علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره شانزدهم، شماره ویژه ۹۳

ارزیابی کارایی سبوس برنج در تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین

سهیل سبحان اردکانی[۱]
حسن پرویزی مساعد[۲*]
hassan.parvizi@iauh.ac.ir
راضیه زندی پاک[۲]

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۵ **تاریخ پذیرش:۹۰/۱۰/۲۱**

چکیده

زمینه و هدف: سبوس برنج به‌عنوان یک ماده زاید جامد آلی از توانایی بالایی در حذف فلزات سنگین از پساب برخوردار است و می‌تواند در تصفیه پساب‌های صنعتی که از مهم‌ترین منابع آلاینده آب و خاک به فلزات سنگین هستند، بسیار مفید و کارآمد باشد. این مطالعه با هدف بررسی حذف فلزات سنگین کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی از محلول‌های حاوی این فلزات انجام یافت.

روش بررسی: با اضافه کردن سبوس برنج به محیط واکنش، مقدار حذف یون‌های فلزی توسط جاذب در اسیدیته‌ها، مقادیر مختلف جاذب، زمان‌های تماس مختلف و غلظت‌های اولیه متفاوت از یون‌ها در پساب مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: با افزایش pH محلول ساختگی، درصد جذب یون‌ها توسط ذرات سبوس برنج افزایش پیدا کرد به‌طوری‌که در pH= ۵ به حداکثر مقدار خود رسید. همچنین درصد جذب به نوع فلز بستگی داشت، به‌طوری که درصد جذب فلزات مس و کروم از پساب‌های ساختگی در pH بهینه به‌ترتیب ۸۹/۵ و ۸۴/۲٪ محاسبه شد. با افزایش غلظت اولیه پساب، درصد جذب کاهش پیدا کرد. از طرفی ظرفیت اشباع جاذب برای فلزات مس و کروم به‌ترتیب ۷۸ و ۷۱ میلی‌گرم بر گرم می‌باشد و با افزایش زمان تماس، درصد جذب افزایش یافت. همچنین با توجه به بالا بودن سرعت واکنش، پس از گذشت ۵ دقیقه از شروع واکنش، ۵۰ تا ۶۰٪ از یون‌های فلزی حذف شد. نتایج بررسی داده‌های تجربی تعادل جذب با مدل‌های ایزوترم جذب لانگمویر و فروندلیخ نشان داد که جذب عناصر مس و کروم توسط جاذب از ایزوترم جذب لانگمویر تبعیت می‌کند.

نتیجه‌گیری: با استناد به نتایج می‌توان از سبوس برنج که به مقدار فراوان و ارزان در دسترس است و به‌دلیل ساختار و ترکیبات آلی خود از توانایی بالایی در جذب فلزات سنگین برخوردار است، به‌عنوان جاذبی طبیعی در تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: سبوس برنج، کروم، مس، پساب ساختگی، ایزوترم جذب.

۱- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان
۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان*(مسئول مکاتبات).

