

حذف کروم شش ظرفیتی از محیطهای آبی با استفاده از جذب بر روی پودر آهن تجاری؛ مطالعه سینتیکی و تعادلی

دکتر علیرضا رحمانی*، رقیه نوروزی**، دکتر محمدتقی صمدی*، مهدی شیرزاد سینینی***

دریافت: ۸۹/۱۰/۱۸، پذیرش: ۹۰/۳/۴

چکیده:

مقدمه و هدف: یکی از عمده ترین آلاینده های محیط زیست پساب های صنعتی حاوی فلزات سنگین است. کروم از جمله فلزات سنگین می باشد که در پساب صنایع مختلف از جمله پساب صنایع آبکاری وجود دارد و بشدت برای انسان و محیط زیست سمی است. هدف از این مطالعه بررسی جذب فلزات سنگین مثل کروم شش ظرفیتی بر روی پودر آهن تجاری به عنوان جاذب موثر، سریع و ارزان قیمت بود.

روش کار: این مطالعه از نوع تجربی- آزمایشگاهی بود که در سیستم ناپیوسته انجام گردید. در این مطالعه حذف کروم شش ظرفیتی با استفاده از پودر آهن با تغییرات pH، زمان تماس، مقدار اولیه پودر آهن تجاری و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج توسط نرم افزار Excel تجزیه و تحلیل گردید.

نتایج: نتایج حاصل از انجام آزمایشات مشخص ساخت که کارایی حذف کروم شش ظرفیتی با افزایش pH و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس و مقدار پودر آهن، کارایی حذف افزایش یافت. به طوری که با افزایش مقدار ماده جاذب از ۰/۱ g/100ml به ۱/۵ g/100ml در شرایط ثابت غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی ۲۰ mg/L و pH=۷، کارایی حذف از ۴۷/۵٪ به ۹۲/۵٪ افزایش یافت. همچنین در شرایط ثابت غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی ۲۰ mg/L و pH=۷، مقدار پودر آهن ۰/۱ g/100ml با افزایش زمان تماس از ۲ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه کارایی حذف از ۴۱/۱٪ به ۴۸/۵۱٪ افزایش یافت. همچنین دادهای تجربی تعادل جذب با مدل های ایزوترم جذب فروندلیخ و لانگمیر و مدل های سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و شبه درجه اول اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سینتیک فرایند جذب از مدل سینتیک شبه درجه دو، و داده های تعادلی از مدل ایزوترمی لانگمیر پیروی می کند. **نتیجه نهایی:** در مجموع نتایج حاصل از انجام آزمایشات مشخص ساخت که می توان از پودر آهن تجاری به عنوان یک روش موثر، سریع و ارزان در جهت حذف کروم شش ظرفیتی از محلول های آبی استفاده کرد.

کلید واژه ها: پودر آهن / جذب سطحی / کروم شش ظرفیتی

مقدمه:

سلول های موجودات زنده دخالت می نمایند و باعث اختلال در فعالیت های متابولیکی می شوند (۲). کروم از جمله فلزات سنگین می باشد که در پساب های صنعتی از قبیل پردازش فلزات، صنایع آبکاری، نساجی، چرم سازی و کود سازی یافت می شود (۳). کروم موجود در پساب های صنعتی و همچنین در طبیعت در دو حالت کروم شش ظرفیتی و کروم سه ظرفیتی یافت می شود. کروم شش

یکی از عمده ترین آلاینده های محیط زیست وجود فلزات سنگین در پساب های صنعتی می باشد که از نظر شدت آلاینده در گروه آلاینده های درجه اول سمی قرار دارند. ترکیبات سمی درجه اول، موادی هستند که دارای خطرات زیست محیطی بوده و برای سلامت انسان زیان آور هستند (۱). اغلب فلزات سنگین در واکنش های بیولوژیک

* دانشجوی مهندسی بهداشت محیط مرکز تحقیقات علوم بهداشتی دانشگاه علوم پزشکی همدان

** مربی گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی گرگان

*** مربی گروه مهندسی بهداشت محیط مرکز تحقیقات بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی کردستان (mehdi_dshirzad@yahoo.com)

