

بررسی شرایط حذف همزمان فلزات سنگین از فاضلاب صنعتی با استفاده از فرایند جذب سطحی

بهنام مقصودی^۱، داود کاه‌فروشان^{۲*}، الناز صفری^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

۲- دانشیار مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۰۵

پیام‌نگار: Kahforoushan@sut.ac.ir

چکیده

حذف فلزات سنگین از فاضلاب‌های صنعتی به علت سمی بودن پر دامنه آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، شرایط حذف همزمان فلزات سنگین از یک نمونه فاضلاب صنعتی، فاضلاب پتروشیمی جزیره خارک به صورت موردی بررسی شده است. برای بررسی شرایط تصفیه فاضلاب از چهار نقطه سیستم تصفیه نمونه برداری شده و آزمایشها روی آن انجام شد. نتایج نشان داد مقدار مواد آلی فاضلاب زیاد است و حتی پس از فرایند تصفیه به طور کامل حذف نمی شوند. در ادامه، برای کاهش فلزات سنگین خروجی، از روش جذب سطحی با بهره‌گیری از کربن فعال استفاده شد. برای تولید کربن فعال از پوست گردو استفاده شد. پس از سنتز کربن فعال و ارزیابی خاصیت جذبی آن، آزمایشهای جذب با استفاده از نمونه فاضلاب پتروشیمی صورت گرفت. در آزمایشهای جذب تأثیر پارامترهای دما، pH میزان جاذب و مدت زمان بررسی شد. نتایج نشان داد که pH معادل ۶ بهترین عملکرد را در جذب دارد. بر اساس نتایج برای فلزات سنگین کروم، مس و سرب زمان تعادلی ۶۰ دقیقه به دست آمد، در حالی که برای نیکل این مقدار ۳۰۰ دقیقه بود. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش دما سبب افزایش میزان جذب می‌شود. سرانجام، تأثیر میزان جاذب نشان داد که غلظت میزان جاذب ۱۸ g/L فاضلاب بهترین میزان حذف را در پی خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: فاضلاب صنعتی، فلزات سنگین، جذب سطحی، کربن فعال.

۱. مقدمه

سمی‌اند و خاصیت سرطانزایی دارند. چگالی ویژه این فلزات بالای ۴/۵ تا ۵ و وزن اتمی آنها بین ۶۳/۵ و ۲۰۰/۶ است. نمک‌های این فلزات رنگی و غالباً آمفوترند [۱]. به طور طبیعی، می‌توان فلزات سنگین را در پوسته زمین یافت. از انواع آنها می‌توان به جیوه، کروم، کادمیم، آرسنیک، روی، مس، کبالت، نیکل، و سرب اشاره کرد. وجود برخی از این فلزات مانند روی، مس و منگنز در

یکی از آلاینده‌های مهم که در تصفیه فاضلاب حذف آنها با استفاده از فرایند جذب سطحی مورد نظر بوده، فلزات سنگین‌اند فلزات سنگین به دسته‌ای از عناصر با خاصیت فلزی گفته می‌شود که اغلب

* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی محیط زیست

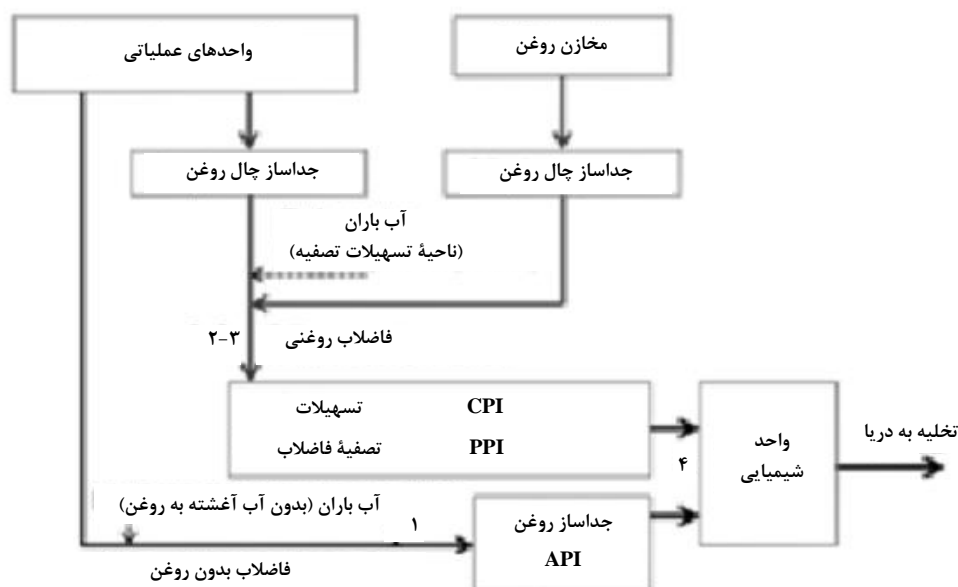
شرایط عملیاتی و فرایندی بسیار متفاوت از جذب تک فلزی خواهد بود. از این رو در این تحقیق در شرایط حذف همزمان فلزات سنگین یک نمونه فاضلاب صنعتی (به صورت موردی: فاضلاب کارخانه پتروشیمی جزیره خارک) بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

