Original article

Investigation of Khuzestan Steel Company's Modified Slag in Removal of Aluminum from Aqueous Solutions: Adsorption Isotherm and Kinetic Studies

Afshin Takdastan[1]
Mehrnoosh Abtahi[2]
Atena Sarshir[3*]
Mohamad Hasan Bazafkan[4]
Reza Saeedi[5]

1- Associate Professor, Environmental Technologies Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
3- MSc Student, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran
4- MSc, Environmental Technologies Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran
5- Assistant Professor, Department of Public Health, Faculty of Health, Safety, and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

***Corresponding author:** Atena Sarshir, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

Email: sarshiry.a@gmail.com

Received: 22 July 2017
Accepted: 22 September 2017

ABSTRACT

Introduction and purpose: Two of the most important issues of today's world are water scarcity and water supply pollution with heavy and toxic metals. We aimed to investigate the removal of aluminum ions from aqueous solutions by modified slag of Khuzestan Steel Company.

Methods: Steel slag was prepared from Khuzestan Steel Company in Ahvaz, Iran. This laboratory-scale experimental study was carried out to investigate the removal of aluminum from aqueous solutions using modified slag in discontinuous flow system. The studied variables included pH, adsorbent dose, initial concentration of aluminum, and reaction time. The concentration of aluminum ions was quantified using atomic absorption spectrometer. In carrying out this study and the use of resources, ethical issues were observed.

Results: The results showed that the adsorption capacity of aluminum on modified steel slag is dependent on parameters such as pH, adsorbent dose, initial concentration of aluminum, and reaction contact time. The optimum efficiency was obtained at pH 4, adsorbent dose of 5 g/L, the initial concentration of20 mg/l, and contact time of 60 min. Aluminum adsorption isotherm of modified slag in Khuzestan Steel Company followed the Langmuir model. The best aluminum adsorption kinetics model in this study was shown to be the pseudo-second-order model.

Conclusion: In this study, it was found that modified slag of Khuzestan Steel Company is highly potent in aluminum removal, and it can be utilized as a cost-effective adsorbent.

Keywords: Adsorption, Aluminum, Isotherm, Kinetics, Modified steel slag

► **Citation:** Takdastan A, Abtahi M, Sarshir A, Bazafkan MH, Saeedi R. Investigation of Khuzestan Steel Company's Modified Slag in Removal of Aluminum from Aqueous Solutions: Adsorption Isotherm and Kinetic Studies. Journal of Health Research in Community. Summer 2017;3(2): 75-87.

مقاله پژوهشی

بررسی کارآیی جاذب سرباره اصلاح‌شده شرکت فولاد خوزستان جهت حذف فلز آلومینیوم از محلول‌های آبی: تعیین ایزوترم و سینتیک جذب

افشین تکدستان[1]
مهرنوش ابطحی[2]
آتنا سرشیر[3*]
محمد حسن بازافکن[4]
رضا سعیدی[5]

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
۲. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان‌آور محیط و کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
۵. استادیار، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: آتنا سرشیر، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز،ایران

Email: sarshiry.a@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱

چکیده

مقدمه و هدف: یکی از بزرگترین مشکلات دنیای امروز، کمبود آب و آلودگی منابع آب محیط زیست به فلزات سنگین و سمی می‌باشد. این مطالعه با هدف بررسی میزان حذف یون‌های آلومینیوم توسط سرباره اصلاح‌شده شرکت فولاد خوزستان از محلول آبی صورت گرفت.

روش کار: سرباره از شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز تهیه گردید. مطالعه تجربی حاضر در مقیاس آزمایشگاهی به‌منظور بررسی حذف آلومینیوم از محلول آبی توسط سرباره اصلاح‌شده در سیستم جریان ناپیوسته انجام شد. در این مطالعه متغیرهای آزمایش شامل pH، دوز جاذب، غلظت اولیه آلومینیوم و زمان واکنش، بررسی گردید و غلظت یون‌های آلومینیوم با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. در انجام این مطالعه و استفاده از منابع، موازین اخلاقی رعایت گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ظرفیت جذب آلومینیوم روی سرباره اصلاح‌شده فولاد به پارامترهای pH، دوز جاذب، غلظت اولیه آلومینیوم و زمان تماس واکنش وابسته است. بهره‌وری بهینه حذف در pH برابر ۴، دوز جاذب ۵ گرم در لیتر، غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و زمان تماس ۶۰ دقیقه، به‌دست آمد و ایزوترم جذب آلومینیوم سرباره اصلاح‌شده شرکت فولاد خوزستان از مدل Langmuir تبعیت می‌کرد. بهترین مدل سینتیک جذب آلومینیوم در این مطالعه، مدل سینتیکی شبه درجه دوم نشان داده شد.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه مشخص شد که سرباره اصلاح‌شده فولاد خوزستان توانایی بالایی برای حذف آلومینیوم دارد و می‌تواند به‌عنوان یک جاذب ارزان قیمت مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آلومینیوم، ایزوترم‌های جذب، جذب، سرباره اصلاح‌شده فولاد، سینتیک

◀ **استناد:** تکدستان، افشین؛ ابطحی، مهرنوش؛ سرشیر، آتنا؛ بازافکن، محمد حسن؛ سعیدی، رضا. بررسی کارآیی جاذب سرباره اصلاح‌شده شرکت فولاد خوزستان جهت حذف فلز آلومینیوم از محلول‌های آبی: تعیین ایزوترم و سینتیک جذب. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، تابستان ۱۳۹۶؛۳(۲): ۸۷-۷۵.

مقدمه

امروزه آلودگی رو به افزایش فاضلاب‌های شهری و صنعتی با یون‌های فلزی سمی و سنگین، یک مسئله نگران‌کننده زیست‌محیطی می‌باشد. ازجمله عوامل اصلی افزایش غلظت فلزات در محیط‌های گوناگون، مصرف روزافزون بارورکننده‌ها،

اصلاح‌کننده‌های کشاورزی، آفت‌کش‌ها و انتشار فاضلاب‌های شهری و پساب‌های صنعتی بدون تصفیه مناسب است [۱].