گیرانه تر می شود و از طرفی با توجه به گسترش صنایع مختلف و وارد شدن فلزات همواره باید از روشهای جدید، کارآمد و ارزان برای تصفیه و حذف آلاینده ها و کروم شش ظرفیتی استفاده کرد از میان جاذب های مختلف می توان به فلزاتی شبیه Fe^{2+} , Fe^0 و غیره اشاره کرد، در بین این فلزات آهن با ظرفیت صفر به دلیل فراوانی، ارزانی، و غیر سمی بودن، واکنش سریع و توانایی و بازده بالا در تجزیه آلاینده ها به عنوان یک فرآیند تصفیه در اولویت قرار دارد، همچنین به علت حذف سریع و کامل بیشتر فلزات و همچنین دسترسی آسان به مواد اولیه مورد نیاز، برای حذف انواع مختلفی از مواد از جمله فلزات سنگین کاربرد زیادی پیدا کرده است (۱۶-۱۲).

بنابراین با توجه به مشکلات مربوط به فلزات سنگین از جمله کروم شش ظرفیتی در محیط زیست، در این مطالعه پودر آهن به عنوان جاذب در حذف کروم شش ظرفیتی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه همچنین پارامترهای مختلفی از جمله pH، زمان تماس، مقدار اولیه پودر آهن تجاری و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین داده های حاصل از مطالعات ثابت تعادل با استفاده از ایزوترمهای فروندلیخ و لانگمیر و مدل های سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و شبه درجه اول اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت.

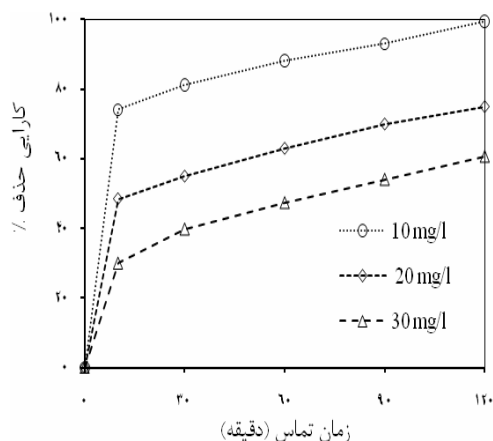
روش کار:

این تحقیق یک مطالعه تجربی-آزمایشگاهی بود که در سیستم ناپیوسته انجام گردید. کلیه مواد مورد نیاز شیمیایی از شرکت (Merck) آلمان خریداری شد. در این مطالعه از پودر آهن با مش ۱۵۰ و درجه خلوص ۹۹/۹ در صد برای حذف کروم استفاده شد. پودر آهن قبل از استفاده شدن به منظور فعال کردن سطح آن توسط اسید کلریدریک ۱ نرمال مورد پیش تصفیه قرار گرفت (۱۷).

آزمایشات جذب: بعد از تهیه مواد شیمیایی ابتدا محلول استوک کروم شش ظرفیتی (1000 mg/l) با استفاده از حل کردن دی کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) در آب بدون یون تهیه شد. سپس محلولهای استاندارد برای آزمایشات با استفاده از رقیق نمودن محلول استوک تهیه گردید. جهت تنظیم pH (مدل Suintex.SP-701) از اسید کلریدریک و سود یک نرمال استفاده شد. پارامترهای مختلفی از جمله زمان تماس (۲ تا ۱۲۰ دقیقه)، pH ($3.7, 10$)، غلظت اولیه پودر آهن تجاری با مش ۱۵۰

