

یادداشت فنی

کارایی زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت جهت جذب فلز سرب از محلول‌های آبی و تعیین ایزوترم و سینتیک جذب

پرویز جوانمردی^۱، افشین تکدستان^۲، رضا جلیل‌زاده ینگجه^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران
 ۲- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط و عضو مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز، اهواز، ایران
 (نویسنده مسئول) afshin_ir@yahoo.com

۳- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(دریافت ۹۵/۲/۴ پذیرش ۹۶/۶/۱۵)

چکیده

استفاده از جاذب‌های ارزان قیمت برای حذف فلزات سنگین از جمله سرب در سال‌های اخیر توسط پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق حذف فلز سرب توسط زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت مورد بررسی قرار گرفت. جذب سرب از محلول آبی به صورت ناپیوسته با استفاده از زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت انجام شد. برای تعیین ویژگی‌های زئولیت از میکروسکوپ الکترونی روبشی و دستگاه پراش نگار اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. تأثیر متغیرهای pH در مقدار ۳، ۵، ۷ و ۱۰، زمان تماس مقدار جاذب طبیعی کلینوپتیلولایت و غلظت فلز سرب در دمای ثابت و سرعت همزن ۲۵۰ دور بر دقیقه بر کارایی حذف سرب و ایزوترم‌ها و سینتیک جذب بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده در شرایط بهینه برای حذف سرب با زئولیت طبیعی در pH برابر ۸، جاذب ۵ گرم در لیتر و زمان تماس ۴۵ دقیقه بالاترین راندمان حذف یعنی ۸۹/۶ درصد به دست آمد. با افزایش غلظت فلز مقدار فلز حذف شده کاهش و ظرفیت جذب افزایش یافت. مدل لانگمیر برای جذب فلز سرب تطابق بهتری نسبت با سایر ایزوترم‌ها داشت ($R^2=0/99$). همچنین مدل سینتیک شبه درجه دوم بهتر از سایر مدل‌ها با داده‌های به دست آمده همخوانی داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت می‌تواند به عنوان یک جاذب کارآمد و ارزان به منظور حذف فلز سنگین سرب از محیط‌های آبی به کار رود.

واژه‌های کلیدی: زئولیت طبیعی، کلینوپتیلولایت، جذب، حذف سرب، ایزوترم جذب

۱- مقدمه

بنابراین در بهداشت جامعه، حذف یا کنترل غلظت سرب از محلول‌های آبی، موضوع مهمی محسوب می‌شود (Sprynskyy et al. 2005; Tao et al. 2010). روش‌های مختلف شیمیایی و فیزیکوشیمیایی برای حذف فلزات سنگین از جمله سرب از قبیل ترسیب شیمیایی، جذب سطحی، تغلیظ محلول، اولترافیلتراسیون و تبادل یونی شناخته شده است (Kolodynska 2011; Takdastan & Pazoki 2011; Godik & Imamoglu 2008). هریک از این روش‌ها دارای محاسن و نیز محدودیت‌هایی مانند عدم صرفه اقتصادی و عدم کارایی بالا در حذف مقادیر بسیار اندک آلاینده هستند. ترسیب شیمیایی، اکسیداسیون، اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس، جذب سطحی بر روی کربن فعال و تبادل یونی معکوس، روش‌های اصلی برای تصفیه فاضلاب‌های آلوده حاوی فلزات سنگین به شمار می‌رود. اما به نظر می‌رسد با

سرب یک فلز سنگین است که در صنایع شیشه، رنگ‌سازی، نساجی، آبکاری، نفت، پتروشیمی و غیره کاربرد دارد. آلوده شدن منابع صنعتی و معدنی در ایجاد آلودگی‌های منطقه‌ای مؤثر است (Doula & Dimirkou 2008; Takdastan et al. 2014; Jorfi et al. 2014). غلظت سرب در آب‌های طبیعی بین ۰/۴ تا ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر است. این میزان در آب‌های خام سطحی و زیرزمینی حدود ۰/۰۴ تا ۰/۰۸ میلی‌گرم در لیتر با میانگین ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر سرب است (Jorfi et al. 2014; Takdastan et al. 2009). اثرات بهداشتی سمیت سرب بر انسان براساس میزان سرب در خون سنجیده می‌شود. این اثرات معمولاً سیستم عصبی را نشانه می‌گیرد و آسیب‌های برگشت ناپذیر و غیر قابل جبران بر مغز می‌گذارد (Takdastan et al. 2009; 2010; Gunay et al. 2007).

