

حذف کادمیوم از محیط‌های آبی از طریق نانوذرات آهن صفر ظرفیتی

سحر مکاری*^۱، غلامرضا نبی بیدهدنی^۲، حسین نایب^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست- آب و فاضلاب دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

ghhendi@ut.ac.ir

۲. استاد گروه مهندسی محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست- آب و فاضلاب، دانشکده آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید بهشتی.

pirnia.nayeb@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۹/۱۸

تاریخ وصول مقاله: ۹۳/۴/۲۸

چکیده

در سال‌های اخیر از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به‌منزله فناوری نوظهور، به صورت موفقیت‌آمیزی در جهت حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی، استفاده شده است. کادمیوم از مهم‌ترین فلزات سنگین است که به دلیل آثار مخرب روی محیط‌زیست و سلامت انسان، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است و به همین دلیل محققان بسیاری تحقیقاتی را در زمینه روش‌های حذف این فلز سنگین از محیط‌های آبی انجام داده‌اند. در این تحقیق کارایی نانوذرات آهن در حذف کادمیوم از محیط آبی بررسی شد که از نانوذرات آهن در ابعاد ۸-۱۸ نانومتر و سطح مؤثر ۵۹-۷۹ m²/g با رنگ سیاه و مورفولوژی کروی استفاده و آثار پارامترهای میزان نانوذرات، pH محلول، غلظت‌های متفاوت محلول و زمان آزمایش ارزیابی شد. برای تهیه محلول کادمیوم از نمک کلرید کادمیوم و برای تغییرات pH، از هیدروکسید سدیم و اسید کلریدریک استفاده شد. بر اساس نتایج، مقادیر بهینه برای فرایند جذب در pH برابر با ۷/۲، زمان آزمایش ۳۰ دقیقه، میزان جاذب ۰/۵ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول و غلظت اولیه کادمیوم در محلول ۵ میلی‌گرم در لیتر معرفی شدند. بر اساس نتایج، نمونه تحقیق از مدل ایزوترم جذب لانگمیر پیروی کرد.

کلیدواژه

ایزوترم جذب، کادمیوم، فرایند جذب، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی.

۱. سرآغاز

غلظت آن را برای آب آشامیدنی ۰/۰۰۳ mg/L توصیه کرده

است (Boparai, et al., 2011).

از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده برای حذف و جداسازی یون‌های فلزات سنگین (از جمله کادمیوم) از محلول‌های آبی، می‌توان به رسوب دهی شیمیایی، تعویض یونی، اسمز معکوس، فرایندهای غشایی، تبخیر، استخراج با حلال و جذب اشاره کرد (Shafaei, et al., 2007).

جذب به‌منزله روش اقتصادی و مؤثر با پتانسیل بالای حذف و بازیافت فلزات از فاضلاب شناخته شده است (Yunfei, 2010). جاذب‌های مختلف از جمله رس، زئولیت‌ها، قسمت‌های خشک گیاه، توده زباله‌های کشاورزی، بیوپلیمرها، اکسیدهای فلزی، میکروارگانیزم‌ها،

امروزه کادمیوم به‌منزله یکی از فلزات سنگین سمی و دارای آثار مخرب زیست‌محیطی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. عمده منابع انتشار کادمیوم به محیط‌زیست فاضلاب و ضایعات صنایع آبکاری، ذوب آهن، ساخت آلیاژ، رنگدانه‌ها، پلاستیک، باتری‌سازی و فرایندهای استخراج و پالایش نفت است. کادمیوم به آسانی در سیستم‌های مختلف موجودات زنده تجمع می‌یابد. همچنین، این فلز سنگین آثار منفی از قبیل اختلالات کلیوی، نارسایی ریه، ضایعات استخوان، سرطان و فشارخون بالا در سلامتی انسان می‌گذارد (Benguella, 2000) و به همین علت سازمان بهداشت جهانی^۱ بیشترین

آن در حذف آرسنیک از محیط آبی، تأثیر تغییرات پارامترهای pH، زمان ماند، غلظت آرسنیت و آرسنات و غلظت نانوذرات بر کارایی حذف در سیستم ناپیوسته را بررسی کردند (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۰). کریمی تکانلو و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی فرایند جذب سطحی یون‌های کادمیوم از فاضلاب سنتتیک با نانوذرات آهن مغناطیسی پرداختند (کریمی تکانلو و همکاران، ۱۳۹۲).