استخراج فلزات از معادن و کاربرد گسترده فلزات در صنایع باعث شده است که غلظت این فلزات در آب، فاضلاب، هوا و خاک بیشتر از مقادیر زمینه‌ای افزایش پیدا کند؛ بنابراین حذف فلزات سنگین از محیط آبی، موضوع مهمی در بهداشت عمومی جامعه محسوب می‌شود که از دو جنبه اهمیت دارد: جداسازی فلزات سنگین و سمی به‌منظور پالایش محیط و بازیافت و استفاده مجدد از فلزات برای حفظ منابع [۲،۳]. آلومینیوم فراوان‌ترین عنصر فلزی است و حدود ۸/۱ درصد از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. این عنصر در کل طبیعت از نظر مقدار، سومین عنصر بعد از اکسیژن و سیلیکون می‌باشد. آلومینیوم به‌صورت خالص وجود ندارد و بیشتر به‌صورت ترکیب هیدروکسید، سیلیکات، سولفات و فسفات یافت می‌شود. عدد اتمی آلومینیوم ۱۳، جرم اتمی آن ۲۶/۹۸ گرم بر مول، دانسیته آن ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دارای هشت ایزوتوپ رادیواکتیو است. این عنصر یک فلز نرم سفید و چکش‌پذیر با چگالی پایین است [۴].

آلومینیوم، عنصری غیرضروری برای بدن می‌باشد و ورود آن با مقادیر زیاد به بدن می‌تواند اثرات سمی به‌دنبال داشته باشد. در سال‌های اخیر به اثرات سمی ورود آلومینیوم به بدن توجه شده است. این آثار بیشتر بر سیستم اعصاب، سیستم هورمونی، خون‌سازی و متابولیسم کلسیم مشاهده می‌شود. در مطالعات انجام‌شده روی حیوانات آزمایشگاهی، اثرات سمی این عنصر روی حافظه، تولید مثل، غده‌های درون ریز، ترشح معده، خون‌سازی و سیستم ایمنی مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. آلومینیوم برای آبزیان و گیاهان نیز سمی است. ماهی‌هایی که در معرض غلظت بالای آلومینیوم (در نتیجه‌ی انحلال زیاد منتج از باران‌های اسیدی) قرار می‌گیرند دچار خفگی یا هایپرونتیلاسیون (Hyperventilation) می‌شوند. سمیت در گیاهان به‌صورت کاهش رشد ریشه و کاهش جذب کلسیم بروز می‌کند. فلز آلومینیوم به‌عنوان ماده ساختمانی در ساخت و ساز، خودروسازی و صنایع هواپیماسازی، تولید آلیاژهای فلزی، صنعت برق، ساخت ظروف پخت و پز و نیز در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. همچنین ترکیبات آلومینیوم به‌عنوان آنتی‌اسیدها، ضد عرق و مکمل‌های غذایی به‌کار می‌روند. از کاربردهای گسترده و مهم نمک‌های آلومینیوم در تصفیه آب به‌عنوان منعقدکننده برای کاهش رنگ، کدورت، ناخالصی‌های آب و میکروارگانیسم‌ها می‌باشد [۶].

تاکنون برای حذف فلزات از فاضلاب صنایع، روش‌های مختلفی ازجمله: فرآیند اسمز معکوس، الکترودیالیز، تبادل یون، روش‌های زیستی و جذب سطحی روی مواد جاذب نظیر کربن فعال، نانوتیوپ کربنی، چند لایه کربنی، زئولیت‌ها، رزین‌ها و رسوب‌دهی با استفاده از هیدروکسید یا سولفید اجرا شده است که هرکدام از لحاظ اقتصادی دارای مزایا و معایبی می‌باشد. به‌طور کلی جذب سطحی فرآیند تجمع مواد در فصل مشترک بین دو فاز می‌باشد. کربن فعال از مؤثرترین موادی است که برای جذب استفاده می‌گردد [۹-۷]. از آنجا که احیای کربن فعال هزینه‌بر و گران می‌باشد، امروزه مطالعات به‌دنبال یافتن روش‌های ساده و ارزان‌قیمتی است که با همان کارآیی برای استفاده در تصفیه فاضلاب‌های آلوده به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مناسب باشد؛ زیرا این کشورها به‌دلیل مشکلات اقتصادی قادر به استفاده از روش‌های پرهزینه نیستند [۱۰،۱۱].

سرباره یکی از زائدات صنعت فولاد است که برای این صنعت مزاحمت زیادی ایجاد می‌کند؛ اما امروزه با شناخت مصارف متعدد آن مانند کاربرد با دیگر مصالح ساختمانی و راه‌سازی، از یک ماده مزاحم به یک ماده مفید و اقتصادی تبدیل شده است. یکی از کاربردهای سرباره که کارشناسان محیط زیست سعی در شناسایی و کاربردی‌کردن آن دارند، استفاده آن به‌عنوان جاذب در حذف آلاینده‌های متفاوت محیط زیست است؛ به‌طوری که در مطالعات انجام‌شده، کاربرد موفق سرباره به‌عنوان جاذب در حذف فسفات، آمونیوم، آلاینده‌های آلی و فلزات سنگینی مانند مس، آرسنیک،