و سپس با آب مقطر شسته و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در تماس با آب مقطر قرار داده شد تا املاح و ناخالصی‌های محلول نمونه ژئولیت حذف شود. در نهایت ژئولیت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در آن به مدت ۲۴ ساعت خشک شد.

۲-۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

تهیه محلول استوک سرب بر مبنای روش‌های ارائه شده در مرجع استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب صورت پذیرفت. برای تهیه محلول میزان ۲/۷۴۴ گرم از پودر نیترات سرب در یک لیتر آب مقطر اضافه شد و غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر از فلز تهیه شد. برای ساخت سایر غلظت‌ها (۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) از این محلول با نسبت‌های مناسب رقیق‌سازی استفاده شد.

در این پژوهش کلیه آزمایش‌ها جذب در یک سیستم ناپیوسته، با نمونه‌هایی به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر حاوی سرب با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. متغیرهای مورد بررسی در این فرایند و در طی انجام آزمایش‌ها شامل زمان تماس، pH، غلظت‌های اولیه ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت به‌عنوان جاذب و غلظت اولیه محلول فلز سنگین سرب بود. به‌منظور صحت و دقت آزمون، نتایج بسیاری از داده‌ها ۳ بار تکرار شد. برای تعیین غلظت باقیمانده فلز سرب از دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی شعله AAS استفاده شد (Guo et al. 2015; Fazelipour & Takdastan 2011).

نتایج حاصل از بررسی اثر pH، زمان تماس، غلظت اولیه فلزات و مقدار جاذب بر میزان جذب انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel رسم شد.

۳- نتایج

۳-۱- تعیین خصوصیات فیزیکوشیمیایی و مشخصات سطحی ژئولیت کلینوپتیلولایت

به‌منظور تعیین ترکیب شیمیایی ژئولیت، آنالیز فلورسانس پرتو ایکس و مورفولوژی سطح ژئولیت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ تعیین شد. با توجه به نتایج آنالیز ارائه شده ملاحظه شد که SiO₂ بیشتر از ۶۸/۴ درصد ژئولیت را تشکیل می‌دهد.

توجه به وفور ماده معدنی ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت و هزینه کم آن، این روش در حذف سرب مناسب‌تر باشد. علاوه بر این ژئولیت استفاده شده می‌تواند با هزینه مقرون به صرفه دفع یا بازیابی شود (Gedik & Imamoglu 2008; Wang & Peng 2010; Saki et al. 2013).
ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت دارای یک ساختار سه بعدی است که ساختار مولکولی تیپیک آن $(Na_2, K_2, Ca, Mg)_3[AlO_2]_6(SiO_2)_{30} \cdot 24H_2O$ است (Karapanagioti et al. 2005; Ouadjenia- Marouf et al. 2014). در دهه اخیر پژوهش‌های فراوانی در زمینه جذب فلزات سنگین توسط ژئولیت کلینوپتیلولایت انجام شده است. در این پژوهش‌ها فلزاتی چون سرب، کادمیم، جیوه، مس، نیکل، روی، کبالت، کروم و منگنز با ظرفیت‌های مختلفی توسط این جاذب حذف شده‌اند (Hegazi 2012; Guo et al. 2015).

باتوجه به وجود منابع عظیم ژئولیت در ایران و بهره‌برداری از این منابع در مناطقی از قبیل سمنان، این منابع می‌توانند به‌طور گسترده‌ای در حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی از جمله فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرند (Fazelipour & Takdastan 2011).