در ابتدا لازم بود وضعیت فاضلاب واحد صنعتی مورد نظر به طور دقیق بررسی شود. از این رو نمونه برداری از ۴ نقطه انجام گرفت. این نقاط در اطراف جزیره خارک در محل ورود فاضلاب‌های نفتی به دریا و جریان‌های خروجی از داخل تأسیسات تصفیه فاضلاب، شامل فاضلاب ورودی به سیستم‌های ثقیلی API^۱، ورودی به سیستم CPI^۲، ورودی به سیستم PPI^۳ و خروجی از تصفیه شیمیایی انتخاب شدند (شکل (۱)). نمونه‌ها براساس دستورالعمل روش‌های استاندارد آنالیز آب و فاضلاب آماده‌سازی و با استفاده از روش جذب اتمی با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل NOVA Analytikjena 300 ساخت کشور استرالیا، مقادیر فلزات سنگین در نمونه‌ها تعیین شد [۱۳]. در جدول (۱) متوسط نتایج آنالیز فلزات سنگین در نمونه‌ها درج شده است. با توجه به نتایج، میزان فلزات سنگین مس، نیکل، سرب و کروم بیشتر از حد استاندارد است.

مقادیر کم در بدن موجودات زنده ضروری است، اما میزان بیش از حد استاندارد به حیات موجودات زنده زیان می‌رساند. به دلیل انحلال‌پذیری بالای یون‌های فلزی این مواد در محیط‌های آبی، یون‌های یادشده می‌توانند توسط ریزاندامگانهای زنده جذب شوند و اگر این مواد وارد زنجیره غذایی شوند، مقدار زیادی از این فلزات ممکن است در بدن تجمع کنند و اگر غلظت آنها از مقادیر تعیین شده بیشتر شود، ممکن است به مشکلات جدی در بدن انجامند [۲]. فرایند جذب سطحی یکی از فرایندهای متداول در تصفیه فاضلاب‌های حاوی فلزات سنگین است. از میان جاذب‌های مختلفی که در فرایند جذب سطحی مصرف می‌شود، کربن فعال بیشتر از همه کاربرد دارد. با این حال، هزینه گزاف تولید کربن فعال، استفاده از منابع ارزان‌قیمت را برای تولید آن در مرکز مورد توجه قرار داده است [۳].

تحقیقات زیادی در مورد حذف فلزات سنگین از فاضلاب‌های سنتزی، با بهره‌گیری از کربن فعال یا سایر جاذب‌ها انجام شده و شرایط فرایندی، میزان بازده جذب، مدل‌های سینتیکی و اطلاعات دیگر گزارش شده است [۱۲-۴]. اما کمبود اطلاعات و داده‌ها در مورد حذف فلزات سنگین از فاضلاب‌های صنعتی واقعی می‌طلبد که در این زمینه تحقیقات زیادی صورت گیرد. علت آن است که در این نوع فاضلاب‌ها چندین فلز سنگین به صورت همزمان حضور دارند و



شکل ۱. نقاط نمونه برداری در سیستم تصفیه فاضلاب مورد مطالعه (نقاط ۱ تا ۴).

جدول ۱. میزان فلزات متوسط فلزات سنگین در فاضلاب مورد بررسی.