ظرفیتی در مقایسه با کروم سه ظرفیتی تقریباً ۱۰۰ برابر سمی بوده، سرطانزا و جهش زا می باشد (۳). تجمع کروم در بافتهای حیوانی و گیاهی می تواند سبب بروز مخاطرات جدی گردد. کروم همچنین باعث ایجاد اختلال در کار کبد، کلیه و ریه می شود (۴). سازمان جهانی بهداشت (WHO) سرطانزا بودن کروم شش ظرفیتی در انسان را تایید کرده است (۵). حداکثر مجاز کروم در آب آشامیدنی بر اساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت، 0.1 mg/l تعیین شده است (۶). بنابراین با توجه به مخاطرات کروم شش ظرفیتی در محیط زیست و همچنین در برخی موارد با ارزش بودن بازیافت آن از پساب، روش های مختلفی از جمله فرآیند ترسیب شیمیایی (۷)، اسمز معکوس (۸)، الکترودیالیز (۹) و سایر روشها برای حذف یا بازیافت کروم توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیندهای متداول از قبیل ترسیب شیمیایی به دلیل کارایی نسبتاً پائین قادر به حذف کامل کروم شش ظرفیتی و سایر فلزات سنگین از پسابهای صنعتی نمی باشند. به طور مثال در روش ترسیب شیمیایی کروم ۶ ظرفیتی با حلالیت زیاد به شکل کروم ۳ ظرفیتی با حلالیت کم تبدیل می شود که در غلظتهای کم، سنتیک واکنش کند بوده و میزان کروم باقیمانده هنگام تخلیه خیلی بیشتر از حد مجاز خواهد بود (۱۰). فرآیندهای پیشرفته نیز اغلب هزینه بر بوده و راهبری آنها نیاز به نیروی متخصص دارد. وجود چنین مشکلاتی همواره محققین را بر آن داشته که به دنبال روشهای جدید در این زمینه باشند. تحقیقات زیادی برای کاربرد و استفاده از روشهایی که به سادگی قابل استفاده و کم هزینه باشند صورت گرفته است. به طور کلی جذب سطحی فرآیند تجمع مواد در فصل مشترک بین دو فاز می باشد. در جذب سطحی از مواد مختلفی مثل کربن فعال گرانوله و پودری، خاکستر، بنتونیت، فسفر هیدرات سلولز، بیومس، زغال کک، خاک چینی استفاده می شود. کربن فعال یکی از موثرترین موادی است که برای جذب کروم استفاده می شود. از آنجائیکه احیاء آن هزینه بر بوده و گران می باشد (۱۱)، همواره محققین را بر آن داشته که به دنبال جاذبهای جدید در این زمینه باشند تحقیقات زیادی برای کاربرد و استفاده از جاذبهایی که به سادگی قابل استفاده و کم هزینه باشند صورت گرفته است قوانین و استانداردهای دفع فاضلاب صنعتی روز به روز سخت

تأثیر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بروی کارایی حذف: تأثیر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بروی کارایی حذف آن در سیستم مورد مطالعه با تغییر در غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی (۱۰، ۲۰، ۳۰ mg/L) در pH=۷ و غلظت اولیه پودر آهن ۱g/۱۰۰ml در زمانهای مختلف بررسی شد. در شکل ۲ نتایج حاصل از تأثیر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بروی کارایی حذف نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است کارایی حذف با افزایش غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی کاهش می یابد. به طوری که وقتی غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی از ۱۰ mg/L به ۳۰ mg/L افزایش یافت کارایی حذف از ۹۹/۵٪ به ۶۰/۷٪ کاهش یافت.



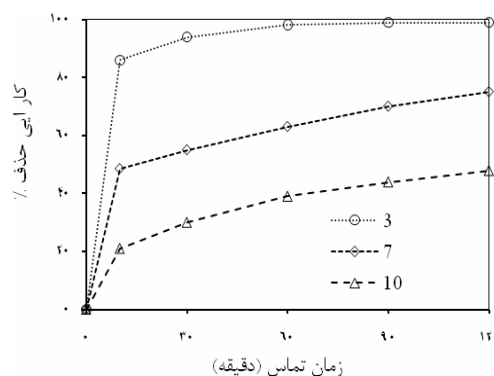
شکل ۲: تأثیر غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی (pH=۷، غلظت اولیه پودر آهن ۱g/۱۰۰ml)