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی کارایی ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت در حذف فلزات سنگین به‌ویژه فلز سرب در آب و فاضلاب و ارائه یک روش مناسب و کارآمد برای حذف این فلز از محیط‌های آبی با استفاده از ژئولیت کلینوپتیلولایت طبیعی منطقه سمنان انجام شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی ژئولیت

وجود معادن عظیم ژئولیتی به‌ویژه کلینوپتیلولایت در ایران، دلیل اصلی انتخاب این ژئولیت به‌عنوان جاذب در این پژوهش است. به این منظور و با توجه به مطالعات انجام شده، از نمونه ژئولیت‌های معادن واقع در جنوب شرقی سمنان برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد. پس از انتقال نمونه ژئولیت به آزمایشگاه، فرایندهای مختلفی بر روی آن انجام شد تا برای انجام آزمایش‌ها آماده شود. ابتدا ژئولیت خرد شده توسط الک‌های استاندارد ASTM (۰/۲۵ تا ۰/۳ میلی‌متر)، مش ۴۰ الک شد. پس از مش‌بندی، به‌منظور حذف ذرات خاک و گرد و غبار، ژئولیت با آب معمولی شبکه آب شهری

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

بازده حذف و ظرفیت جذب در این pH به ترتیب برابر ۸۳/۴۰ درصد و ۵/۲۲ میلی‌گرم در گرم به دست آمد. لذا pH بهینه حذف سرب برابر ۸ به دست آمد.

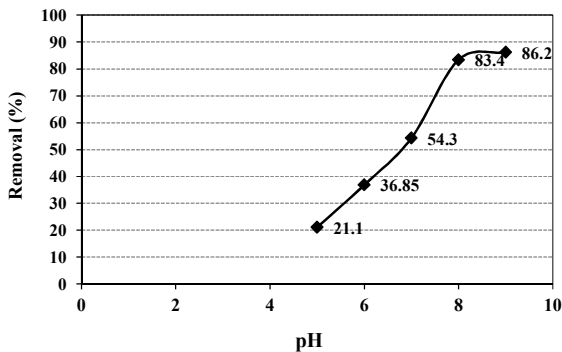


Fig.2. Efficiency of lead removal in different adsorbent doses, feed concentration of 150 mg/L, pH=7 and contact time of 60 minutes.

شکل ۲- میزان بازدهی حذف فلز سرب در دزهای مختلف جاذب، غلظت ورودی ۵۰ mg/l، pH برابر ۷ و زمان تماس ۶۰ دقیقه

۳-۴- تعیین اثر زمان تماس بر جذب فلز سرب

بر اساس شکل ۴، با افزایش زمان تماس، بازدهی حذف سرب افزایش یافت. در زمان تماس ۴۵ دقیقه تقریباً بازدهی حذف به تعادل رسید و با سرعت کمتری افزایش یافت، بنابراین این زمان به عنوان زمان بهینه در نظر گرفته شد. بازدهی حذف و ظرفیت جذب در این زمان به ترتیب برابر ۸۳/۱ درصد و ۵/۱۹ میلی‌گرم در گرم به دست آمد.

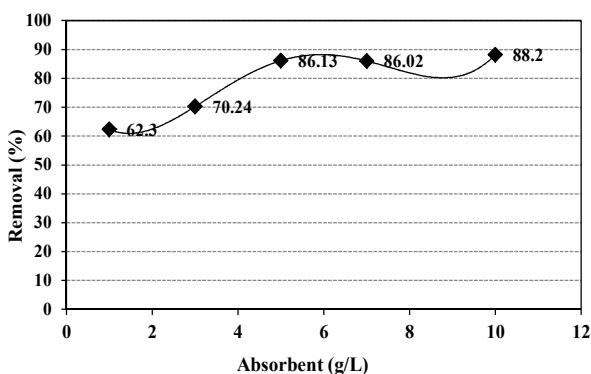


Fig. 3. Efficiency of lead removal in different pH, feed concentration of 150 mg/L, in 60 minutes and adsorbent dosage of 5 g/L