مقدمه

آلودگی آب به‌دلیل تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، وجود فلزات سنگین سمی و مدیریت نامناسب زباله‌ها، سلامتی بشر را به‌گونه‌ای خطرناک تحت تاثیر قرار می‌دهد (۱). متداول‌ترین فلزات یافت شده در فاضلاب‌ها، فلزات سرب، مس، روی، کادمیوم، کروم و نیکل هستند (۲). استفاده وسیع از فلز کروم در صنایع گوناگون مانند صنایع دباغی و چرم‌سازی، نساجی، ذوب، فلزکاری، رنگ سازی، معدن، و صنایع هسته‌ای و بسیاری دیگر باعث شده است که مقدار زیادی از این فلز به محیط‌زیست وارد شده و سبب آلودگی خاک و آب شود. فلز کروم بیش‌تر به‌صورت ۳ و ۶ ظرفیتی در آب و خاک‌های آلوده یافت می‌شود و این دو شکل کروم می‌تواند اثرات شیمیایی، زیستی و محیط‌زیستی متفاوتی داشته باشند (۳). فلز مس یک عنصر کمیاب ضروری برای سلامت انسان محسوب می‌شود و نقش مهمی را در سوخت و ساز چربی‌ها و کربوهیدرات‌ها و حفاظت از فعالیت‌های قلبی و عروقی بر عهده دارد. غلظت فلز مس در بدن افراد بزرگسال بین۱۰۰-۱۵۰ میلی‌گرم می‌باشد، اما مقدار بیش از حد آن برای بدن سمی است (۴). فلز مس در زمره فلزات خطرناکی است که به‌طور عادی در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شود. بنابراین، حذف آن می‌تواند یک ضرورت محسوب شود (۵). امروزه روش‌های زیادی برای حذف یون‌های فلزی از فاضلاب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی بیش‌تر آن‌ها به‌دلیل هزینه زیاد یا حذف ناقص فلزات سنگین و تولید لجن‌های سمی دارای کاستی‌هایی می‌باشد (۶). همچنین این روش‌ها بر اساس سادگی، انعطاف‌پذیری، موثر بودن فرآیندها، قیمت، مشکلات فنی و نگه‌داری دارای مزایا و معایبی می‌باشند (۷ و ۱). شیوه‌های اصلی که برای کاهش مقدار یون‌های فلزی از فاضلاب ها مفید می‌باشند شامل: رسوب، تبخیر، آهک‌دهی، شناورسازی و انعقاد، سیمانی شدن و کمپلکس شدن، تبادل یونی، عصاره‌گیری حلال، اسمز معکوس، جذب، روش‌های الکتروشیمیایی و فرآیندهای فیلتراسیون است (۱). فرآیندهای معمول برای حذف این عناصر از پساب‌های صنعتی نظیر اسمز معکوس، رزین‌های تعویض یون، ته‌نشینی شیمیایی و غیره بسیار هزینه‌بر هستند، بنابراین، در سال‌های اخیر کاربرد محصولات جانبی و زایدات کشاورزی مانند پوست درختان، خاک اره، پوسته‌های بادام زمینی، پسته کوهی، سبوس برنج و چوب‌های ذرت به‌منظور حذف فلزات سنگین از پساب ها مورد توجه قرار گرفته است. این مواد زاید زیستی از یک‌سو بسیار فراوان و در دسترس می‌باشند و از سوی دیگر استفاده خاصی از آن‌ها نمی‌شود. امروزه با حذف فلزات سنگین موجود در پساب‌ها علاوه بر این که می‌توان به بازیافت این عناصر و کاهش مصرف مواد خام اولیه کمک کرد، می‌توان با توجه به این‌که تقریباً ۹۹٪ از فاضلاب را آب تشکیل می‌دهد، از پساب برای آبیاری زمین‌های کشاورزی نیز استفاده کرد (۸). این مساله به خصوص در کشور ما که در منطقه خشک و نیمه-خشک واقع شده است، می‌تواند تا حد چشم‌گیری بحران کمبود آب را جبران کند.

مونتاهر و همکاران (۲۰۰۵) با انجام تحقیقی عنوان کردند که سبوس برنج از کارایی بالایی در حذف فلزات سنگین روی، مس، سرب و کادمیوم دو ظرفیتی از پساب برخوردار است (۱۰). دافولاه و همکاران (۲۰۰۳) نیز با انجام مطالعه‌ای عنوان کردند که مواد جاذب تهیه‌شده از سبوس برنج توانایی حذف تقریباً ۱۰۰٪ فلزات سنگین نظیر سرب، کادمیوم، مس، روی، منگنز و آهن از فاضلاب‌ها را دارد (۱۱). نتایج تحقیق انجام شده توسط اسراری و همکاران (۲۰۱۰) بیانگر آن است که سبوس برنج به‌عنوان جاذبی مناسب برای فلزات سنگین سرب و روی به‌شمار می‌رود که در این رابطه میزان جذب به طور معنی‌داری با پیراسنجه‌های pH، مقدار ماده جاذب و زمان تماس مرتبط می‌باشد (۱۲). شهبازی و همکاران (۱۳۸۴) با انجام مطالعه‌ای عنوان کردند که خاک اره به‌عنوان ضایعات صنایع چوب از کارایی بالایی در جذب فلزات سنگین مس و نیکل دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی از پساب برخوردار است (۱۳).

انصاری (۲۰۰۶) در مطالعات خود به این نتیجه رسید که سبوس برنج جاذب بسیار مناسبی برای حذف کروم شش ظرفیتی است و کارایی جذب عنصر توسط این ماده آلی ۷۰٪ می‌باشد (۱۴). گائو و همکاران (۲۰۰۸) و محمدی و همکاران (۱۳۸۸) با انجام مطالعاتی گزارش کردند که سبوس برنج به‌عنوان یک ماده جاذب کم-هزینه می‌تواند برای حذف فلز کروم شش ظرفیتی از پساب با کارایی بالا مورد استفاده قرار گیرد (۱۶و ۱۵). محمدی و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه خود گزارش کردند که سبوس برنج از طریق فرآیند جذب و تبادل یونی، توانایی حذف فلز کروم و از طریق فرآیند جذب و برهم کنش یون‌های مس با گروه‌های فنل موجود در ترکیبات لیگنینی توانایی حذف فلز مس از فاضلاب را دارد (۱۷). علاوه بر این، مطالعات انجام شده توسط نامنی و همکاران (۱۳۸۷) مشخص کرد که سبوس برنج از کارایی بالایی در حذف فلز کروم شش ظرفیتی از محلول آبی برخوردار است (۱۸). لذا، این پژوهش با هدف بررسی کارایی سبوس برنج به‌عنوان یک ماده زاید جاذب با ویژگی‌هایی نظیر ساختار دانه‌مانند و حلال‌ناپذیری در آب، پایداری شیمیایی و دسترسی محلی (۹) در حذف فلزات سنگین کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی از پساب ساختگی انجام یافت.