تأثیر غلظت اولیه پودر آهن بروی حذف کروم شش ظرفیتی: تأثیر غلظت اولیه پودر آهن تجاری با مش ۱۵۰ بر روی کارایی حذف در سیستم مورد مطالعه با تغییر در غلظت اولیه پودر آهن تجاری (۱/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۱ g/۱۰۰ ml) در شرایط ثابت pH=۷ و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی ۲۰ mg/L در زمانهای مختلف بررسی شد. شکل ۳ اثر غلظت اولیه پودر آهن بر روی کارایی حذف را نشان می دهد. همانطور که از شکل پیدا است وقتی که غلظت اولیه جذب از ۱/۵ g/۱۰۰ ml به ۰/۱ g/۱۰۰ ml افزایش یافت کارایی حذف از ۴۷/۵٪ به ۹۲/۵٪ افزایش یافت.

(۱۰۰ ml / ۱ g ، ۰/۱ ، ۰/۵ ، ۱ ، ۱/۵) و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی (۳۰ ، ۲۰ ، ۱۰) مورد بررسی قرار گرفت. جهت تأثیر پارامترها، در هر آزمایش ۱۰۰ میلی لیتر از نمونه با غلظت مشخص از محلول کروم شش ظرفیتی با pH مشخص و غلظت اولیه پودر آهن تجاری با مش ۱۵۰ مشخص در دمای ۲۵±۱ °C در همزن مغناطیسی با ۱۶۰ دور در دقیقه مخلوط شد و در زمانهای مختلف نمونه برداری شد و سپس کارایی حذف مشخص گردید. جهت مطالعه مدل‌های ایزوترمی غلظت مشخصی از کروم شش ظرفیتی به مدت ۱ روز در تماس غلظت اولیه مختلفی از پودر آهن تجاری با مش ۱۵۰ قرار گرفت سپس برای حذف پودر آهن، نمونه با دور ۴۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفوژ شده (Sigma-301, Japan) و غلظت باقیمانده کروم شش ظرفیتی به روش ۵،۱ دی فنیل کربازید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV/VIS Shimadzo-1700, Japan) در طول موج ۵۴۰ نانومتر تعیین گردید. کلیه روش‌های مورد استفاده بر اساس کتاب روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب انجام گردیده است (۱۷).

نتایج:

تأثیر pH بروی حذف کروم شش ظرفیتی: تأثیر pH بروی حذف کروم شش ظرفیتی در این مطالعه با تغییر در pH برابر با (۳، ۷، ۱۰) در غلظت ثابت کروم شش ظرفیتی ۲۰ mg/L و غلظت اولیه پودر آهن برابر با ۱g/۱۰۰ml در زمانهای مختلف بررسی شد. در شکل ۱ نتایج حاصل از تأثیر pH بروی کارایی حذف نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می گردد، با افزایش pH کارایی حذف کاهش می یابد، به طوری که با تغییر pH از ۳ به ۱۰ کارایی حذف از ۹۹/۵٪ به ۴۷/۹٪ کاهش یافت.



شکل ۱: تأثیر pH بروی کارایی حذف (غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی ۲۰ mg/L، غلظت اولیه پودر آهن ۱g/۱۰۰ml)

ظرفیت جذب با استفاده از معادله (۱) بدست آمد (۱۸).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

q_e : مقدار جز جذب شده در واحد جرم جسم جاذب بر حسب میلی گرم بر گرم

C_0 : غلظت اولیه در محلول قبل از جذب سطحی بر حسب میلی گرم بر لیتر محلول

C_e : غلظت تعادلی ماده جذب شدنی در محلول بعد از جذب سطحی بر حسب میلی گرم بر لیتر،

V : حجم محلول بر حسب لیتر و M جرم جاذب بر حسب گرم

به طور کلی معادلات ایزوترمی و سینتیکی در معادلات ۲-۶ مشاهده می شود (۲۱-۱۹).