در این تحقیق، کارایی نانوذرات آهن خنثی به منظور حذف فلز سنگین کادمیوم از محیط‌های آبی (از جمله آب‌های زیرزمینی، پساب تصفیه‌شده صنایع و آب‌های سطحی) و میزان تأثیر تغییر پارامترهای اثرگذار در مکانیسم جذب بررسی شد.

۲. مواد و روش بررسی

۱.۲. مواد استفاده‌شده در آزمایش

خاصیت مغناطیسی نانوذرات آهن موجب افزایش سرعت در جداسازی ذرات از خاک و آب می‌شود. برخی فلزات سنگین در سطح نانوذرات آهن کاهش می‌یابند مانند: Cu^{2+} و Ag^{2+} یا مستقیماً در سطح نانوذرات جایی که آن‌ها بی‌حرکت‌اند جذب می‌شوند مانند: Zn^{2+} و Cd^{2+} (Boparai, et al, 2011). در پژوهش حاضر از نانوذرات آهن در ابعاد ۸-۱۸ نانومتر و سطح مؤثر ۵۹-۷۹ m^2/g با رنگ سیاه و مورفولوژی کروی استفاده شده است. برای تهیه محلول کادمیوم از نمک کلرید کادمیوم $CdCl_2 \cdot (2/5) H_2O$ و برای تغییرات pH، هیدروکسید سدیم NaOH و اسید کلریدریک HCl استفاده شد.

۲.۲. روش انجام آزمایش

در این پژوهش آزمایش‌ها به صورت راکتور ناپیوسته انجام شدند و تغییر pH، تغییر در میزان نانوذرات، تغییر در غلظت اولیه محلول و تغییر در زمان آزمایش و ته‌نشینی بررسی شد. غلظت‌های اولیه محلول به صورت ۶۰، ۳۰، ۱۵، ۵ mg/L بود که میزان ۶۰ mg/L به صورت میزان

لجن فاضلاب، خاکستر و کربن فعال برای حذف کادمیوم استفاده می‌شوند (Boparai, et al., 2011). فرایند جذب عبارت است از انتقال اجزایی از سیال و تجمع آن در جاذب جامد که تا رسیدن به حالت تعادل ادامه می‌یابد که در این حالت غلظت اجزای جذب‌شونده در سیال و سطح جاذب به تعادل می‌رسند. در مطالعه انتقال و جذب املاح و ترکیبات روی جاذب باید روابط و معادلاتی بین غلظت ماده جذب‌شده و باقیمانده در دماهای ثابت وجود داشته باشد که این معادلات را ایزوترم‌های جذب سطحی می‌گویند. مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ بیان‌کننده این معادلات‌اند (سمیعی، ۱۳۸۴).

جذب سطحی فلزات به وسیله نانوذرات، یک فناوری سازگار با محیط‌زیست است که طی سالیان اخیر به‌منزله عامل مؤثری برای از بین بردن آلودگی‌های آلی و یون‌های فلزات سنگین از آب و فاضلاب بررسی شده است (Zhang, et al., 2010). امروزه از ذرات نانو، غشای نانو و پودرهای نانو به منظور تشخیص و حذف فلزات سنگین (همچون کادمیوم، مس، سرب، جیوه، نیکل و روی)، مواد مغذی (همچون فسفات، آمونیاک، نترات و نیتريت)، مواد سمی (نظیر سیانید)، میکروارگانیزم‌های پاتوژن (از جمله ویروس‌ها، باکتری‌ها و انگل‌ها) و آلاینده‌های دارویی (نظیر آنتی‌بیوتیک‌ها) استفاده می‌شود (Dhermendr, 2008). از دلایل کاربرد وسیع نانوذرات در جذب سطحی می‌توان به سطح ویژه بالا، مکان‌های فعال بیشتر، بازده جذب بالا، واکنش‌پذیری زیاد و توانایی نانوذرات در پراکنده‌شدن در محلول آبی اشاره کرد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲).

Boparai و همکاران (۲۰۱۱) سنتتیک و ترمودینامیک جذب کادمیوم روی نانوذرات آهن صفر را بررسی کردند (Boparai, et al., 2011). کوهپایه‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) به مطالعه تأثیر نانوذرات آهن صفرظرفیتی در حذف آرسنیک پنج‌ظرفیتی از آب آشامیدنی پرداختند (کوهپایه‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). رحمانی و همکاران (۱۳۹۰) به منظور سنتز نانوذرات آهن صفر و تعیین کارایی

استاندارد، دستگاه با توجه به فلز موردنظر طول موج را تنظیم می‌کند و آماده برای خواندن غلظت کادمیوم است. همچنین، در این مطالعه، به منظور سنجش pH محلول‌ها، از pH متر مورتروهم^۲ محصول شرکت هچ^۳ آمریکا و برای اختلاط مناسب محلول‌ها از دستگاه فراصوتی اولتراسونیک^۴ با طول موج متوسط استفاده شد. شایان یادآوری است که کلیه آزمایش‌ها در دمای آزمایشگاه در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد و تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار Exel صورت گرفت.