مواد و روش ها

ابتدا آزمایش‌هایی به‌منظور تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی جاذب انجام شد که نتایج حاصل در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی و شیمیایی سبوس برنج خام

پیراسنجه	مقادیر	واحد
رطوبت	۹/۵	درصد
چگالی	۱/۸	گرم بر سانتی متر مکعب
مواد نامحلول	۷۵	درصد
کل ذرات محلول	۱۰۵	میلی گرم بر لیتر
مواد آلی	۸۲	درصد
Fe_2O_3	۰/۱۶	درصد
CaO	۰/۲۴	درصد

دانه‌بندی در مقدار جذب یون‌های فلزی توسط ذرات سبوس برنج موثر می‌باشد (۱۹). لذا، به‌منظور انتخاب دانه‌بندی مناسب از ذرات سبوس برنج، ۵۰۰ گرم از سبوس برنج خام چندین بار با آب مقطر شسته‌شده و به مدت ۴۸-۲۴ ساعت در داخل دستگاه آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سبوس برنج پس از آسیاب شدن توسط دستگاه مخلوط‌کن از الک یک میلی‌متری عبور داده شد. برای ساخت پساب‌های ساختگی حاوی یون‌های عناصر مس و کروم، از نمک‌های قابل حل در آب این فلزات نظیر $Cr(No_3)_3,9H_2O$ و $Cucl_2,2H_2O$ ساخت شرکت مرک استفاده شد. سپس پساب‌هایی با اسیدیته‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ و ۸ با غلظت ۷۰ میلی‌گرم در لیتر از فلزات کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی با حجم محلول۱۰۰ میلی‌لیتر در هشت بشر جداگانه ساخته شد. برای تنظیم اسیدیته در محدوده مورد نظر از محلول‌های سود یک مولار و اسید کلریدریک یک مولار استفاده گردید. در تمام مراحل آزمایش درصد ماده خشک به پساب ساختگی یک درصد در نظر گرفته شد. بدین منظور، دو گرم سبوس برنج خشک به هر بشر اضافه و سپس مخلوط سبوس برنج و پساب ساختگی با اسیدیته معین، به‌مدت ۳۰ دقیقه بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۱۲۵ دور در دقیقه قرار گرفت. در نهایت به‌منظور محاسبه درصد حذف فلزات در واحد جرم سبوس برنج و این‌که مقدار جذب عناصر کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی در چه محیطی از نظر pH بیش‌تر می‌باشد، مخلوط پساب ساختگی و سبوس برنج با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ از یکدیگر جدا و به‌وسیله دستگاه جذب اتمی Perkin-Elmer مدل 2380 غلظت نهایی فلزات موجود در پساب و توسط دستگاه pH متر Jenway مدل ۳۵۱۰، pH نهایی اندازه گیری شد. دمای انجام آزمایش ۱± ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. برای تعیین اثر غلظت فلز بر میزان جذب، پساب‌هایی با غلظت‌های ۷۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر در شش بشر جداگانه ساخته و اثر افزایش مقدار غلظت فلزات سنگین مس و کروم بر مقدار جذب آن‌ها توسط سبوس برنج خام خشک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به‌منظور بررسی اثر زمان ماند (زمان تماس ذرات سبوس برنج با یون‌های فلزی در پساب ساختگی) بر مقدار جذب فلز سنگین کروم و مس توسط ذرات سبوس برنج، برای هر نمک شش ظرف از محلول ساختگی با غلظت ۷۰ میلی‌گرم در لیتر و حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد و در زمان-های تماس ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ دقیقه آزمایش گردید. همچنین به‌منظور مشخص کردن اثر مقدار جاذب بر میزان جذب فلزات مس و کروم، پساب‌هایی با غلظت ۷۰ میلی‌گرم در لیتر و حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر در دمای ثابت ۱± ۲۵ درجه سانتی‌گراد و زمان تماس ثابت ۳۰ دقیقه با مقادیر جاذب ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ گرم مورد آزمایش قرار گرفت (۲۰). در خاتمه درصد حذف فلزات از پساب توسط رابطه (۱) محاسبه شد (۱۲).