فلز سنگین	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	استاندارد تخلیه به آب‌های سطحی (mg/L) [۱۴]
آهن	۱	۰/۵	۰/۵	۲	۳
مس	۳۰	۲۶	۴	۵۸	۱
منگنز	۰/۱	۰/۱	ناچیز	۰/۱	۱
نیکل	۴	۴	۱	۸	۲
کادمیم	۸	۶	۵	۱۸	۱
مولیبدن	ناچیز	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۰/۱
سرب	۶	۱۸	۳	۲۷	۱
جیوه	ناچیز	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۰/۰۰۱
کروم(III)	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۱	۲

می‌شود. عدد یدی بیانگر میزان تخلخل کربن فعال است که از طریق جذب ید از محلول حاوی آن اندازه‌گیری می‌شود، و به صورت میلی‌گرم عنصر ید جذب شده به ازای هر گرم از کربن فعال بیان می‌شود. با توجه به اندازه مولکول‌های ید، می‌توان پی برد که هر چه عدد یدی بالاتر باشد فعالیت کربن فعال بیشتر می‌شود. سطح ویژه، مشخصه مهم دیگری در انتخاب جاذب‌ها به‌شمار می‌آید. اندازه‌گیری این مشخصه از طریق روشی موسوم به روش BET^۲ اندازه‌گیری شد. بنابر نتایج به‌دست آمده، سطح ویژه که دانه‌های کربن فعال سنتز شده $900 \text{ m}^2/\text{g}$ است. هر چه مساحت این حفره‌ها بیشتر باشد، تعداد مکانهای جذب بیشتر خواهد بود. انواع کربن فعال از مقادیر سطح ویژه مختلف $800 \text{ m}^2/\text{g}$ تا $2500 \text{ m}^2/\text{g}$ برخوردارند [۶].

جدول ۲. مشخصات دانه‌های کربن فعال سنتز شده

اندازه ذرات (mm)	۰/۴ - ۲/۳۸
چگالی ظاهری (kg/m^3)	۴۸۰
عدد یدی	۸۵۰
سطح ویژه (m^2/g)	۹۰۰

2. Brunauer-Emmet-Teller

در این تحقیق از پوست گردو به منظور ساخت جاذب کربن فعال برای حذف فلزات سنگین استفاده شد. به خاطر تهیه کربن فعال براساس مراحل کار ارائه شده توسط یانگ و همکارش (۲۰۱۰) [۱۵]، ابتدا پوسته‌های گردو خرد شده و با نسبت وزنی ۱:۱ در محلول فعال‌ساز کلرید روی ۵ مولار به مدت ۲ ساعت آغشته و اشباع شد. مخلوط حاصل پس از خشک شدن در دمای محیط به راکتوری با حجم ۲۰۰ میلی لیتر منتقل و احتراق در غیاب اکسیژن صورت گرفت. در تمام عملیات یادشده، گاز نیتروژن خالص در راکتور به منظور برقراری جوّ خنثی جریان داشت. سپس راکتور مورد نظر درون کوره به مدت ۲ ساعت در دمای نهایی 600°C با سرعت افزایش دما $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ حرارت داده شد. سرانجام، مخلوط حاصل در دمای محیط خنک شد و به منظور خارج کردن مواد فعال کننده، تحت عملیات شستشو با مقادیر کافی آب مقطر قرار گرفت. نمونه سپس خشک و خرد شده و در گروه دانه‌بندی ۰/۴ تا ۲/۳۸ میلی‌متر قرار گرفت. خصوصیات کربن فعال به‌دست آمده بر اساس استاندارد ASTM^۱ ارزیابی شد (جدول (۲)) [۱۶]. در ارزیابی مشخصه مهم شامل دانه‌بندی، وزن مخصوص، عددیدی و سطح ویژه بررسی شدند.

دانه‌بندی کربن فعال در بهبود عملکرد موثر است. البته، با کوچک شدن اندازه، افت فشار نیز افزایش می‌یابد. به همین علت، انتخاب با مقایسه بین کوچکترین ذرات ممکن و کمترین افت فشار مجاز انجام

1. American Standards Test Methods

۳. نتایج و بحث

۳-۱ نتایج آنالیز فاضلاب و فاضلاب تولیدی در واحد

نتایج آنالیز فاضلاب در چهار نقطه نمونه برداری در جدول (۳) درج شده است. با توجه به نتایج، آشکار است که هر چند مقادیر اکثر آلاینده‌ها در ورودی فاضلاب بسیار بالاتر از استانداردهای تخلیه است، اما با پیشرفت روند تصفیه فاضلاب مقادیر آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. با این احوال، مقادیر COD^۱ فاضلاب خروجی همچنان بالاتر از استانداردهای تخلیه است و باید تدابیر لازم در این زمینه اندیشیده شود. اما با انجام تصفیه مقادیر زیادی از این مواد آلی حذف شده که البته در خروجی تصفیه خانه به مقدار کم قابل مشاهده‌اند. در ادامه، فرایند حذف فلزات سنگین با استفاده از کربن فعال ساخته شده و بررسی پارامترهای مؤثر انجام گرفت.