سرب، منگنز، کروم، نیکل و روی گزارش شده است [۱۲]. سرباره فولاد شامل: سرباره کوره انفجاری، سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره کوره مبدل است که این محصول جانبی در مقیاس بسیار بزرگی برای ساخت فولاد به‌کار می‌رود. در هر صورت کاربرد سرباره به‌عنوان جاذب، محدودیت‌هایی نیز دارد. سرباره متشکل از اکسیدهای کلسیم، سیلیکون، آهن، آلومینیم، منگنز و انواعی از عوامل قلیایی است که با آزادکردن عامل هیدروکسیل (OH) موجب خنثی‌سازی قوی شرایط اسیدی، ظرفیت جذب و ترسیب شیمیایی می‌شود؛ از طرف دیگر، سرباره به‌طور اولیه دارای سطح تماس کم و ساختار خلل و فرج ضعیفی است که اصلاح آن را برای استفاده به‌عنوان جاذب ضروری می‌سازد. از میان روش‌های اصلاح که به‌کار رفته است، روش اصلاح با اسید دارای توانایی بیشتری در اصلاح ساختار سرباره برای رسیدن به اهداف تصفیه به‌نظر می‌رسد. در مطالعاتی که روی حذف فلزات سنگین با سرباره انجام شده، فلزاتی مانند کروم، کادمیوم، نیکل، کبالت، منگنز، مس و آرسنیک مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳،۱۴]. محققان با استفاده از روش‌های TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) و SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) که دو روش برای تعیین سمیت مواد استخراج‌شده از سرباره می‌باشند، غلظت فلزات سنگین آزادشده از سرباره (کروم، کبالت، نیکل، آهن، منگنز، سرب و کادمیوم) راکه در pH مختلف به‌دست آمد، اندازه‌گیری کردند. نتایج حاکی از آن بود که غلظت فلزات تولیدی از سرباره به‌طور قابل توجهی، کمتر از غلظت‌های ماکزیممی بود که در محدوده سمیت سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا می‌باشد؛ بنابراین سرباره در ردیف مواد بی‌خطر برای محیط زیست قرار گرفت [۱۵].

روش کار

این پژوهش از نوع مطالعات نیمه‌تجربی می‌باشد که در آن کارآیی سرباره شرکت فولاد خوزستان برای حذف آلومینیوم در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه جاذب، سرباره فولاد از شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز با کسب اجازه از مدیریت این شرکت تهیه گردید. به‌منظور اصلاح جاذب، ابتدا سرباره خرد شد و سپس توسط سرندهای مش ۵۰ و ۷۰ برای دستیابی به سرباره با اندازه‌های بین ۰/۲ تا ۰/۳ الک شد. بعد از آن سرباره با اسید هیدروکلریک ۱ مولار پیش‌تصفیه گردید. در مرحله آخر، سرباره چند بار با آب دیونیزه شستشو داده شد که ناخالصی‌های آن حذف شد و سپس در فور با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت خشک گردید. مراحل شستشو در بشر ۱ لیتری انجام و برای جداسازی سرباره از فیلتر کاغذی (واتمن ۴۰) استفاده شد [۱۰،۱۳]. در این مطالعه ابتدا برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و مورفولوژی سرباره طبق روش‌های متداول در ASTM (American Society for Testing and Materials) اندازه‌گیری شد. ترکیبات شیمیایی سرباره قبل از اصلاح و بعد از اصلاح با استفاده از طیف‌سنج اشعه ایکس اندازه‌گیری گردید (XRF: X-ray Fluorescen). سطح ویژه (BET)، با آنالیزور جذب نیتروژن (Micromeritics/Gemini-2372) تعیین شد [۱۰]. خواص فیزیکی موجود در نمونه با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD: X-ray Diffraction) مشخص شد [۱۶]. برای تهیه محلول‌های آلومینیوم با غلظت‌های مورد نیاز از نمک سولفات آلومینیوم ۱۸آبه (ساخت شرکت Merck، آلمان) استفاده گردید. در ابتدا محلول استوک (محلول ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) از نمک فوق تهیه و بعد از رقیق‌کردن آن با آب مقطر، محلول‌های آلومینیوم با غلظت‌های مورد نظر آماده شد. مطالعات جذب نشان می‌دهد که مهم‌ترین متغیرهای جذب سطحی، غلظت آلاینده، مقدار جاذب، غلظت اولیه فلز و زمان تماس است. در این پژوهش با توجه به مطالعات مشابه، تأثیر مقادیر مختلف pH (۲ تا ۹)، دوز جاذب (۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ گرم در لیتر)، زمان تماس (۵ تا ۳۶۰ دقیقه) و غلظت اولیه فلز (۱ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به‌منظور ارزیابی

کارآیی جاذب، مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش‌های این مطالعه به‌صورت ناپیوسته و در دمای اتاق صورت گرفت و به‌منظور ایجاد تماس بیشتر، نمونه‌ها به‌وسیله شیکر اربیتال (مدل GFL137) ساخت کشور ژاپن با ۱۲۰ دور در دقیقه همزده شد. سپس فاز جامد از مایع با استفاده از کاغذ صافی (واتمن ۴۰) از هم جدا شد و غلظت آلومینیوم باقی‌مانده در محلول تعیین گردید. در مرحله اول، بهره‌وری حذف جاذب با تغییر زمان تماس سنجیده و غلظت اولیه فلز ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر و pH برابر ۴ درنظر گرفته شد. نتیجه بهینه این مرحله در مراحل بعد یعنی تعیین تأثیر غلظت آلاینده؛ دوز جاذب و pH، به‌عنوان پارامتر ثابت مورد بررسی قرار گرفت. درخصوص سایر نتایج مراحل بعدی نیز همین شرط برقرار بود.

برای اندازه‌گیری غلظت آلومینیوم باقیمانده در محلول، از روش طیف‌سنج جذب اتمی با دستگاه جذب اتمی ساخت کشور آلمان استفاده شد. تنظیم pH محلول نمونه با محلول ۱ مولار HCL و ۰/۱ مولار NaOH انجام شد. اندازه‌گیری pH محلول، با pH متر مدل ۷۱۱۰ ساخت شرکت WTW کشور آلمان صورت گرفت.