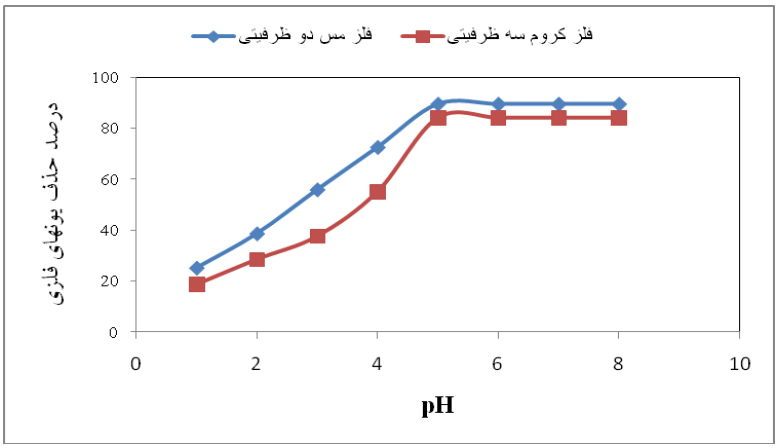
$$\text{درصد جذب فلزات} = ((C_0-C_t)/C_0)\ 100 \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در این رابطه C_0 و C_t به‌ترتیب غلظت اولیه فلزات کروم و مس در محلول و غلظت آن‌ها بعد از انجام آزمایش می‌باشد. به منظور اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد.

نتایج

ارزیابی اثر pH محلول بر کارایی حذف عناصر کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی

مقدار pH به‌عنوان یکی از پیراسنجه‌های مهم محسوب می‌شود که بر واکنش‌های شیمیایی و زیستی در فاضلاب‌ها تاثیر می‌گذارد (۲۱). نتایج مربوط به اثر افزایش pH اولیه محلول‌های ساختگی بر مقدار جذب فلزات مس و کروم توسط سبوس برنج در زمان تماس ثابت ۳۰ دقیقه، دمای ثابت ۱± ۲۵ درجه سانتی‌گراد و غلظت و حجم محلول ثابت (غلظت ۷۰ میلی گرم در لیتر و حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر) نشان داد که تا pH برابر با ۲، درصد جذب برای هر دو فلز تقریباً یکسان و ناچیز و ۳۰-۲۰٪ است. ولی با افزایش مقدار pH، روند صعودی افزایش درصد جذب برای هر دو عنصر متفاوت است، به‌طوری که درصد جذب برای فلز مس بیش‌تر از فلز کروم می‌باشد و در pH برابر با ۵، درصد جذب برای عناصر مس و کروم به‌ترتیب با ۸۹/۵ و ۸۴/۲٪ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. مطالعات صورت گرفته توسط وانگ و همکاران (۲۰۰۳) نیز به‌دلیل بروز همکنشی‌های شیمیایی هر دو یون فلز با ذرات سبوس برنج چنین نتایجی را برای فلز مس تایید می‌کند (۵). در pHهای پایین سطوح جاذب توسط یون‌های هیدرونیوم (H^+) پوشیده شده است که از نزدیک‌شدن یون‌های فلزی به مکان‌های موجود بر سطح جاذب جلوگیری به‌عمل می‌آورد. بنابراین، کارایی سبوس برنج در حذف فلز مس بیش‌تر از فلز کروم ارزیابی می‌شود (نمودار ۱).



نمودار ۱- تاثیر pH بر کارایی حذف عناصر کروم و مس

(غلظت ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان تماس۳۰ دقیقه، دمای واکنش ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد، حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر)

ارزیابی اثر غلظت اولیه بر کارایی حذف عناصر کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی

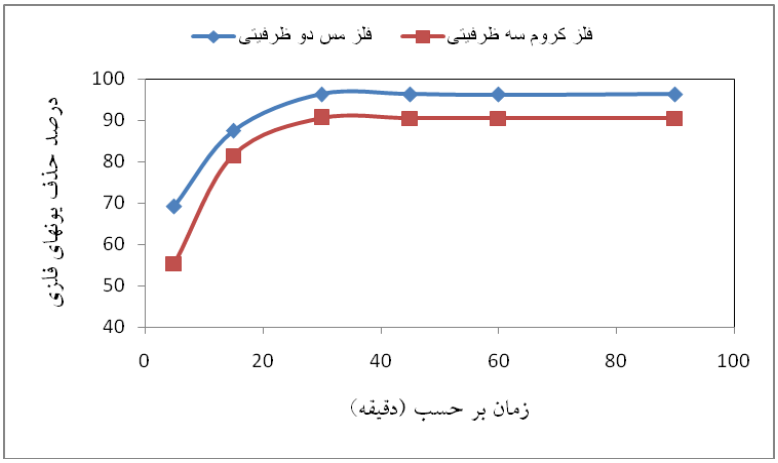
عامل دیگری که بر مقدار جذب یون‌های فلزی توسط ذرات سبوس برنج موثر است، غلظت اولیه یون‌های فلزی موجود در پساب می‌باشد. لذا، اثر افزایش غلظت اولیه پساب بر مقدار جذب یون‌های فلزی نیز در pH= ۵، حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر، زمان تماس ثابت ۳۰ دقیقه، دمای ثابت ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد و با غلظت‌های ۷۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه یون‌های فلزی میزان جذب فلزات توسط ذرات سبوس برنج کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان با افزایش نسبت مکان‌های فعال سطحی به کل فلزات در غلظت‌های کم از یون‌های فلزی و از احتمال جذب همه یون‌های فلزی توسط ماده جاذب، مرتبط دانست (۲۲). بنابراین، کارایی حذف با افزایش غلظت فلزهای مس و کروم در محلول کاهش یافته و در نتیجه به حالت اشباع می‌رسد. البته در این حالت میزان جذب فلز مس توسط سبوس برنج بیش‌تر از فلز کروم است که بیانگر کارایی بیش‌تر جاذب در حذف فلز مس می‌باشد (نمودار ۲).