میزان جذب فلزات سنگین نیکل، مس، سرب و کروم در یک سیستم ناپیوسته آزمایشگاهی بررسی شد. در کلیه آزمایشها، غلظت اولیه کلیه فلزات سنگین مطابق با مقادیر متوسط نمونه ۴ در جدول (۱) (بالاترین مقدار متوسط) لحاظ شد. سرانجام، برای بررسی خواص و ریخت‌شناسی جاذب تولید شده، از آنالیز SEM^۱ استفاده شد. در کلیه آزمایشها بازده حذف بر اساس تغییر غلظت فلز سنگین قبل و پس از فرایند جذب با کمک رابطه (۱) تعیین شد:

$$R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

که C_0 و C_e ، به ترتیب، غلظت‌های اولیه و نهایی فلز سنگین و R بازده حذف است.

جدول ۳. آنالیز فاضلاب پتروشیمی خارک و مقایسه با استانداردها.^۱

روش استاندارد به کار رفته [۱۳]	استانداردهای تخلیه به آبهای سطحی [۱۴]	خروجی از تصفیه شیمیایی	ورودی به سیستم PPI	ورودی به سیستم CPI	ورودی به سیستم‌های ثقلی API	محل نمونه برداری نمونه	
ASTM D1293	۶-۸/۵	۹-۵	۷/۱	۷/۱	۶/۹	-	pH
St.Method 2550 B		-	۳۵	۴۴	۵۷	°C	دما
St.Method 2120 B	۷۵	۷۵	۱۰	۴۵	۵۶	°TCU	رنگ
ASTM D1889	۵۰	-	۱۲	۵۲	۱۰۰	°NTU	کدورت
ASTM D888	۲	-	زیر حد سنجش	زیر حد سنجش	زیر حد سنجش	mg/L as O ₂	اکسیژن محلول
St.Method 2540 C	تبصره ۱	تبصره ۲	۲۲۵۱	۲۲۶۴	۱۹۹۹	mg/L	°TDS
St.Method 2540 D	۴۰	-	۱۰	۴۵۰	۷۶۹	mg/L	°TSS
St.Method 2510 B	۱۰	۱۰	۱۰	۱۶۵۴۵	۳۵۷۶۸	mg/L	Oil & Grease
St.Method 4500 E S2 -	۱۵	۱۵	۹۶	۳۹۸	۱۱۰۹	mg/L as O ₂	COD
St.Method 4500 B SO32-	۱۰	۱۰	۱۰	۳۷۶	۲۲۲	mg/L as O ₂	°BOD ₅

1. Scanning Electron Microscope
5. Total Dissolved Solid2. Chemical Oxygen Demand
6. Total Suspended Solids

3. True Color Unit

7. Biochemical Oxygen Demand

4. Nephelometric Turbidity Units

۲-۳ تأثیر pH محلول بر فرایند جذب

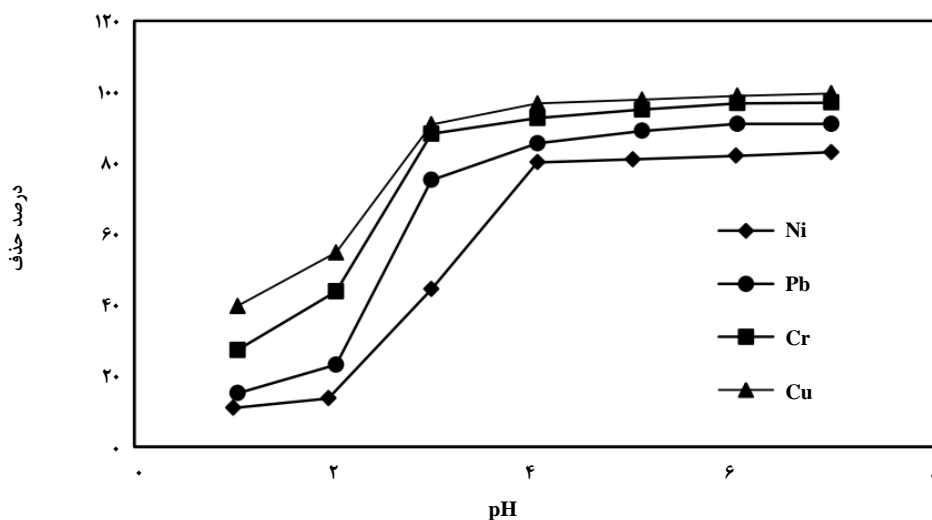
pH محلول یکی از مهم ترین فاکتورهای عمل جذب به شمار می آید. معمولاً از سه طریق بار سطحی جاذب، درجه یونش و تغییر در ماهیت ماده جذب شونده در طول عمل موثر است. برای بررسی میزان تأثیر pH بر میزان جذب فلزات سنگین، از ۰/۵ گرم جاذب در ۵۰ میلی لیتر محلول آبی بهره گرفته شد و pH محلول از ۱ تا ۷ به صورت متغیر در نظر گرفته شد. غلظت اولیه فلزات معادل مقادیر نمونه ۴ در جدول (۱) تعیین شد.