معادلات سینتیک

سینتیک شبه درجه اول (Pseudo-first order)
$$\ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) = -k_1 t \quad (2)$$

سینتیک شبه درجه دوم (Pseudo-second order)
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

سینتیک شبه درجه اول اصلاح شده (Modified pseudo-first order)
$$\ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) + \frac{q_t}{q_e} = -k_m t \quad (4)$$

معادلات ایزوترمی

لانگمیر (Langmuir)
$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K} + \frac{1}{q_m} c_e \quad (5)$$

فروندلیخ (Freundlich)
$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log c_e \quad (6)$$

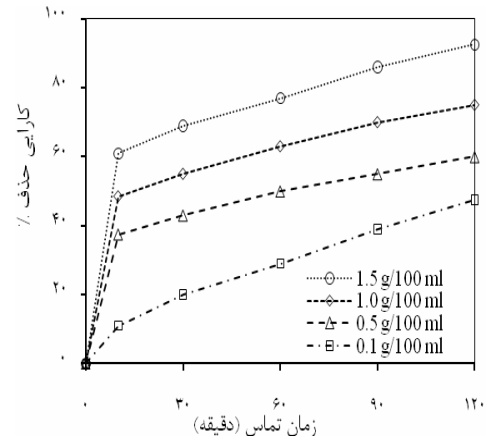
در جدول ۱ پارامترهای مدل های ایزوترمی نشان داده شده است. نتایج حاصل از این قسمت مشخص ساخت که حداکثر مقدار ماده جذب شده $17/24 \text{ mg/g}$ می باشد. همچنین مشخص گردید که داده های حاصل از آزمایشات از مدل ایزوترمی لانگمیر ($R^2=0/996$) پیروی می کنند.

جدول ۱: ضرایب ثابت و ضرایب همبستگی ایزوترم فروندلیخ و لانگمیر در جذب کروم شش ظرفیتی بر روی پودر آهن

لانگمیر		فروندلیخ	
b	۰/۱۷۶	K	۱/۳۴
q_m	۱۷/۲۴	n	۷/۷۵
R^2	۰/۹۹۶	R^2	۰/۹۷۲

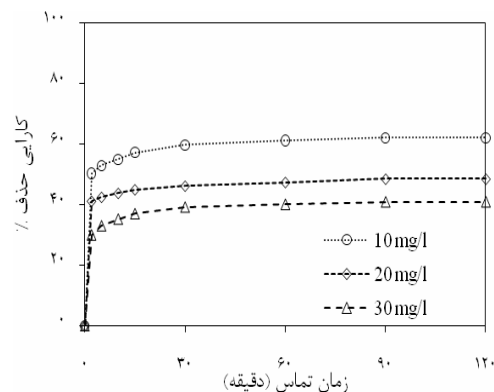
در جدول ۲ پارامترهای حاصل از مطالعات سینتیک آورده شده است.

با توجه به ضرایب همبستگی R^2 می توان نتیجه گرفت که داده های جذب از مدل سینتیکی شبه درجه دو پیروی می کند.



شکل ۳: تاثیر غلظت اولیه پودر آهن بر روی کارایی حذف کروم شش ظرفیتی ($\text{pH}=7$ ، غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی 20 mg/L)

تاثیر زمان تماس بر روی حذف کروم شش ظرفیتی: تاثیر زمان تماس بر روی کارایی حذف در سیستم مورد مطالعه با تغییر در زمان تماس از ۲ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه در $\text{pH}=7$ ، غلظت اولیه پودر آهن $1 \text{ g}/100 \text{ ml}$ و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی (10 ، 20 ، 30 mg/L) بررسی شد. شکل ۴ تاثیر زمان تماس بر روی کارایی حذف را نشان می دهد. همانطور که از شکل پیدا است وقتی زمان تماس از ۲ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه افزایش یافت، کارایی حذف از $41/1\%$ به $48/51\%$ در غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی 20 mg/L افزایش یافت. که این زمان همان زمان تعادل در آزمایشات می باشد.



