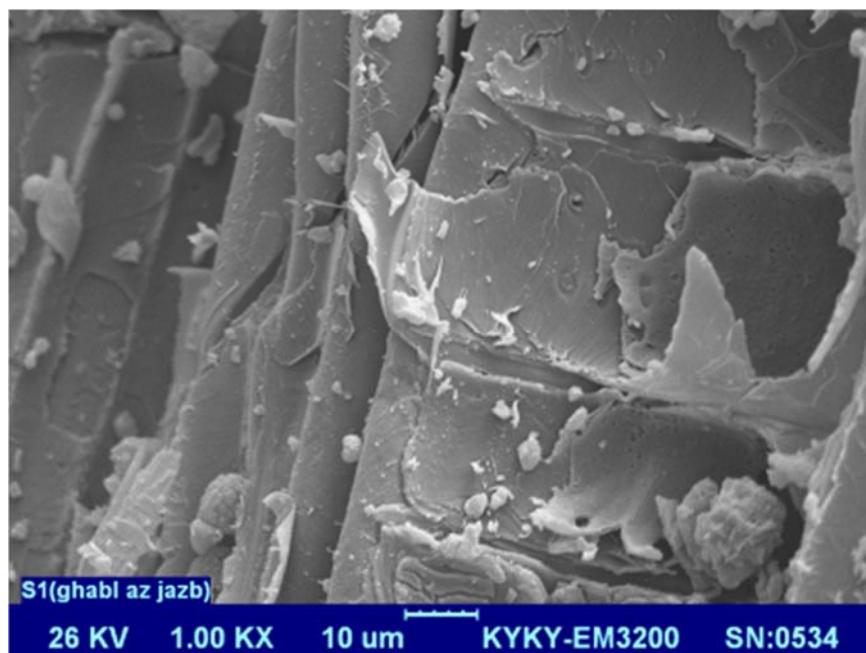


شکل ۸: مدل سینتیک جذب مرتبه دوم.

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 پر کرده‌اند و فرآیند جذب صورت گرفته است.



شکل ۹: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از جذب فلز توسط خاکاره درخت کنار با بزرگ‌نمایی ۱۶X.



شکل ۱۰: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از جذب فلز توسط خاکاره درخت کنار با بزرگنمایی ۱KX.



شکل ۱۱: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از جذب فلز توسط خاکاره درخت کنار با بزرگنمایی ۱۰۰X.



شکل ۱۲: عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از جذب فلز توسط خاکاره درخت کنار با بزرگنمایی ۱KX.

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصله با افزایش pH از ۳ تا ۵، راندمان حذف افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. طبق مطالعات انجام شده در pH میانی اسیدی‌تر از pH برابر با ۵، غلظت یون H^+ در محلول بالاست و این کاتیون با کادمیوم برای نشست 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 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 افزایش یافته 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 با گذشت زمان واکنش جذب شروع می‌شود و با گذشت بیشتر زمان واکنش معکوس و جذب 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 نگاه داشتن 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 جذب شده به ازای هر گرم جاذب (ظرفیت جذب) افزایش ولی درصد جذب کاهش می‌یابد. به طوری که 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 به عنوان 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.

در نهایت 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 سبینی، م.، علیچانزاده، 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.، یغمائی، ک.، ۱۳۸۴. 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 شرف‌آباد، س.، رحیمی، م.، قانیدی، 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 theoretical 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 by *Funalia troglitii* 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 and isotherm 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 municipal 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.