نمودار ۲- تاثیر میزان غلظت بر کارایی حذف عناصر مس و کروم

(pH= ۵، زمان تماس ۳۰ دقیقه، دمای واکنش ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد، حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر)

ارزیابی اثر زمان تماس بر کارایی حذف عناصر کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی

زمان تماس از جمله عوامل موثر بر فرآیند جذب می‌باشد. نتایج مربوط به بررسی اثر افزایش زمان تماس بر مقدار جذب فلزات مس و کروم در نمودار ۳ ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان تماس، درصد جذب فلزات مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی نیز افزایش می‌یابد که در زمان‌های اولیه تماس (۳۰-۵ دقیقه اول) میزان جذب زیاد بوده و بعد از گذشت ۳۰ دقیقه به حالت تعادل رسیده و دیگر در عمل جذب تغییری صورت نمی‌گیرد. نامنی و همکاران (۱۳۸۷) نیز در مطالعه خود نشان دادند با افزایش زمان تماس، درصد جذب فلز کروم شش ظرفیتی از محلول افزایش می‌یابد. در حالت تعادل، درصد جذب عناصر مس و کروم به‌ترتیب ۹۶/۳ و ۹۰/۵٪ ثبت شد. همچنین درصد جذب برای فلز مس دو ظرفیتی بیش‌تر از کروم سه ظرفیتی است که بیانگر کارایی بیشتر سبوس برنج در حذف فلز مس می‌باشد (نمودار ۳).



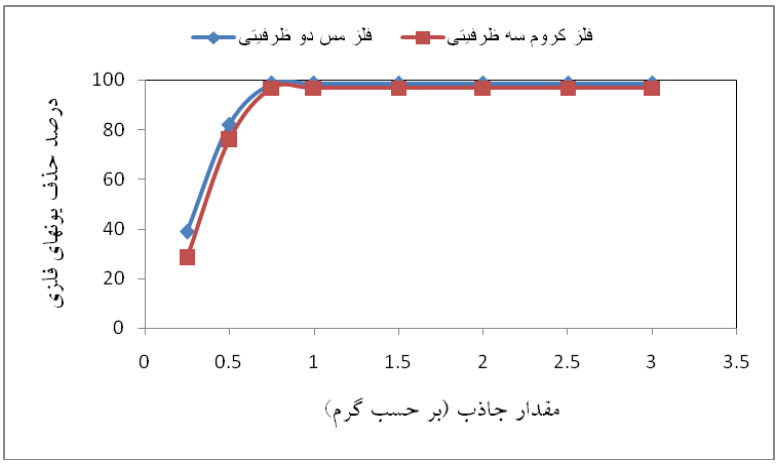
نمودار ۳- تاثیر زمان تماس بر کارایی حذف عناصر مس و کروم

(pH= ۵، غلظت ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، دمای واکنش ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد، حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر)

ارزیابی اثر مقدار جاذب بر کارایی حذف فلزات کروم سه ظرفیتی و مس دو ظرفیتی

نمودار ۴ تاثیر جرم جاذب را بر کارایی جذب یون های کروم و مس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ به ۳ گرم در غلظت ۷۰ میلی‌گرم در لیتر، حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر، زمان تماس ۳۰ دقیقه و دمای ثابت ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد، کارایی جذب هر دو فلز افزایش یافته و پس از آن بدون تغییر باقی می‌ماند. بدیهی است که با افزایش مقدار جاذب و پیامد آن یعنی افزایش سطح تماس جاذب، میزان جذب عناصر کروم و مس نیز افزایش می‌یابد.

بنابراین، برای حذف کامل غلظت ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر از فلزهای مس و کروم، به ۰/۷۵ گرم از ماده جاذب نیاز است.