شکل ۳- میزان بازدهی حذف فلز سرب در pHهای مختلف،

غلظت ورودی ۵۰ mg/l در زمان ۶۰ دقیقه و دز جاذب ۵ g/L

تصاویر SEM اطلاعاتی از جمله خصوصیات سطح، مورفولوژی شامل شکل، اندازه و نحوه قرارگیری ذرات در سطح جسم و ترکیب شامل اجزایی که نمونه را می‌سازند در اختیار می‌گذارد. در شکل ۱ تصاویر SEM زئولیت طبیعی پس از شستشو با آب مقطر آورده شده است که موقعیت و شدت نسبی قله‌های آن یعنی SiO_2 پایه اصلی ساختار زئولیت را شامل می‌شود.

۳-۲- تعیین اثر دز جاذب بر جذب فلز سرب

تغییرات غلظت باقیمانده، ظرفیت جذب و بازدهی حذف فلز سرب در دزهای مختلف جاذب در pH برابر ۷ و زمان تماس ۶۰ دقیقه برای غلظت ورودی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. مطابق شکل ۲، با افزایش دز جاذب بازدهی حذف سرب افزایش یافت و در دز ۳ گرم در لیتر میزان درصد حذف تقریباً ثابت شده؛ بنابراین این دز به عنوان دز بهینه در نظر گرفته شد. بازدهی حذف و ظرفیت جذب در این دز به ترتیب برابر ۸۶/۱۳ درصد و ۵/۳۸ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد. راندمان حذف سرب در دز جاذب ۵ گرم در لیتر بیشتر شد.



Fig. 1. SEM image of clinoptilolite zeolite after washing

شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM زئولیت

کلینوپتیولایت پس از شستشو

۳-۳- تعیین اثر pH محلول بر جذب فلز سرب

تغییرات غلظت باقیمانده، ظرفیت جذب و بازدهی حذف فلز سرب در pHهای مختلف و زمان تماس ۶۰ دقیقه و دز جاذب ۵ گرم در لیتر برای غلظت ورودی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر انجام شد. بر اساس شکل ۳، با افزایش pH، بازدهی حذف سرب افزایش یافت اما در pH بالاتر از ۸ میزان درصد حذف با سرعت کمتری افزایش یافت.

۳-۵- اثر غلظت اولیه فلز بر جذب فلز سرب مطابق شکل ۵، با کاهش غلظت اولیه سرب، بازدهی حذف افزایش یافت به طوری که بازده حذف در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ۸۹/۸ درصد رسید اما در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط یکسان بازده حذف ۴۵/۲ درصد بود.

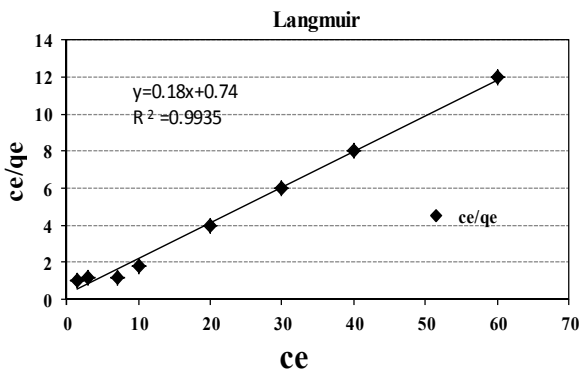


Fig. 6. Lead Langmuir isotherm curve by using natural zeolite, contact time of 45 min, pH=8 and adsorbent dosage of 5 g/L

شکل ۶- منحنی ایزوترم لانگمیر جذب سرب با استفاده از زئولیت طبیعی، زمان تماس برابر ۴۵ دقیقه و pH برابر ۸ و دز جاذب ۵ g/L