درصد حذف فلز و ظرفیت جذب جاذب به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد:

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$$ رابطه ۱

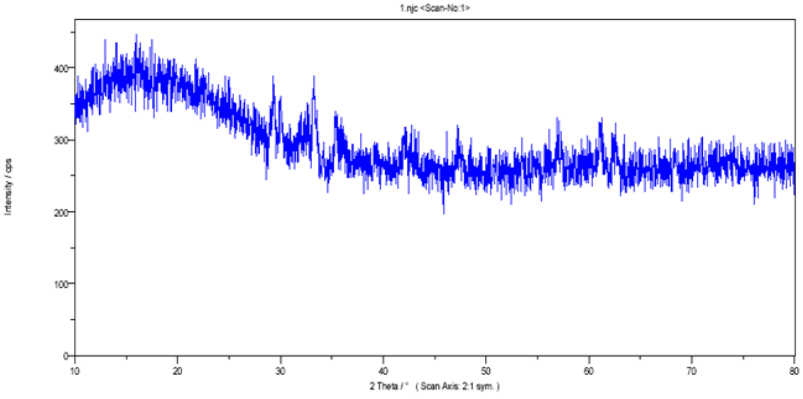
$$q_e = \frac{C_0 - C}{M} \times V$$ رابطه ۲

در این روابط، E نشان‌دهنده درصد حذف آلاینده، C_0 غلظت اولیه و C غلظت باقیمانده آلاینده (میلی‌گرم در لیتر) است. همچنین q_e، غلظت ماده جذب‌شونده در فاز جامد در زمان تعادل (میلی‌گرم در لیتر)، M جرم جاذب بر حسب گرم و V حجم محلول آلاینده (لیتر) است [۱۷،۱۸]. همچنین برای تعیین حداکثر ظرفیت جذب جاذب‌ها از مدل‌های ایزوترم Langmuir، Freundlich و Temkin استفاده شد و سینتیک جذب توسط مدل‌های سینتیک شبه درجه اول و شبه درجه دوم بررسی گردید.

یافته‌ها

تعیین ترکیب شیمیایی سرباره اصلاح‌شده

در این مطالعه برای رسیدن به خواص فیزیکی سرباره اصلاح‌شده از دستگاه پراش اشعه ایکس استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: پراش اشعه ایکس (XRD) سرباره اصلاح‌شده فولاد

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF سرباره اصلی و سرباره اصلاح‌شده فولاد

ترکیب	مقدار بر حسب درصد برای سرباره اصلی فولاد	مقدار بر حسب درصد برای سرباره اصلاح‌شده فولاد
Cao	۴۱/۳	۲۴/۶۳
Fe_2O_3	۱۹/۱	۱۴/۴۵
SiO_2	۱۴/۶۴	۶/۹۴
Al_2O_3	۹/۵۱	۴۰/۷۶
MgO	۶/۳	۱/۳

جدول ۲: نتایج حاصل از آنالیز سطح ویژه جاذب BET

سطح BET (متر مربع بر گرم)	سطح کلی (متر مربع)	دمای دتکتور (کلوین)	واجذب	سطح جذب	N_2/He	جاذب	وزن نمونه (گرم)	فشار آزاد (اتمسفر)	دمای آزاد (کلوین)
۸/۴۷	۲/۸۸	۱۰۰	۳/۸۰	۳/۳۷	۰/۱۵	N_2	۰/۳۴۰۵۹	۱	۲۹۸

این شکل نشان‌دهنده آن است که این سرباره از یک ساختار نامنظم تشکیل شده است.

در این مطالعه برای تعیین ترکیب وآنالیز عنصری سرباره اصلاح‌شده فولاد از دستگاه فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده شد و با سرباره اصلی مقایسه گردید (جدول ۱). این مقایسه نشان داد که درصد ترکیبات سرباره اصلاح‌شده نسبت به سرباره اصلی کاهش یافته است.

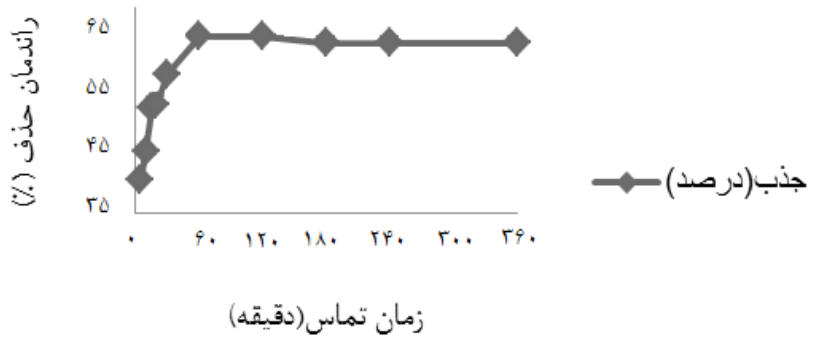
نتایج نشان داد که سطح ویژه سرباره تغییر قابل توجهی بعد از اصلاح با اسید داشت و به‌دلیل افزایش حفره‌ها بعد از اصلاح، توانایی جاذب در جذب فلز افزایش یافت (جدول ۲) [۱۹].

تأثیر پارامتری بهره‌برداری بر کارآیی جاذب در حذف آلومینیوم

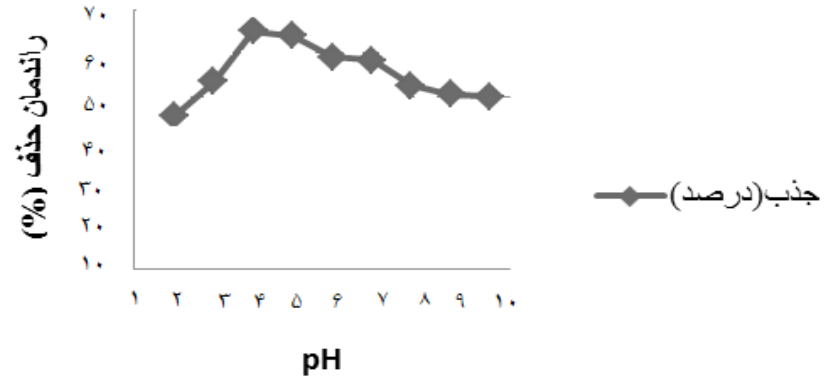
در این مرحله برای بررسی متغیر زمان تماس، جرم جاذب، pH و غلظت آلاینده ثابت درنظر گرفته شد. برای تعیین اثر زمان تماس، آزمایش در طول ۶ ساعت انجام شد و نمونه‌برداری در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ دقیقه صورت گرفت. براساس نمودار ۱، با بیشترشدن زمان تماس، بازدهی حذف آلومینوم افزایش یافته؛ ولی در زمان تماس ۶۰ دقیقه با غلظت ورودی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر تقریباً بازدهی حذف به تعادل رسیده و با سرعت کمتری افزایش پیدا کرده است؛ بنابراین این زمان به‌عنوان زمان بهینه درنظر گرفته شد. بازدهی حذف در این زمان برابر ۶۴/۹۹ درصد به‌دست آمده است.