شکل ۴: تاثیر زمان تماس بر روی کارایی حذف در غلظت های مختلف کروم شش ظرفیتی ($\text{pH}=7$ ، و غلظت اولیه پودر آهن $1 \text{ g}/100 \text{ ml}$)

مطالعات تعادلی: مطالعات تعادلی در یک ارلن مایر به حجم 250 سی سی حاوی 100 سی سی غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی 20 mg/L با مقدار اولیه پودر آهن تجاری ($0/1-0/8 \text{ g}/100 \text{ ml}$) و $\text{pH}=7 \pm 0/2$ بعد از ۲۴ ساعت انجام شد، سپس نمونه ها جداسازی شده و آنالیز شد و

جدول ۲: ضرایب ثابت و ضرایب همبستگی مدل سینتیکی شبه درجه یک، شبه درجه دو و شبه درجه یک اصلاح شده در جذب کروم شش ظرفیتی بر روی پودر آهن

C ₀ (mg/l)	سینتیک شبه درجه یک			سینتیک شبه درجه دو			سینتیک شبه درجه یک اصلاح شده		
	k ₁ (1/min)	q _e	R ²	k ₂ (g/mg min)	q _e	R ²	k _m (1/min)	q _e	R ²
۱۰	۰/۰۵۱	۶/۲۱۹	۰/۹۰۴	۰/۱۸	۶/۲۵	۰/۹۹۹	۰/۰۴۲	۶/۲۱۹	۰/۹۶۱
۲۰	۰/۰۳۳	۹/۸	۰/۸۴۱	۰/۱۱	۹/۸	۰/۹۹۹	۰/۰۲۳	۹/۸	۰/۹۵۹
۳۰	۰/۰۲۶	۱۲/۵	۰/۸۲۱	۰/۰۶	۱۲/۵	۰/۹۹۹	۰/۰۲۱	۵/۱۲	۰/۹۱۳

مقدار پودر آهن و زمان تماس افزایش می یابد. به علت اینکه مساحت سطحی و محلهای جذب قابل دسترس برای جذب افزایش می یابد (۳، ۱۱، ۱۵، ۲۲، ۲۳). به طوریکه نتایج حاصله با نتایجی که کاپلان و گیلور بر روی حذف کروم شش ظرفیتی با استفاده از آهن صفر ظرفیتی انجام دادند مطابقت دارد (۲۷). همچنین با افزایش زمان تماس یونهای موجود در محیط زمان بیشتری دارند تا بر روی پودر آهن جذب شوند. از طرف دیگر با افزایش زمان تماس کارایی حذف افزایش می یابد و به نقطه ای می رسد که در آنها مقدار جذب و واجذب تقریباً برابر بوده و کارایی حذف تغییر چندانی نشان نمی دهد (۱۵، ۲۳). در مطالعه حاضر این زمان تماس در حدود ۱۲۰ دقیقه بدست آمد. با توجه به ضرایب همبستگی (R²=۰/۹۹۶) می توان نتیجه گرفت که داده های تعادلی فرآیند جذب کروم شش ظرفیتی بر روی پودر آهن از ایزوترم لانگمیر با حداکثر مقدار ماده جذب شده ۱۷/۲۴ mg/g نسبت به ایزوترم فروندلیخ بهتر پیروی می کند. همچنین با توجه به ضرایب همبستگی (R²=۰/۹۹۹) می توان نتیجه گرفت که داده های جذب از مدل سینتیکی شبه درجه دو، به علت بالا بودن غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی بیش از خروجی فاضلاب صنایع در این مطالعه، نسبت به مدل سینتیکی شبه درجه یک و شبه درجه یک اصلاح شده بهتر پیروی می کند.

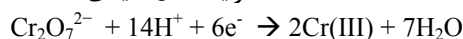
نتیجه نهایی:

نتایج حاصل از آزمایشات دلالت می کند که pH محلول آبی نقش مهمی در فرآیند جذب بازی می کند. دلیل این امر این است که گونه های مختلف کروم شش ظرفیتی و بار سطحی جاذب وابستگی زیادی به pH دارند. نتایج این مطالعه نشان داد که حذف کروم شش ظرفیتی بر روی پودر آهن به طور موثری در pH پایین تر از ۷ می تواند انجام شود. داده های تعادلی فرآیند جذب کروم شش ظرفیتی