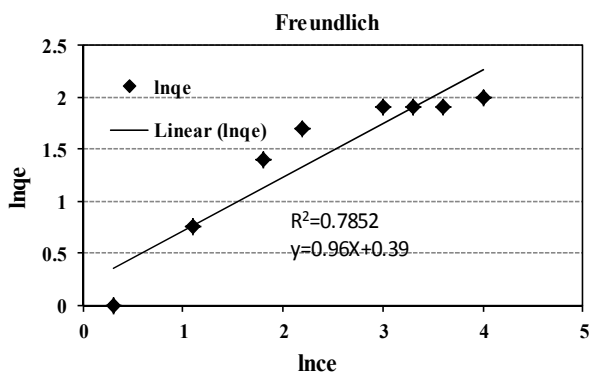


Fig. 7. Lead Freundlich isotherm curve by using natural zeolite, contact time of 45 min, pH=8 and adsorbent dosage of 5 g/L

شکل ۷- منحنی ایزوترم فروندلیچ جذب سرب با استفاده از زئولیت طبیعی، زمان تماس برابر ۴۵ دقیقه و pH برابر ۸ و دز جاذب ۵ g/L

جدول ۱- پارامترهای مربوط به ایزوترم‌های جذب فلز سرب

Table 1. Lead adsorption isotherm parameters

Parameter	Langmuir			Freundlich		
	$q_{max}(mg/g)$	$K_L (L/mg)$	R^2	N	$K_f (mg/g)$	R^2
Lead	8.51	0.45	0.93	2.46	1.37	0.78

۴- بحث

شکل ۲ تأثیر پارامتر دز جاذب بر راندمان جذب فلز سرب را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات نمودار می‌توان دریافت که از دز جاذب ۵ گرم در لیتر افزایش سریع در راندمان جذب سرب اتفاق افتاده و

۳-۵- اثر غلظت اولیه فلز بر جذب فلز سرب

مطابق شکل ۵، با کاهش غلظت اولیه سرب، بازدهی حذف افزایش یافت به طوری که بازده حذف در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ۸۹/۸ درصد رسید اما در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط یکسان بازده حذف ۴۵/۲ درصد بود.

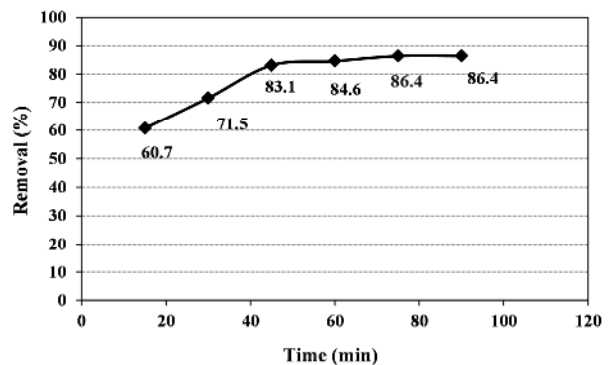


Fig.4. Efficiency of lead removal in different contact times, input concentration of 150 mg/L, pH=8 and adsorbent dosage of 5 g/L

شکل ۴- میزان بازدهی حذف فلز سرب در زمان‌های تماس مختلف، غلظت ورودی ۵۰ mg/L در pH برابر ۸ و دز جاذب ۵ g/L

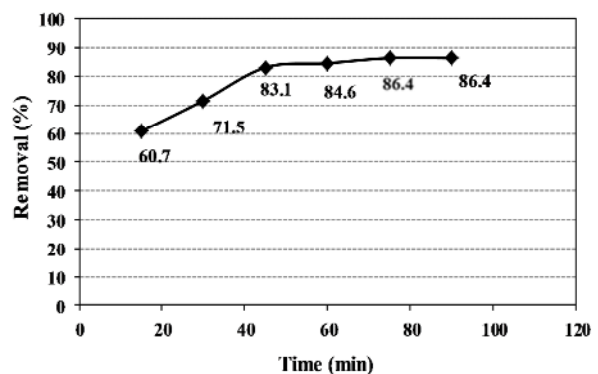


Fig.5. Efficiency of lead removal at different lead concentrations in solution, adsorbent dosage of 5 g/L, pH=8 and contact time of 45 minutes.