تأثیر pH در حذف آلومینیوم

pH محلول نیز از عوامل مؤثر بر بار سطحی ذرات جاذب و درنتیجه میزان جذب آلاینده‌هاست. براساس نمودار ۲، بهره‌وری جذب آلومینیوم با افزایش pH از یک روند افزایشی برخوردار بود و بیشترین بازده حذف در pH برابر ۴ به‌دست آمد؛ بنابراین این pH را به عنوان pH بهینه درنظر گرفته شد. بازدهی حذف در این pH برابر ۶۴/۹۹۷۵ درصد به‌دست آمد.



نمودار ۱: میزان بازدهی حذف فلز آلومینیوم در زمان‌های تماس مختلف، غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، pH برابر ۴، دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر



نمودار ۲: میزان بازدهی حذف فلزآلومینیوم در pHهای مختلف، غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر در زمان ۶۰ دقیقه و دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر

تأثیر دوز جاذب در حذف آلومینیوم

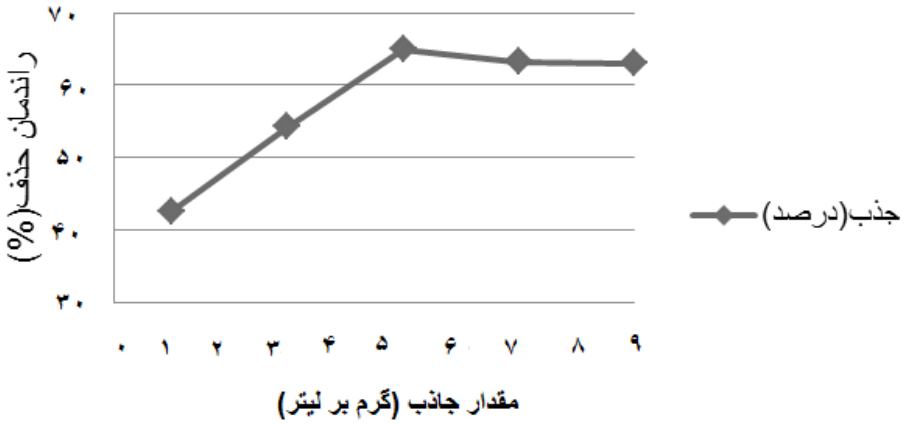
براساس نمودار ۳ با افزایش دوز جاذب، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش می‌یابد و در دوز ۵ گرم، میزان درصد حذف تقریباً ثابت می‌شود؛ بنابراین این دوز به‌عنوان دوز بهینه درنظر گرفته شد. بازدهی حذف در این دوز به‌ترتیب برابر ۶۴/۹۹۷ درصد به‌دست آمده است.

تأثیر غلظت اولیه فلز در حذف آلومینیوم

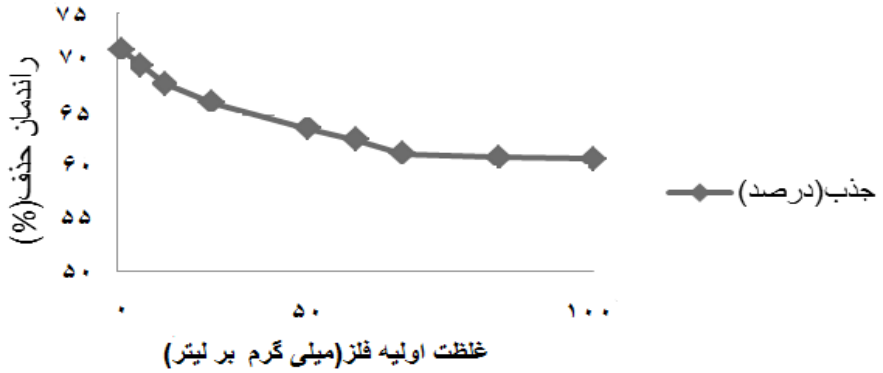
براساس نمودار ۴ با کاهش غلظت اولیه آلومینیوم، بازدهی حذف افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که بازده حذف در غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر به ۷۱/۳۵۸ درصد می‌رسد، اما در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط یکسان بازده حذف ۶۰/۸۲۷ درصد می‌باشد.

ایزوترم‌های جذب

خصوصیات جذب، معمولاً توسط ایزوترم‌های تعادلی جذب توصیف می‌شود. در این مطالعه، جذب تعادلی آلومینیوم توسط سرباره اصلاح‌شده شرکت فولاد، با استفاده از ایزوترم‌های



نمودار ۳: میزان بازدهی حذف آلومینیوم در دوزهای مختلف جاذب، غلظت ورودی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، در pH برابر ۴ و زمان تماس ۶۰ دقیقه



نمودار ۴: میزان بازدهی حذف فلز آلومینیوم در غلظت‌های مختلف فلز، دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر، در pH برابر۴ و زمان تماس ۶۰ دقیقه

لانگمویر، فروندلیخ و تمکین مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های ایزوترم جذب Langmuir، Freundlich و Temkin با استفاده از روابط ارائه‌شده در زیر محاسبه گردید [۱۷].

معادله مدل Langmuir $$q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

معادله مدل Freundlich $$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$$

معادله مدل Temkin $$q_e = \ln(K_T C_e)$$

q_e: جرم ماده جذب‌شده به ازای واحد جرم جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، Q_m: میزان یون لازم برای تشکیل لایه منفرد روی جاذب K_L: ثابت تجربی و C_e غلظت تعادلی ماده جذب‌شونده در محلول بعد از برقراری تعادل (میلی‌گرم بر لیتر) است.