اثر pH بر بازده حذف فلزات سنگین شامل مس، کروم، سرب و نیکل از طریق کربن فعال در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، درصد حذف فلزات سنگین با افزایش pH محلول افزایش می یابد و با توجه به نتایج به دست آمده در pH=۶، بیشترین میزان جذب فلزات معادل ۹۹٪ وجود دارد و می توان این مقدار را به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت. در pH بالای ۷، فلزات به شکل هیدروکسید آن هستند که در حالت رسوب اند. بنابراین، از pH بالاتر از ۷ برای بررسی اثر pH بر میزان جذب استفاده نشد. در محلول با pH پایین، یون های هیدرونیوم با کاتیون های فلزی موجود در محلول به رقابت پرداخته و در نتیجه به مثبت شدن بار سطحی کلی بر سطح جاذب می انجامد و مانع

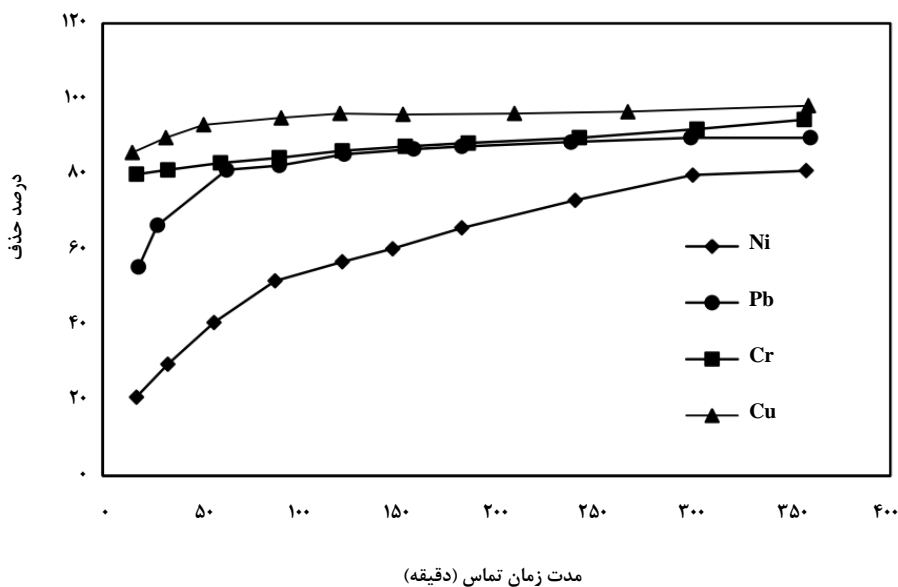
نزدیک شدن کاتیون های فلزی به سطح جاذب می شود. این امر سبب می شود سطح جاذب بار مثبت پیدا کند و برای جذب یون فلزی گرایشی بروز ندهد. در نتیجه، می توان گفت که محیط خنثی یا محیطی با اسیدیته کمتر، عملکرد بهتری نسبت به محیط اسیدی خواهند داشت.

۳-۳ تأثیر مدت زمان جذب

در شکل (۳) زمان انجام واکنش بر جذب فلزات سنگین از طریق کربن فعال مشاهده می شود. شرایط آزمایش در pH=۶ و میزان جاذب ۰/۵ گرم در ۵۰ میلی لیتر بوده است. در کلیه آزمایشها، غلظت اولیه فلزات مانند آزمایش قبل تنظیم شدند. مطابق شکل (۳) مشاهده می شود که در مدت زمان های مختلف، میزان حذف فلزات سنگین ابتدا افزایش و پس از آن ثابت مانده است. در توجیه این پدیده می توان گفت که در ابتدای واکنش با افزایش مدت زمان تماس ذرات جذب شونده فرصت بیشتری برای نفوذ به سمت جاذب و اشغال سایت های فعال دارند اما وقتی فرایند به تعادل می رسد، جاذب اشباع می شود و افزایش مدت زمان تأثیری بر بازدهی جذب ندارد. برای سرب، مس و کروم مدت زمان تعادل ۶۰ دقیقه و برای نیکل ۳۰۰ دقیقه است.



شکل ۲. تأثیر pH بر میزان جذب فلزات سنگین.