شکل ۵- میزان بازدهی حذف فلز سرب در غلظت‌های مختلف فلز، دز جاذب ۵ g/L در pH برابر ۸ و زمان تماس ۴۵ دقیقه

۳-۶- بررسی ایزوترم‌های لانگمیر، فروندلیچ جذب فلز

سرب توسط جاذب

بر اساس داده‌های به دست آمده از شکل‌های ۶ و ۷ که منحنی ایزوترم لانگمیر و فروندلیچ را برای جذب سرب با استفاده از زئولیت طبیعی نشان می‌دهد مشخص است، ایزوترم لانگمیر

بودن گروه‌های کاربردی در سطح جاذب و توانایی این گروه برای اتصال یون‌های فلزی بستگی دارد (Saki et al. 2014). در اغلب موارد، افزایش غلظت اولیه فلز باعث افزایش میزان فلز جذب شده در واحد جرم جاذب و کاهش راندمان حذف کلی می‌شود. شکل ۵ تأثیر پارامتر غلظت اولیه سرب را بر روی راندمان حذف فلز سرب نشان می‌دهد که با توجه به تغییرات نمودار مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اولیه فلز راندمان حذف کاهش یافته است. به نحوی که بیشترین حذف در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. با افزایش غلظت اولیه فلز میزان فلز جذب شده به ازای واحد جرم ماده جاذب افزایش یافت.

با افزایش غلظت فلز از ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، راندمان حذف از ۸۹/۸ درصد به ۴۵/۲ درصد کاهش یافت ولی میزان فلز جذب شده به ازای واحد جرم جاذب از ۱/۰۸ میلی‌گرم بر گرم به ۵/۴۰ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافت. مقدار دز ماده جاذب ۸ گرم در لیتر بود.

در بررسی‌های جذب فلز توسط ژئولیت، ایزوترم‌های فروندلیچ و لانگمیر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین مدل‌های ایزوترمی مقدار غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در زمان تماس ۹۰ دقیقه برای سرب تعیین مقدار شد.

نتایج حاصل از مطالعات ایزوترمی نشان داد که حذف سرب از معادله ایزوترمی لانگمیر با $R^2=0/993$ پیروی می‌کنند. تبعیت ایزوترم فروندلیچ نشان دهنده مولکول‌های ماده جذب شونده به صورت یک لایه، بر سطح ذرات جاذب است و تبعیت جذب سرب با مدل لانگمیر مربوط به جذب تک لایه‌ای است و فرض می‌کند سطح جاذب دارای مکان‌های با انرژی مساوی است که هر مولکول جذب شونده تنها به یک مکان اختصاص داده می‌شود. بنابراین احتمالاً توزیع یکنواخت سایت‌های فعال سطحی جاذب را بیان می‌کند. مطابق نتایج به دست آمده از مدل لانگمیر برای سرب، حداکثر ظرفیت جذب که نشان دهنده حداکثر پوشش تک لایه‌ای جذب برای فلز است، برابر با ۵/۸۱۳ میلی‌گرم در گرم است. نتایج مطالعات ایزوترمی نشان دهنده این است که ثابت n برای مدل فروندلیچ بزرگ‌تر از ۱ است که نشان دهنده شرایط مناسب برای جذب سرب بر سطح ژئولیت می‌باشد (Gedik & Imamoglu 2008; Quadjenia Marouf et al. 2014)

پس از آن تا میزان ۷ گرم در لیتر راندمان با سرعت کمتری افزایش یافته است. بنابراین دز جاذب ۵ گرم در لیتر با راندمان حذف حدوداً ۸۶/۱۲ درصد و ظرفیت جذب ۵/۳۸ میلی‌گرم بر گرم به عنوان میزان جاذب بهینه به دست آمد. با افزایش میزان غلظت جاذب سطح تماس جذب و در نتیجه میزان جذب افزایش می‌یابد (Wang & Peng 2010).

در شکل ۳ مشخص است که از pH برابر ۵ تا ۸ میزان راندمان حذف به سرعت افزایش یافته است و از pH برابر ۸ به بعد این افزایش با روند کندتری صورت گرفته است. در این pH بالاترین میزان حذف برابر ۸۳/۴۰ بود و میزان ظرفیت جذب با میزان ۵ گرم از جاذب، ۵/۲۲ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد.