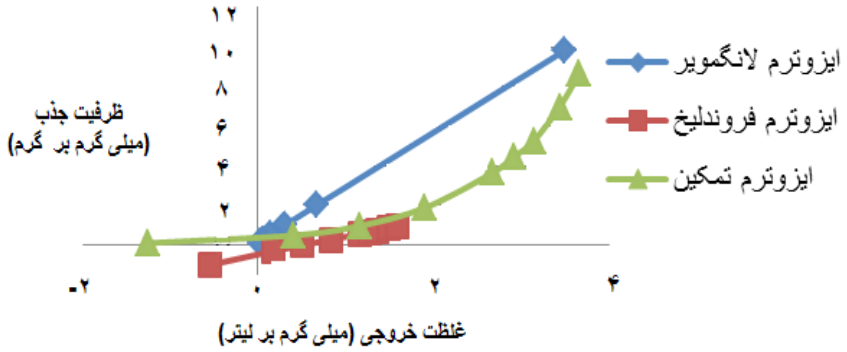
K_f: ظرفیت جذب (میلی‌گرم بر گرم)، ۱/n: شدت جذب است.

مقادیر مربوط به ایزوترم‌ها در جدول ۳ و نمایش آن در نمودار ۵ نشان داده شده است.

مبنای انتخاب بهترین ایزوترم جذب، ضریب همبستگی R^2

جدول ۳: پارامترهای محاسبه‌شده برای مدل‌های ایزوترم

	Langmuir				Freundlich			Temkin		
پارامتر	Qm (میلی‌گرم بر گرم)	k_l (لیتر بر میلی‌گرم)	Rl	R^2	n	Kf (لیتر بر میلی‌گرم)	R^2	B1	Kt	R^2
آلومینیوم	۱۱/۰۸۶	۰/۰۳۲۳	۰/۲۳	۰/۹۹۹۸	۱/۱۲۰	۱/۶۱۵	۰/۹۹۹۳	۱/۶۳۲	۱/۲۲	۰/۷۸۳۲



نمودار ۵: نمایش ایزوترم مدل‌های Langmuir، Freundlich و Temkin برای جذب سطحی آلومینیوم با جاذب سرباره اصلاح‌شده شرکت فولاد خوزستان

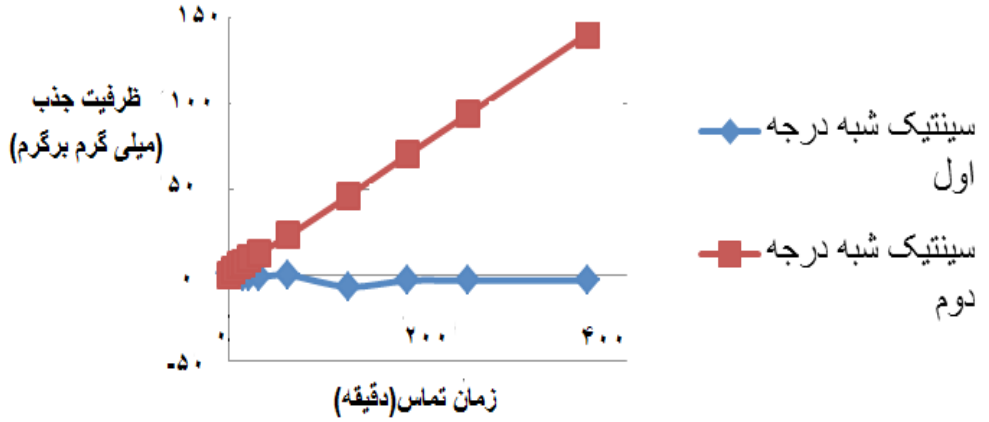
جدول ۴: پارامترهای محاسبه‌شده برای مدل‌های سینتیک جذب

مدل	تجربی	شبه درجه اول			شبه درجه دوم		
پارامتر	q_e (میلی‌گرم بر گرم)	k_1 (لیتر بر دقیقه)	R^2	q_e (میلی‌گرم بر گرم)	K_2 (لیتر بر دقیقه)	R^2	q_e (میلی‌گرم بر گرم)
آلومینیوم	۲/۵۹۹	۰/۰۷۰۴	۰/۹۰	۱/۷۶	۰/۱۵۱۱	۰/۹۹	۲/۵۸

است که با توجه به داده‌های به‌دست آمده در جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که جذب سطحی از ایزوترم Langmuir تبعیت می‌کند.

سینتیک‌های جذب سطحی

یکی از مهم‌ترین عوامل برای طراحی سیستم جذب (به‌منظور تعیین زمان تماس بهینه)، پیش‌بینی سرعت فرآیند جذب است که توسط سینتیک سیستم کنترل می‌گردد. داده‌های حاصل با استفاده از مدل شبه درجه اول و شبه درجه دوم برای تعیین سینتیک واکنش بررسی شد (جدول ۴). برای این منظور آزمایش‌ها در غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان تماس ۵ تا ۳۶۰ دقیقه، جرم جاذب ۵ گرم و pH برابر۴ انجام شد و نتایج حاصل نشان داد که



نمودار ۶: تجزیه و تحلیل سینتیک جذب آلومینیوم به‌وسیله سرباره اصلاح‌شده فولاد با استفاده از معادلات سرعت شبه درجه اول و دوم

روابط خطی شبه درجه از جذب سینتیکی شبه درجه دوم تبعیت می‌کند (نمودار ۶).

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه نشان داد، با بیشترشدن زمان تماس، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش یافته؛ ولی در زمان تماس ۶۰ دقیقه تقریباً بازدهی حذف به تعادل رسیده و با سرعت کمتری افزایش یافته است. این امر ناشی از فرصت بیشتر تماس یون آلومینیوم با سطح جاذب می‌باشد. Liu و همکاران، از سرباره فولاد به‌عنوان جاذب یون‌های فلزات سنگین، سرب، کادمیوم، مس، نیکل و کروم سه ظرفیتی از محلول‌های مایع استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، در فلز کروم سه ظرفیتی با افزایش زمان تماس، بهره‌وری حذف فلز نیز افزایش یافت و در زمان تماس ۶۰ دقیقه بازدهی حذف به تعادل رسید [۲۰].