نمودار ۴- تاثیر مقدار ماده جاذب بر کارایی حذف عناصر مس و کروم

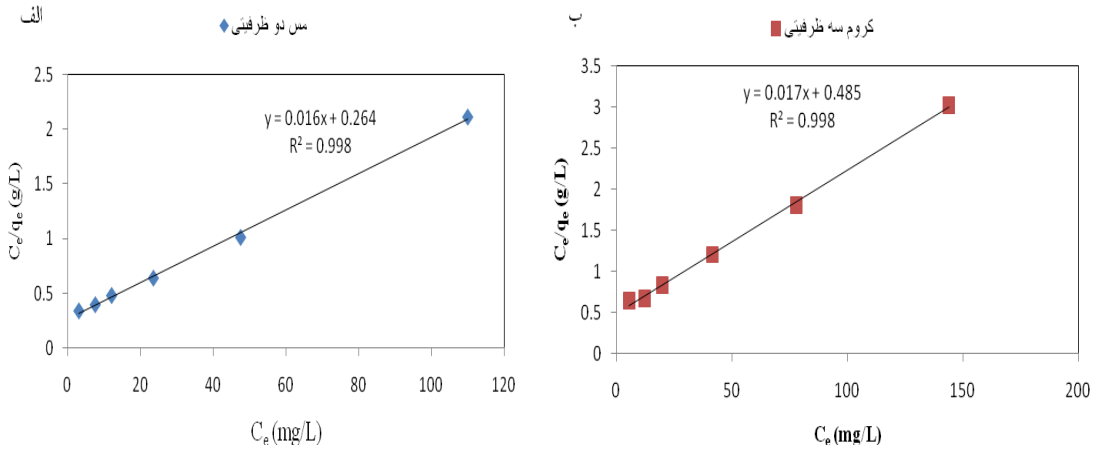
(pH= ۵، غلظت ۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، دمای واکنش ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد، حجم محلول ۱۰۰ میلی‌لیتر)

بررسی ایزوترم‌های جذب تعادلی عناصر مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی

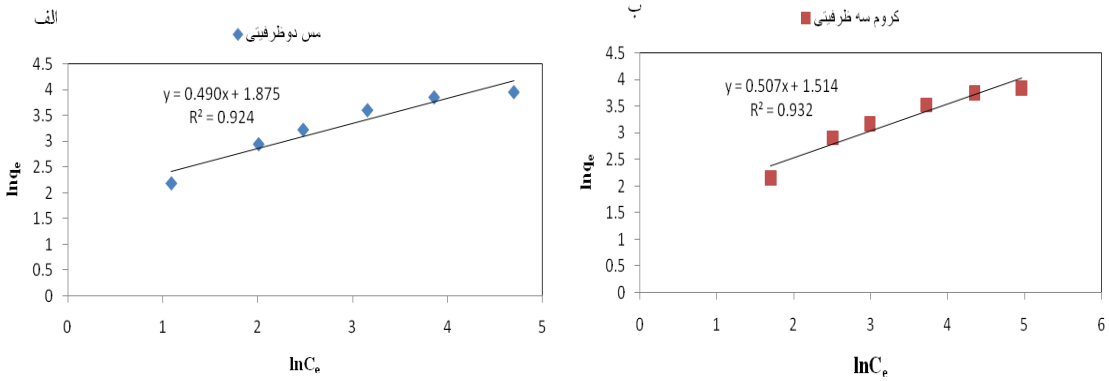
بررسی مدل‌های ایزوترم جذب نشان‌دهنده رابطه تعادلی بین ماده جذب شده در سطح جاذب و غلظت ماده جذب شونده باقی‌مانده در داخل محلول می‌باشد. برای به‌دست آوردن اطلاعات در مورد مدل جذب سیستم مورد مطالعه، نتایج توسط دو ایزوترم لانگمویر و فروندلیخ بررسی شد که نتایج در جدول ۲ ارایه شده است. از مقایسه ضریب همبستگی بین ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیخ نتیجه حاصل شد که الگوی لانگمویر، برای جذب تعادلی عناصر مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی بر سطح سبوس برنج دارای فرآیند صعودی بوده و روند جذب توسط جاذب از نوع شیمیایی و با ضریب همبستگی $R^2=$ ۰/۹۹۸، به‌صورت تک لایه اتفاق افتاده است. همچنین در این مدل، مولکول‌های جذب شده با یکدیگر برهمکنشی نداشته و بر روی سایت‌های مشخصی از جاذب قرار می‌گیرند. لذا ایزوترم مناسب برای فلزات مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی توسط سبوس برنج، ایزوترم لانگمویر می‌باشد. اما در الگوی فروندلیخ، فرآیند جذب نزولی بوده و ضریب همبستگی آن‌ها به‌ترتیب برای فلزات مس و کروم برابر با $R^2=$ ۰/۹۲۴ و $R^2=$ ۰/۹۳۲ می‌باشد (نمودار ۶ الف و ب) که در مقایسه با الگوی لانگمویر می‌توان گفت فرآیند جذب فلزات مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی از الگوی فروندلیخ پیروی نمی‌کند. همان‌گونه که در نمودار ۵ الف و ب مشخص است، در مدل لانگمویر رسم C_e/q_e نسبت به C_e در دمای اتاق، منجر به یک رابطه خطی می‌شود. به‌همین دلیل، مدل لانگمویر برای فرآیند جذب مورد ارزیابی در این مطالعه مورد تایید قرار می‌گیرد (۲۳).