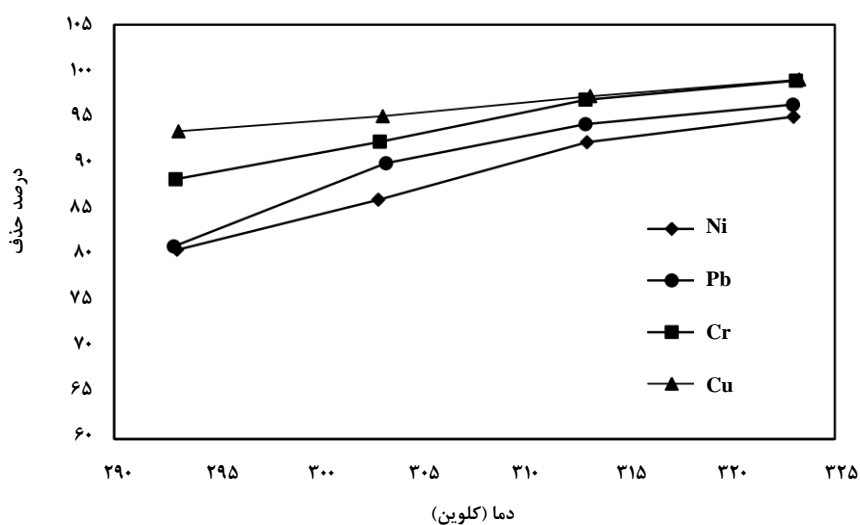


شکل ۳. تأثیر مدت زمان بر میزان حذف فلزات سنگین.

۳-۴ تأثیر دما بر میزان جذب

باعث حرکت سریع تر مولکولها و در پی آن افزایش برخورد مؤثر بین فلزات و جاذب می شود و به این ترتیب، احتمال جذب فلزات بر روی جاذب افزایش می یابد؛ ب) افزایش دما به کاهش گرانیوی محلول و در نتیجه تحرک راحت تر و بیشتر فلزات می انجامد و در نتیجه سرعت نفوذ فلزات بر سطح خارجی و خلل و فرج جاذب افزایش می یابد [۱۷].

اثر دما بر بازدهی جذب فلزات در دماهای مختلف مطالعه شد. شرایط آزمایش در $\text{pH}=6$ و میزان جاذب 0.5 گرم در 50 میلی لیتر بوده است. غلظت اولیه فلزات مانند شرایط آزمایش قبل تنظیم شد. مطابق شکل (۴)، افزایش دما سبب افزایش آرام میزان جذب می شود. افزایش میزان جذب فلزات بر جاذب سنتز شده با افزایش دما را می توان به دو عامل واضح مربوط دانست: الف) افزایش دما