نتایج به‌دست آمده از مطالعه نشان داد که بهره‌وری جذب آلومینیوم با افزایش pH از یک روند افزایشی برخوردار بوده است؛ به‌طوری که بیشترین میزان حذف در pH برابر ۴، حاصل گردید. دلیل کمتربودن بهره‌وری در pHهای بالاتر، این است که در این شرایط، به‌علت یونیزاسیون در سطح جاذب، یک لایه بار منفی، روی جاذب قرار می‌گیرد و یک نیروی دافعه الکتروستاتیک بین جاذب و یون آلومینیوم به وجود می‌آید. درنتیجه بهره‌وری حذف آلومینوم کاهش می‌یابد. در مطالعه Xiong و همکاران در مورد حذف فسفر از محلول‌های آبی توسط سرباره فولاد نیز، pH برابر ۴، به‌عنوان pH بهینه درنظر گرفته شد [۲۱].

دوز جاذب از پارامترهای دیگری است که در آزمایش‌های جذب مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد با افزایش دوز جاذب، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش می‌یابد و در دوز ۵ گرم در لیتر میزان درصد حذف تقریباً ثابت می‌شود؛ بنابراین این دوز به‌عنوان دوز بهینه درنظر گرفته شد. دلیل این موضوع، بیشترشدن مکان‌های جذب در دسترس برای حذف فلز آلومینیوم روی سطح جاذب است. Duan و همکاران، مطالعه‌ای در مورد حذف یون‌های کادمیوم از محلول‌های آبی توسط سرباره اصلاح‌شده فولاد انجام دادند. نتایج مطالعه نشان داد با افزایش جرم جاذب از ۵ گرم به ۲۰ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر، بهره‌وری جذب افزایش می‌یابد و در دوز ۱۰ گرم در لیتر میزان

حذف تقریباً ثابت می‌ماند [۱۲].

براساس نتایج این پژوهش، با کاهش غلظت اولیه آلومینیوم، بازدهی حذف افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که بازده حذف در غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر به ۷۱/۳۵۸ درصد می‌رسد. دلیل کاهش بهره‌وری حذف در غلظت‌های بالا، اشباع‌شدن مکان‌های فعال جذب قرارگرفته روی سطح جاذب توسط آلاینده است. Sheng و همکاران طی مطالعه خود جذب یون‌های سرب را روی سرباره فولاد مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد با کاهش غلظت اولیه سرب، بازدهی حذف افزایش می‌یابد [۲۲].

براساس نتایج مطالعه حاضر، جذب یون‌های آلومینیوم توسط سرباره فولاد از مدل ایزوترم Langmuir با ضریب همبستگی ۹۹/۹۸ درصد پیروی می‌کند. Kim و همکاران، در مطالعه‌ای که به بررسی حذف مس از محلول‌های آبی توسط سرباره فولاد پرداختند به این نتیجه رسیدند که داده‌های جذب از مدل Langmuir تبعیت می‌نماید [۱۱]. Zahar و همکاران نیز در مطالعه خود که بررسی حذف منگنز از محلول‌های آبی بود به نتایج مشابهی از داده‌های جذب دست یافتند که تابع مدل Langmuir بود [۲۳].

مطابق با نتایج به‌دست آمده، سینتیک جذب آلومینیوم توسط سرباره اصلاح‌شده فولاد با مدل شبه درجه دوم با ضریب همبستگی ۹۹ درصد بهتر توصیف شده و نشان‌دهنده این است که عمل جذب در مکان‌های ناهمگن روی جاذب انجام می‌گیرد. Yusufو همکاران، مطالعه‌ای در مورد حذف یون‌های نیکل از محلول‌های آبی توسط سرباره قوس الکتریکی انجام دادند و داده‌ها با مدل شبه درجه دوم با ضریب همبستگی ۹۹/۶ درصد همخوانی داشت [۲۴].

روش‌های متداول حذف آلومینیوم از محیط آبی شامل: تعویض یون، جذب و فرآیندهای غشایی می‌شوند و از روش‌های گران‌قیمت و با صرف هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بالا محسوب می‌شوند. بدین ترتیب برای حذف مؤثر فلزات از آب و فاضلاب، نیاز مبرمی به توسعه روشی جدید، ارزان‌قیمت و اقتصادی وجود دارد. برای رفع این نیاز در سال‌های اخیر مطالعات در زمینه جذب به‌وسیله جاذب‌های ارزان‌قیمت شدت گرفته است.

در این مطالعه از سرباره که یکی از زائدات صنعت فولاد به‌شمار می‌رود به‌عنوان جاذب استفاده شد. برای افزایش سطح ویژه سرباره، عملیات اسیدشویی به‌منظور اصلاح آن، صورت گرفت. سرباره اصلاح‌شده فولاد خصوصیات حذف مناسب برای یون فلز آلومینیوم را دارا می‌باشد و با داشتن ترکیبات شیمیایی که دارای خاصیت قلیایی بالایی است، توانسته گزینه مناسبی برای جذب فلز آلومینیوم باشد. این مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی به‌منظور بررسی و حذف آلومینیوم از محلول آبی توسط سرباره اصلاح‌شده فولاد در سیستم جریان ناپیوسته صورت گرفت. در مطالعه حاضر متغیرهای آزمایش ازجمله: pH، جرم جاذب، غلظت اولیه آلومینیوم و زمان واکنش، بررسی شد. نتایج نشان داد که کارایی حذف آلومینیوم روی سرباره اصلاح‌شده فولاد، به پارامترهای pH، جرم جاذب، غلظت اولیه فلز و زمان واکنش وابسته است. pH بهینه برای حذف آلومینیوم برابر ۴ بود. کارآیی حذف با بیشترشدن دوز جاذب و زمان تماس، افزایش یافت و با افزایش غلظت اولیه، کارایی حذف کم شد؛ درحالی که ظرفیت جذب با افزایش غلظت اولیه، افزایش یافت. بهره‌وری بهینه حذف در pH برابر ۴، دوز جاذب ۵ گرم در لیتر، غلظت اولیه فلز ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و زمان تماس ۶۰ دقیقه به‌دست آمد. ایزوترم جذب آلومینیوم با سرباره اصلاح‌شده فولاد از مدل Langmuir تبعیت بهتری داشت. تجزیه و تحلیل سینتیک جذب آلومینیوم با استفاده از معادلات سرعت شبه درجه اول و دوم، تبعیت جذب این فلز را از مدل سینتیک شبه درجه دوم نشان داد؛ بنابراین سرباره اصلاح‌شده فولاد، می‌تواند به‌عنوان جاذب ارزان‌قیمت برای حذف فلزات، مورد استفاده قرار گیرد.