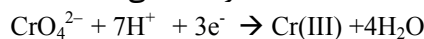
بحث:

حذف کروم شش ظرفیتی با استفاده از جذب بر روی پودر آهن تجاری با کاهش pH افزایش می یابد. با توجه به اینکه دو فرآیند مهم برای حذف کروم شش ظرفیتی در سیستم مورد مطالعه احیاء و جذب می باشند، در نتیجه با اضافه کردن پودر آهن رنگ ظاهری زرد اولیه محلول کروم شش ظرفیتی به تدریج کاسته شده و به رنگ سبز به علت احیاء کروم شش ظرفیتی به سه ظرفیتی تبدیل می شود. دلیل افزایش کارایی حذف در pH های از حد خنثی به اسیدی آن است که در pH خنثی به اسیدی گونه غالب، یون Cr₂O₇²⁻ می باشد که با تشکیل این یون از غلظت اولیه کروم کاسته شده و بنابراین کارایی حذف افزایش می یابد. کاهش کارایی در pH بالا به علت تشکیل و رسوب هیدروکسید سه ظرفیتی کروم Cr(OH)₃ روی سطح پودر آهن می باشد (۱، ۳، ۱۱، ۱۴، ۱۵، ۲۲، ۲۳). به طوریکه نتایج حاصله با نتایجی که لای و لو بر روی حذف کروم شش ظرفیتی از آبهای زیرزمینی با استفاده از آهن صفر ظرفیتی انجام دادند مطابقت دارد (۲۴). به طور کلی حذف کروم شش ظرفیتی در فرآیند مورد مطالعه با تغییرات pH بر طبق واکنشهای ۱-۳ انجام می شود (۱۶-۱۴، ۲۵).

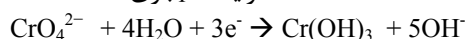
(۱) تحت شرایط pH اسیدی



(۲) تحت شرایط خنثی



(۳) تحت شرایط بازی



حذف کروم شش ظرفیتی با افزایش غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی کاهش می یابد. یکی از دلایل این امر آن است که جاذبها تعداد محلهای فعال محدودی دارند که در غلظتهای بالا اشباع می شود (۱۵، ۲۶، ۲۷). به طوریکه نتایج حاصله با نتایجی که گوپتا و بابو بر روی حذف کروم شش ظرفیتی با استفاده از خاک اره انجام دادند مطابقت دارد (۲۶). حذف کروم شش ظرفیتی با افزایش

11. Kobya M. Removal of Cr(VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies. *Biores Technol* 2004;91 (3): 317-21.
12. Karabelli D, Uazuam C, Shahwan T, Eroglu A E, Scott TB, Hallam KR, et al. Batch removal of aqueous Cu²⁺ ions using nanoparticles of zero-valent iron: A study of the capacity and mechanism of uptake. *Ind En Chem Res* 2008; 47 (14): 4758-64.
13. Qian H, Yanjun Wu, Liu Y, Xinhua XU. Kinetics of hexavalent chromium reduction by iron metal. *Environ Sci Eng* 2008; 2 (1): 51-6.
14. Sharma YC. Cr(VI) removal from industrial effluents by adsorption on an indigenous low-cost material. *Colloids and surfaces A: Physicochem Eng Asp* 2003;215 (1-3): 155-62.
15. Xue SW, Yu JT, Chen LF, Fei YL, Wen YW, Ye BT. Removal of Cr(VI) by Zero-valent, Iron-encapsulated alginate beads. *Clean Soil, Air Water* 2010; 38 (3): 263-7.
16. Yang GC, Lee HL. Chemical reduction of nitrate by nanosized iron: kinetics and pathways. *Water Res* 2005; 39 (5): 884-94.
17. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. 1998.
18. Candela PM, Martin-Martinez J, Torregrosamacia R. Chromium(VI) removal with activated carbons. *Water Res* 1995;29 (9): 2174-80.
19. Liu Y, JuanLiu Y. Biosorption isotherms, kinetics and thermodynamics. *Purif Technol* 2008; 61: 229-42.
20. McKay G, Porte JF, Prasad GR. The removal of dye colours from aqueous solutions by adsorption on low-cost materials. *Water Air Soil Poll* 1999;114: 423-38.
21. Apak R, Guclu K, Turgut MH. Modeling of copper(II), cadmium(II), and lead(II) adsorption on red mud. *J Coll Interface Sci* 1998;203: 122-30.
22. Selvi K, Pattabhi S, Kadirvelu K. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by adsorption onto activated carbon. *Biores Technol* 2001;80 (1): 87-89.
23. Shao FN, Yong L, Xin HX, Zhang HL. Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by iron nanoparticles. *J Zhej Univ Sci* 2005; 5 (5): 1022-7.
24. Lai Keith CK, Lo Irene M C. Removal of chromium (VI) by acid-washed zero-valent iron under various groundwater geochemistry conditions. *Environ Sci Technol* 2008;42 (4): 1238-44.
25. Ponder SM, Darab JG, Mallouk Thomas E. Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. *Environ Sci Technol* 2000;34 (12):2564-9.
26. Gupta S, Babu BV. Removal of toxic metal Cr(VI) from aqueous solutions using sawdust as