جدول ۲- پیراسنجه‌های ایزوترم لانگمویر و فروندیخ

مدل لانگمویر	R^2	b (L mg^{-1})	Q_{max}(mg g^{-1})
مس دو ظرفیتی	۰/۹۹۸	۰/۰۶	۶۲/۵
کروم سه ظرفیتی	۰/۹۹۸	۰/۰۳	۵۸/۸
مدل فروندلیخ	R^2	n	K_f($mg^{1-(1/n)}$ $L^{1/n}$ g^{-1})
مس دو ظرفیتی	۰/۹۲۴	۲/۰۴	۶/۵۲
کروم سه ظرفیتی	۰/۹۳۲	۱/۹۷۲	۴/۵۴



نمودار ۵- جذب سطحی فلزات (الف) مس دو ظرفیتی و (ب) کروم سه ظرفیتی توسط سبوس برنج بر اساس مدل جذب لانگمویر



نمودار ۶- جذب سطحی فلزات (الف) مس دو ظرفیتی و (ب) کروم سه ظرفیتی توسط سبوس برنج بر اساس مدل جذب فروندلیخ

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بیانگر آن است که با افزایش اسیدیته محلول ساختگی برای هر دو فلز مس و کروم به‌طور جداگانه، درصد جذب یون‌ها سیر صعودی یکنواختی را نشان می‌دهد و در pH برابر با ۵، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. البته مقدار جذب بستگی به نوع فلز نیز دارد، به‌طوری‌که فلز مس قابلیت جذب بیش‌تری در مقایسه با فلز کروم از خود نشان می‌دهد. در pH بالاتر از ۵، فلزات مس و کروم به‌حالت ترسیب درآمده و کاهش غلظت فلزات در محلول ساختگی به‌دلیل جذب آن‌ها توسط ذرات سبوس برنج نمی‌باشد، بلکه به‌دلیل افزایش pH محیط و افزایش غلظت یون‌های هیدروژن، یون‌های فلزات سنگین به حالت ترسیب در می‌آیند. همچنین با اندازه‌گیری pH نهایی محلول پس از پایان واکنش، مشخص شد که به‌طور کلی pH پساب‌ها بین ۰/۲ تا ۰/۹ کاهش یافته که دلیل آن چسبیدن فلزات به گروه‌های کربوکسیل در ساختمان سبوس برنج و آزادسازی یون هیدروژن می‌باشد. افزایش غلظت اولیه پساب از ۷۰ به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر منجر به کاهش جذب فلزات موجود در پساب توسط ذرات سبوس برنج می‌شود که این کاهش مقدار جذب برای هر دو فلز مس و کروم به‌ترتیب برابر با ۷۸ و ۷۱٪ می‌باشد و دلیل آن را می‌توان با اشباع‌شدن ذرات سبوس برنج مرتبط دانست. البته با افزایش غلظت در حضور مقادیر کافی از سبوس برنج، مقدار جذب نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، در شرایط ثابت، در هر درجه از غلظت، درصد جذب بستگی به نوع فلز دارد. مطابق نتایج، ظرفیت اشباع سبوس برنج برای فلزات مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی به‌ترتیب برابر با ۹۸/۵ و ۹۶/۸ میلی‌گرم در گرم گزارش شد. همچنین سرعت واکنش بسیار زیاد بوده و به‌طور میانگین، ۵۰٪ مقدار کل جذب در همان دقایق اولیه انجام شد، به‌طوری‌که پس از گذشت ۵ دقیقه از شروع واکنش ۶۰-۵۰٪ از فلزات مس و کروم جذب شدند. البته مقدار جذب بستگی به نوع فلز داشته و برای فلز مس بیش‌تر از فلز کروم می‌باشد. داده‌های ایزوترم جذب نیز نشان داد که جذب فلزات مس و کروم از مدل لانگمویر پیروی می‌کند. بنابراین، از سبوس برنج که به‌مقدار فراوان و ارزان به‌عنوان یکی از ضایعات کارگاه‌های شالیکوبی برنج در دسترس می‌باشد و به‌دلیل

ساختار و ترکیبات آلی آن، از توانایی بالایی در جذب فلزات سنگین مس دو ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی برخوردار است، می‌توان به‌عنوان جاذبی طبیعی در تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین استفاده کرد. در نهایت، کاربرد مواد آلی جاذب و به‌ویژه سبوس برنج در تصفیه-خانه‌های فاضلاب صنایع به‌دلیل صرفه اقتصادی، کارایی قابل قبول و حفظ سلامت محیط در مقایسه با سایر روش‌های حذف فلزات سنگین مانند اسمز معکوس، رزین‌های تعویض یون، ته‌نشینی شیمیایی و غیره توصیه می‌شود.

منابع

1. Upendra, K., Bandyopadhyay, M., 2006. Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk. Bioresource Technology, 97:104-109.
2. Elzahabi, M., Yong, R.N., 2001. pH influence on sorption characteristics of heavy metal in vadose zone. Engineering Geology, 60: 61-68.