قدردانی

نویسندگان این مطالعه از کمیته تحقیقات دانشجویی،

کارشناسان محترم آزمایشگاه شیمی دانشکده بهداشت و همچنین معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی- درمانی اهواز، برای حمایت‌های مالی طرح، تشکر و قدردانی ویژه می‌نمایند.

References

1. Mahvi AH, Naghipour D, Vaezi F, Nazmara S. Teawaste as an adsorbent for heavy metal removalfrom industrial wastewaters. J Appl Sci 2005; 2:372-5 (Persian)
2. Kadirvelu K, Thamaraiselvi K, Namasivayam C. Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. Bioresour Technol 2001; 76(1):63-5.
3. Miri M, Ghaneyan MT, Shahriari A, Fallahzaeh RA. Effectiveness of rosewater waste in de-colorization of reactive blue 19 from synthetic textile wastewater. J Health Res Community 2016; 1(4):28-36.
4. Soni MG, White SM, Flamm WG, Burdock GA. Safety evaluation of dietary aluminum. Regul Toxicol Pharmacol 2001; 33(1):66-79.
5. Meiri H, Banin E, Roll M, Rousseau A. Toxic effects of aluminum on nerve cells and synaptic transmission. Prog Neurobiol 1993; 40(1):89-121.
6. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. Geneva: World Health Organization; 2006.
7. Mohammadi M, Fotovat A, Haghniya G. Efficiency of sand-soil-organic matter filter, the removal of heavy metals copper, nickel, zinc and chromium from industrial wastewater. J Soil Water 2009; 262:23-51 (Persian).
8. Bina B, Abtahi M, Vahiddasjerdi M. The use of sawdust in the removal of heavy metals from industrial wastewater. J Res Med Sci 2003; 8(2):19-22 (Persian).
9. Gholami M. Evaluation of waste management, manufacturing industries, from an environmental standpoint (case study: Savojbolagh city Alborz Province). J Health Res Community 2016; 2(1):1-11 (Persian).
10. Malarvizhi T, Santhi T, Manonmani S. A comparative study of modified lignite fly ash for the adsorption of nickel from aqueous solution by column and batch mode study. Res J Chem Sci 2013; 3(2):44-53.
11. El-Shafey EI. Removal of Zn (II) and Hg (II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk. J Hazard Mater 2010; 175(1):319-27.
12. Duan J, Su B. Removal characteristics of Cd (II) from acidic aqueous solution by modified steel-making slag. Chem Eng J 2014; 246:160-7.
13. Kim DH, Shin MC, Choi HD, Seo CI, Baek K. Removal mechanisms of copper using steel-making slag: adsorption and precipitation. Desalination 2008; 223(1):283-9.
14. Xue Y, Wu S, Zhou M. Adsorption characterization of Cu (II) from aqueous solution onto basic oxygen furnace slag. Chem Eng J 2013; 231:355-64.
15. Demotica JS, Amparado Jr RF, Malaluan RM, Demayo CG. Characterization and leaching assessment of ferronickel slag from a smelting plant in Iligan City, Philippines. Int J Environ Sci Dev 2012; 3(5):470-4.
16. Navarro C, Díaz M, Villa-García MA. Physico-chemical characterization of steel slag. Study of its behavior under simulated environmental conditions. Environ Sci Technol 2010; 44(14):5383-8.
17. Kaghazchy T, AdadiYeganeh M. Investigation of raw material on activated carbon properties. Proceedings of the Ninth National Congress of Chemical Engineering, Tehran, Iran; Feb 3-5, 2004.
18. Bhattacharya AK, Naiya TK, Mandal SN, Das SK. Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr (VI) from aqueous solutions using different low-cost adsorbents. Chem Eng J 2008; 137(3):529-41.
19. Dehghani MH, Mahvi AH, Rastkari N, Saeedi R, Nazmara S, Iravani E. Adsorption of bisphenol A (BPA) fromaqueous solutions by carbon nanotubes: kinetic and equilibrium studies. Desalinat Water Treat 2015; 54(1):84-92.
20. Liu SY, Gao J, Qu B, Yang Y. Adsorption behaviors of heavy metal ions by steel slag-an industrial solid waste. Bioinformatics and Biomedical Engineering. Proceeding of 3rd International Conference on; 2009.
21. Xiong J, He Z, Mahmood Q, Liu D, Yang X, Islam E. Phosphate removal from solution using steel slag

through magnetic separation. J Hazard Mater 2008; 152(1):211-5.
22. Sheng YU, Gao J, Yang YJ, Yang YC, Ye ZX. Adsorption intrinsic kinetics and isotherms of lead ions on steel slag. J Hazard Mater 2010; 173(1-3):558-62.
23. Zahar MS, Kusin FM, Muhammad SN. Adsorption of manganese in a queous solution by steel slag. Proc Environ Sci 2015; 30:145-50.
24. Yusuf M, Luqman Chuah A, Mohammed MA, Shitu A. Investigations of nickel (II) removal from aqueous effluents using electric arc furnace slag. Res J Chem Sci 2013; 3(12):29-37.