فعالیت گروه‌های عاملی جاذب به شدت تحت تأثیر pH محلول قرار می‌گیرد. در pH های کم، افزایش یون هیدروژن باعث رقابت بیشتر H^+ با کاتیون‌های محلول شده و H^+ به جای یون‌های فلزی جذب ژئولیت می‌شود، در نتیجه مقدار جذب کاهش پیدا می‌کند. در pH های بالاتر به علت کاهش مقدار H^+ مقدار جذب یون‌های فلزی افزایش یافته و باعث افزایش مقدار جذب می‌شود (Quadjenia-Marouf et al. 2014; Fazelpour & Takdastan 2011).

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش زمان تماس، راندمان حذف سرب افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصله راندمان حذف در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر ابتدا افزایش یافت و سپس در زمان حدود ۴۵ دقیقه میزان حذف به حالت تعادل رسید. در زمان ۴۵ دقیقه بالاترین راندمان حذف حدود ۸۳/۱ درصد به دست آمد. میزان ظرفیت جذب در زمان تعادل با میزان ۵ گرم از جاذب، ۵/۱۹ میلی‌گرم در گرم به دست آمد.

علت کاهش روند سرعت حذف سرب بر روی کلینوپتیلولایت با افزایش زمان تماس خصوصاً در انتهای آزمایش‌ها، به سبب وجود یک لایه از یون‌های سرب بر روی سطح خارجی و منافذ کلینوپتیلولایت و منافذ پراکنده روی سطح داخلی ذرات کلینوپتیلولایت در اثر تماس طولانی و حفظ شرایط هم‌زدن تا انتهای آزمایش‌ها است (Rouyanian Firouz et al. 2011; Saki et al. 2014; Takdastan et al. 2015)

غلظت اولیه فلز در فاز مایع به طور قابل توجهی بر فرایند جذب تأثیر می‌گذارد. این تأثیرگذاری به پارامترهای مختلفی از قبیل نوع فلز و متوسط آن در محلول، حضور کاتیون‌های رقابت، در دسترس

۵- نتیجه‌گیری

جذب سرب با زئولیت کلینوپتیلولایت با سرعت بالایی اتفاق می‌افتد. به‌طوری‌که در زمان‌های ابتدایی (در ۴۵ دقیقه اول) بیشترین بازدهی حذف برای فلز سرب حاصل می‌شود. ایزوترم جذب فلز سرب توسط جاذب کلینوپتیلولایت از مدل لانگمیر تبعیت می‌کند. همچنین در این پژوهش مدل سینتیک شبه درجه دوم بهتر از سایر مدل‌ها با داده‌های به‌دست آمده همخوانی داشت.

جاذب کلینوپتیلولایت طبیعی معدنی مورد استفاده در این پژوهش راندمان مناسبی در حذف فلز سنگین سرب دارد. افزایش بازدهی حذف سرب با افزایش دز جاذب کلینوپتیلولایت، به‌دلیل افزایش مساحت سطحی جاذب و همچنین افزایش سایت‌های غیر اشباع روی سطح جاذب است. حذف فلز سرب توسط جاذب کلینوپتیلولایت طبیعی معدنی در pH بهینه ۸ بیشترین بازدهی را دارد.