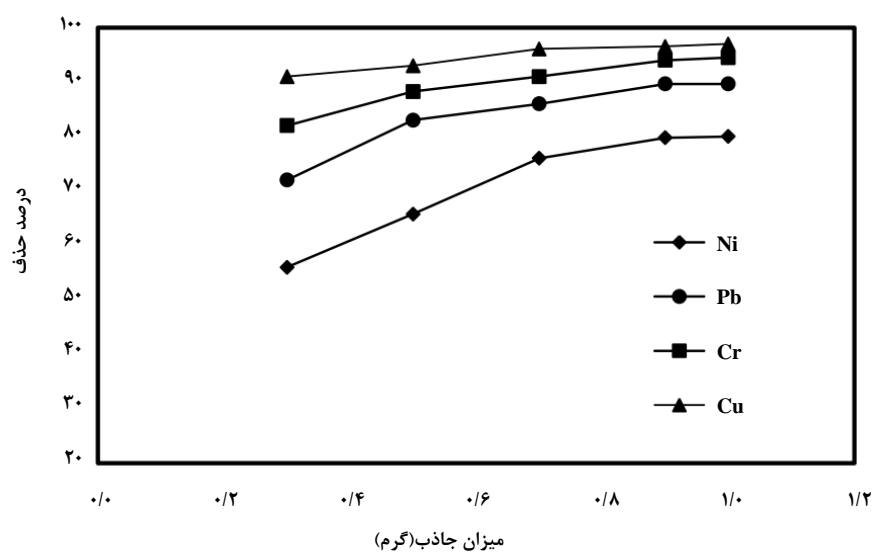


شکل ۴. تأثیر دما بر میزان جذب

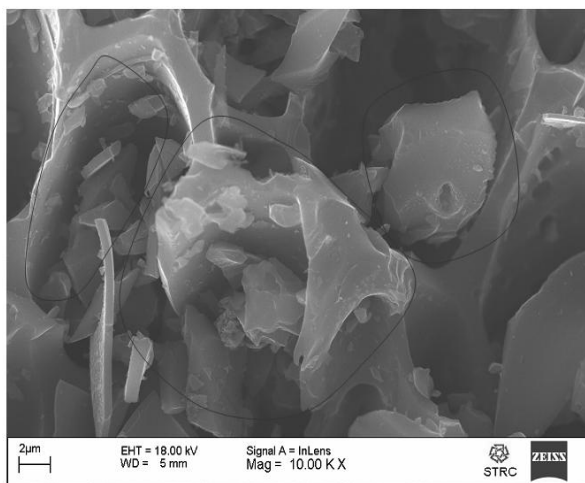
۳-۵ تأثیر میزان جاذب بر جذب

برای بررسی میزان جاذب بر بازده حذف فلزات، مقادیر مختلف کربن فعال (۰/۳ تا ۱ گرم) در ۵۰ میلی لیتر محلول آبی به کار گرفته شد. غلظت اولیه فلزات، مانند آزمایش قبل، تنظیم شدند. نتایج در شکل (۵) نمایش یافته‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان جاذب از ۰/۳ گرم به ۰/۹ گرم، بازده حذف افزایش می‌یابد و افزایش بیش از ۰/۹ گرم برای جاذب، تأثیر چندانی بر بازده حذف ندارد و بنابراین میزان جاذب ۰/۹ گرم در ۵۰ میلی لیتر محلول آبی به عنوان مقدار جاذب بهینه به دست می‌آید.

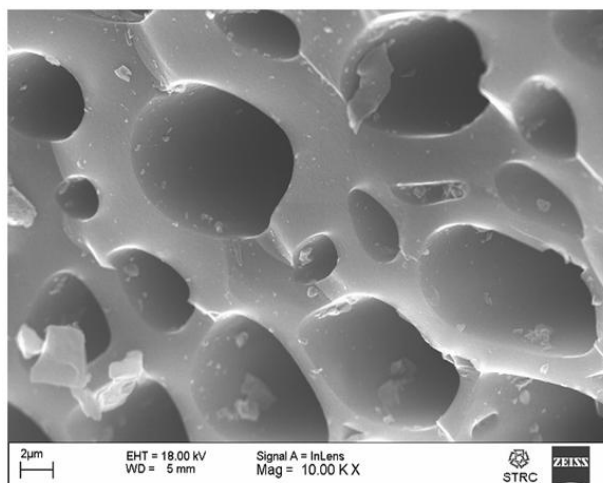
در شکل (۶)، آنالیز نتایج تصاویر SEM برای کربن فعال قبل و بعد از جذب ارائه شده است. مطابق شکل (۶-الف)، جاذب سنتز شده دارای تخلخل زیادی است و این ساختار متخلخل با خلل و فرج دایره‌ای شکل، امکان افزایش سطح تماس و افزایش میزان جذب فلزات به درون جاذب را فراهم می‌آورد. خطوط قرمز رنگ مشخص‌کننده در شکل (۶-ب) حاکی از آن است که امکان نفوذ عوامل جذب شونده در خلل و فرج جاذب فراهم آمده و ذرات جذب شونده می‌توانند به سطوح داخلی جاذب وارد شوند.



شکل ۵. تأثیر میزان جاذب بر جذب فلزات.



(ب)



(الف)

شکل ۶. تصویر SCM کربن فعال: (الف) قبل از عمل جذب؛ (ب) پس از عمل جذب.

۴. نتیجه گیری کلی

مراد از این تحقیق، استفاده از کربن فعال ساخته شده از پوست گردو برای حذف همزمان فلزات سنگین از یک نمونه فاضلاب صنعتی بود. بنابر نتایج به دست آمده، روند تأثیر پارامترهای جذب شامل دما، pH، میزان جاذب و مدت زمان بر حذف همزمان فلزات تقریباً یکسان است، اما برای جذب حداکثر، لازم است مقادیر این متغیرها بهینه شود. بنابر نتایج حاصل برای کروم، مس و سرب، زمان تعادلی ۶۰ دقیقه بود در حالی که برای نیکل این مدت زمان ۳۰۰ دقیقه به دست آمد. بنابر نتایج حاصل، برای کلیه فلزات افزایش دما سبب افزایش میزان جذب می شود. بر اساس نتایج به دست آمده، حداکثر میزان جذب در pH=۶ و میزان جاذب ۰/۹ گرم در ۵۰ میلی لیتر فاضلاب به دست آمد. به طور کلی، می توان نتیجه گرفت کربن فعال ساخته شده می تواند به عنوان یک جاذب مناسب برای حذف همزمان فلزات سنگین از فاضلاب های صنعتی مصرف شود.