۳. محمد پوران، حمیدرضا، اثر فاضلاب کارخانجات چرمسازی بر میزان کروم و تعیین شکل های آن در خاک، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، ۱۳۸۲.

4. Gong, R., Guan, R., Zhao, J., Liu, X., Ni, S., 2008. Citric acid functionalizing wheat as sorbent for Copper removal from aqueous solution. Journal of Health Science, 54(2):174-178.
5. Wong, K.K., Lee, C.K., Low, K.S., Haron, M.J., 2003. Removal of Cu and Pb by tartaric acid modified rice husk from aqueous solutions. Chemosphere, 50(1): 23-28.
6. Kadiverlu, K., Thamaraiselvi, K., Namasivayam, C., 2001. Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. Bioresource Technology, 76(1): 63-65.
7. Bishnoi, N.R., Bajaj, M., Sharma, N., Gupta, A., 2004. Adsorption of Cr (VI) on activated rice husk carbon and activated alumina. Bioresource Technology, 91: 305-307.
8. 8-Yu, B., Zhang, Y., Shukla, A., Shukla, S.S., 2001. The Removal of Heavy metals from aqueous solutions by sawdust adsorption. removal of lead and comparison of its adsorption with copper. Journal of Hazardous Materials, 84(1): 83-94 .
9. Zulkali, M.M.D., Ahmad, A.L., Norulakmal, N.H. 2006. *Oryza sativa* L. husk as heavy metal adsorbent: Optimization with lead as model solution. Bioresource Technology, 97: 21-25.
10. Montanher, S.F., Oliveira, E.A., Rollemberg, M.C., 2005. Removal of metal ions from aqueous solutions by sorption onto rice bran. Journal of Hazardous Materials, 117(2-3): 207-211.
11. Daifullah, A.A.M., Girgis, B.S., Gad., H.M.H., 2003. Utilization of agro-residues (rice husk) in small waste water treatment plants, Materials Letters, 57: 1723-1731.
12. Asrari, E., Tavallali, H., Hagshenas, M., 2010. Removal of Zn(II) and Pb(II) ions using rice husk in Food industrial wastewater. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 14(4): 159-162.

۱۳. شهبازی، افسانه و همکاران، کاربرد مواد زاید جامد در تصفیه پساب های حاوی فلزات سنگین، مجله منابع طبیعی ایران، ۱۳۸۴ جلد ۵۸، شماره ۱، ص ۱۵۱-۱۵۸.

14. Ansari, R., 2006. Application of polyaniline and its composites for adsorption/recovery of chromium (VI) from aqueous solutions, Acta Chimica Slovenica, 53(1): 88-94.

۱۵. محمدی، میترا و همکاران، بررسی امکان جذب فلزات سنگین فاضلاب صنعتی توسط شن،خاک و ماده آلی، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۸۸، شماره ۴، ص ۷۱-۸۱ .

16. Gao, H., Liu, Y., Zeng ,G., Xu, W., Xia, W., 2008. Characterization of Cr(VI) removal from aqueous solutions by a surplus agricultural waste—Rice straw. Journal of Hazardous Materials, 150: 446-452 .

۱۷. محمدی، میترا، فتوت، امیر، حق نیا، غلامحسین، کاربرد فیلتر شن-خاک-پوسته برنج برای کاهش فلزات سنگین موجود در فاضلاب صنعتی، سومین کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی، ۱۳۸۷، اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خورسگان، ایران.

۱۸. نامنی، محبوبه، علوی مقدم، سید محمد رضا، آرامی، مختار، سبوس برنج جاذب طبیعی مناسب برای حذف

کـروم (VI) از آب آشـامیدنی، چهـارمین کنگـره ملـی مهندسی عمران، ۱۳۸۷، ایران.

19. Shukla, A., Zhang, Y.H., Shukla, S.S., Dubey, P., 2002. The role of sawdust in removal of unwanted materials from water. Journal of Hazardous Materials, 95(1-2): 137-152.
20. Marshall, W.E., Champage, E.T., 1995. Agricultural byproducts as adsorbents for metal ions in labratory prepared solution and in manufacturing wastewater. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 30(2): 24-38.
21. Zhang, Y., William Franken Berger, T., 2003. Factors affecting removal of selenate in agricultural drainage water utilizing rice straw, Science of the Total Environment. 305: 207-216.
22. Parekh, D.C., Patel, J.B., Sudhakar, P., Koshy, V.J., 2002. Removal of trace metals with mango seed powder. Indian Journal of Chemical Technology, 9: 540-542.
23. Konicki, W., Pełech, I., Mijowska, E., Jasinska, I., 2012. Adsorption of anionic dye Direct Red 23 onto magnetic multi-walled carbon nanotubes-Fe_3C nanocomposite: Kinetics, equilibrium and thermodynamics. Chemical Engineering Journal, 210: 87-95.