References

- Doula, M. & Dimirkou, A., 2008, "Use of an iron-overexchanged clinoptilolite for the removal of Cu^{2+} ions from heavily contaminated drinking water samples", *Journal of Hazardous Materials*, 151(2), 738-745.
- Fazelipour, M. & Takdastan, A., 2011, "Survey on chlorine application in sequencing batch reactor waste sludge in order to sludge minimization", *Asian Journal of Chemistry*, 23(7), 2994-2998. (In Persian).
- Gedik, K. & Imamoglu, I., 2008, "Removal of cadmium from aqueous solutions using clinoptilolite: Influence of pretreatment and regeneration", *Journal of Hazardous Materials*, 155(1), 385-392.
- Günay, A., Arslankaya, E. & Tosun, I., 2007, "Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics", *Journal of Hazardous Materials*, 146(1), 362-371.
- Guo, H., Zhang, Sh., Kou, Z., Zhai, Sh., Ma, W. & Yang, Y., 2015, "Removal of cadmium(II) from aqueous solutions by chemically modified maize straw", *Journal Carbohydrate Polymers*, 115, 177-185.
- Hegazi, H.A., 2013, "Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents", *HBRC Journal*, 9(3), 276-282.
- Jorfi, S., Ahmadi, M., Takdastan, A. & Jaafarzadeh, N., 2014, "Study of efficiency of natural Clinoptilolite zeolite in cadmium removal from aqueous solutions and determination of adsorption isotherms", *Scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences*, 23 (2), 95-102. (In Persian).
- Karapanagioti, H.K., Sabatini, D.A. & Bowman, R.S., 2005, "Partitioning of hydrophobic organic chemicals (HOC) into anionic and cationic surfactant-modified sorbents", *Water Research*, 39(4), 699-709.
- Kołodynska, D., 2011, "Zeolite-kaolin-bentonite as a new low-cost adsorbent", *Chemical Engineering Journal*, 174, 619-628.
- Ouadjenia-Marouf, F., Marouf, R., Schott, J. & Yahiaoui, A., 2014. "Removal of Cu (II), Cd (II) and Cr (III) ions from aqueous solution by dam silt", *Arabian Journal of Chemistry*, 6(4), 401-406.
- Rouyanian Firouz, Z., Takdastan, A., Jaafarzadeh Haghhighifard, N., Sayyad, G.A., 2011, "Feasibility of land treatment that removal of nitrogen and phosphor of chonaibeh wastewater treatment plant (Ahwaz)", *Asian Journal of Research in Chemistry*, 4(4), 597-601.

- Saki, P., Mafigholami, R., Takdastan A., Khoshkhoo, E., 2014, "Adsorption of chromium from aqueous solution by steel slag: Kinetic modeling and isotherm adsorption", *The Journals System of Shahid Sadoughi University of Medical Sciences*, 12(4), 51-60. (In Persian)
- Saki, P., Mafigholami, R. & Takdastan, A. 2013, "Removal of cadmium from industrial wastewater by steel slag", *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 5 (1), 23-33. (In Persian)
- Sprynskyy, M., Buszewski, B., Terzyk, A.P. & Namieśnik, J., 2008, "Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺ and Cd²⁺) adsorption on clinoptilolite" *Journal of Colloid and Interface Science*, 304(1), 21-28.
- Takdastan, A., Nazarzadeh, A. & Ramezani, Z., 2014, "Performance evaluation of dried powder activated sludge on adsorption of nickel and determining the adsorption isotherm", *Scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences*, 23 (1), 11-15. (In Persian).
- Takdastan, A. & Pazoki, M., 2011, "Study of biological excess sludge reduction in sequencing batch reactor by heating the reactor", *Asian Journal of Chemistry*, 23 (1), 29-33.
- Takdastan, A., Azimi, A.A. & Jaafarzadeh, N., 2010, "Biological excess sludge reduction in municipal wastewater treatment by chlorine", *Asian Journal of Chemistry*, 22(3), 1665-1674.
- Takdastan, A., Mehrdadi, N., Torabian, A., Azimi, A.A. & Bidhendi, G.N., 2009, "Investigation of excess biological sludge reduction in sequencing batch reactor", *Asian Journal of Chemistry* 21(3), 2419-2427. (In Persian).
- Tao, Y.F., Qiu, Y., Fang, S.Y., Liu, Z.Y., Wang, Y. & Zhu, J.H., 2010, "Trapping the lead ion in multi-components aqueous solution by natural clinoptilolite", *Journal of Hazardous Materials*, 180(1), 282-288.
- Wang, S. & Peng, Y., 2010, "Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment", *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11-24.