بر روی پودر آهن از ایزوترم لانگمیر نسبت به ایزوترم فروندلیخ بهتر پیروی می کند. همچنین سینیتیک جذب کروم شش ظرفیتی بر روی پودر آهن از مدل سینیتیکی شبه درجه دو نسبت به مدل سینیتیکی شبه درجه یک بهتر پیروی می کند.

سرانجام نتایج حاصل از انجام آزمایشات مشخص ساخت که می توان از پودر آهن به عنوان یک روش موثر، سریع و ارزان در جهت حذف کروم شش ظرفیتی از محلول های آبی استفاده کرد.

منابع:

1. Yadanaparthi SKR, Graybill D, Wandruszka RV. Adsorbents for the removal of arsenic, cadmium, and lead from contaminated waters. *J Hazard Mater* 2009;171 (1-3): 1-15.
2. Echeverra JC, T Morera M, Mazkiarun C, Garrido JJ. Competitive sorption of heavy metal by soils. Isotherms and fractional factorial experiments. *Environ Poll* 1998;101 (2): 275-84.
3. Levankumar L, Muthukumaran V, Gobinath MB. Batch adsorption and kinetics of chromium (VI) removal from aqueous solutions by *Ocimum americanum* L. seed pods. *J Hazard Mater* 2009; 161 (2-3): 709-13.
4. Khambhaty Y, Mody K, Basha S, Jha B. Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*. *Chem Eng J* 2009;145 (3): 89-95.
5. Graham N. Guidelines for Drinking-Water Quality, 2nd edition, Addendum to Volume 1 - Recommendations, World Health Organisation, Geneva, 1998, 36 pages. *Urban Water* 1999;1(2): 183.
6. Hesperhol I, Prost AME. WHO guidelines and national standards for reuse and water quality. *Water Res* 1994; 28(1): 119-24.
7. Ewecharoen A., Thiravetyan P., Wendel E., Bertagnolli H. Nickel adsorption by sodium polyacrylate-grafted activated carbon. *J Hazard Mater* 2009;171 (1-3): 335-9.
8. Hafez AI, El-Manharawy MS, Khedr MA. RO membrane removal of unreacted chromium from spent tanning effluent. *Desalination* 2002; 144 (1-3): 237-42.
9. Velizarova E, Ribeiro A B, Mateus E, Ottosen L M. Effect of different extracting solutions on the electro-dialytic remediation of CCA-treated wood waste Part I.: Behaviour of Cu and Cr. *J Hazard Mater* 2004;107 (3): 103-13.
10. Dabrowski A, Hubicki Z, Podkoscielny P, Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere* 2004;56 (2): 91-106.

adsorbent: Equilibrium, kinetics and regeneration studies. Chem Eng J 2009;150(2-3):352-65.
27. Kaplan D, Gilmore T. Zero-valent iron re-

moval rates of aqueous Cr(VI) measured under flow conditions. Water Air Soil Poll 2004;155 (1): 21-33.