مراجع

- [۷] رفتاری، حمید، معظمی، حمید، گنجی دوست، حسین، آیتی، بیتا، "تأثیر جاذب های طبیعی در حذف مس و سرب" مجله علوم محیطی، شماره ۳، صفحات ۱۰۸-۹۷، ۱۳۹۰.
- [8] Yu, B., Zhang, Y., Shukla, A., Shukla, S. S., Kenneth, L., "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: 83-94, (2011).
- [9] Kabbashi, N. A., Atieh, M. A., Al-Mamun, A., Mirghami, A., Alam, M. D., Yahya, N., "Kinetic adsorption of application of carbon nanotubes for Pb(II) removal from aqueous solution", *Journal of Environmental Sciences*, 21: 539-544, (2015).
- [10] Alzaydien, A. S., "Orange Peels as a Low Cost Adsorbent for the Removal of Mn(II) from Wastewater Equilibrium and Kinetic Studies", *World Applied Sciences Journal*, 6(3): 309-322, (2012).
- [11] Chrishna, K. G., Gupta, S. S., "Removal of Cu (II) by natural and acid-activated clays: An insight of adsorption isotherm, kinetic and thermodynamics", *Journal of desalination*, 212: 66-75, (2014).
- [12] Lee, S. M., Laldawngliana, C., Tiwari, D., "Iron oxide nano-particles-immobilized-activated carbon material in the treatment of Cu (II), Cd (II) and Pb (II) contaminated waste waters", *Journal of chemical engineering*, 195: 103-111, (2015).
- [13] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd Edition, <https://www.standardmethods.org>, (assessed: May 31, 2016).
- [۱۴] استانداردهای خروجی فاضلاب از طرف سازمان حفاظت محیط زیست، به استناد ماده ۵ آیین نامه جلوگیری از آلودگی آب مورخ ۱۳۷۳/۵/۹، قابل دسترسی در سایت: <http://ts.tpww.ir/fa/pfazelab/pf2>
- [15] Yang, J., Qiu, K., "Preparation of activated carbons from walnut shells via vacuum chemical activation and their application for methylene blue removal", *Chemical Engineering Journal*, 165 (1): 209-217, (2010).
- [16] American Society for Testing Material (ASTM), ASTM Activated Carbon Test Methods, Available from: <https://www.astm.org> › Standards & Publications (Last Cited: 2017-12-20).
- [17] Gupta, V., Agarwala, S., Goma, H. R., Arvind, A., Bhartia, K., Hamdy Makhoul, A. S., "Facile route synthesis of novel graphene oxide-β-cyclodextrin nanocomposite and its application as adsorbent for removal of toxic bisphenol A from the aqueous phase", *Journal of Molecular Liquids*, 237: 466-472, (2017).
- [1] Druibe, J. O., Ogwuegbu, M. O. C., Egwurugwu, J. N., "Heavy metal pollution and human biotoxic effects", *International Journal of Physical Sciences*, 2(5): 112-118, (2007).
- [2] Li, W., Zhang, L., Peng, J., Li, N., Zhang, S., Guo, S., "Tobacco stems as a low cost adsorbent for the removal of Pb (II) from wastewater: Equilibrium and kinetic studies, *Industrial crops and products*", 2 (8): 294-302, (2008).
- [3] Naiyaa, T. K., Bhattacharyaa, A. K., Mandal, S., Das, S. K., "The sorption of Mn(II) ions on rice husk ash", *Journal of Hazardous Materials*, 163: 1254-1264, (2009).
- [4] Kan, J., Heng, S. T., Na, S. L., Bo, L. H., "Adsorption characteristics of copper, lead, zinc and cadmium ions by tourmaline", *Journal of Environmental Sciences*, 18 (6): 1221-1225, (2006).
- [5] Meena, A. K., Kadirvelu, K., Mishra, G. K., Rajagopal, A. C., Nagar, P. N., "Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solution by treated sawdust (*Acacia arabica*)", *Journal of Hazardous Materials*, 150: 604-611, (2007).
- [۶] سیاح زاده، امیرحسین، گنجی دوست، حسین، آیتی، بیتا، "بهینه سازی تولید کربن فعال از پوست بادام در جذب آلاینده های محلول نفتی" مجله آب و فاضلاب، شماره ۵، صفحات ۱۱۷-۱۰۸، ۱۳۹۳.