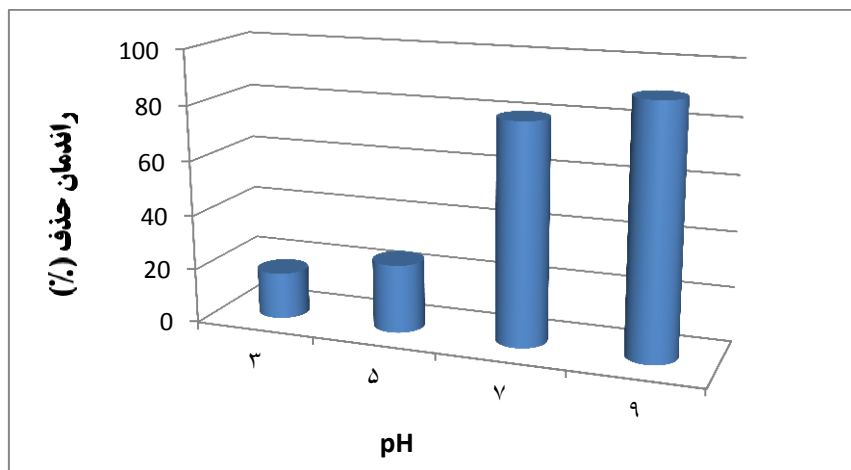
۳. یافته‌ها

۱.۳. بررسی آثار تغییر pH در کارایی حذف کادمیوم از طریق نانوذرات آهن

همان‌طور که می‌دانیم pH محلول بر اساس مشخصات فلز، بار سطحی و نوع جاذب می‌تواند تأثیر چشمگیری در جذب فلزات سنگین داشته باشد (Seol, et al., 20013). نتایج جذب کادمیوم در pH های متفاوت در دمای اتاق، با غلظت اولیه ۶۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار ۰/۲۵ گرم نانوذرات در ۱۰۰ میلی‌گرم محلول و زمان آزمایش ۴۵ دقیقه انجام شد. شکل ۱ تأثیر تغییرات pH بر بازده حذف کادمیوم را نشان می‌دهد.

غلظت اولیه محلول سایر آزمایش‌ها منظور شد. به منظور دستیابی به دقت مناسب، هر آزمایش صحیح ۳ بار تکرار و میانگین عددی آزمایش‌های صحیح به منظور مقدار بهینه پارامتر موردنظر در نظر گرفته شد. به منظور تهیه ۲۵۰ میلی‌متر از محلول ۶۰ mg/L مقدار ۰/۰۳۵ گرم از نمک کلرید کادمیوم مورد نیاز است. در ابتدا ۲۵۰ میلی‌لیتر از غلظت مشخص کادمیوم تهیه و مقادیر مشخص نانوذرات که ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۳ گرم بود از طریق ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم وزن و در بشر ۱۰۰ میلی‌لیتر حاوی محلول کادمیوم ریخته شد. سپس، به منظور پخش یکنواخت نانوذرات در محلول و افزایش تماس بین آلاینده‌ها و نانوذرات برای افزایش بازده جذب سطحی، محلول‌ها در دستگاه اولتراسونیک قرار داده شدند. مگنت پس از شستن با آب مقطر درون بشر ریخته و در مدت مشخص ۶۰، ۴۵، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ دقیقه زمان تماس داده و پس از آن به محلول موردنظر زمان ته‌نشینی داده شد. به منظور تنظیم pH از اسیدنیتریک غلیظ و سود ۰/۱ نرمال استفاده شد.

در این تحقیق غلظت کادمیوم نمونه با دستگاه طیف‌سنجی اتمیک مدل GBC903 تعیین شد. این دستگاه شامل چند قسمت است که مهم‌ترین آن لامپ دستگاه است. هر فلز لامپ مخصوص خود را دارد که بنا بر



شکل ۱. تأثیر تغییرات pH در بازده حذف کادمیوم

همان‌طور که در نمودار بالا مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار نانوذره بازده حذف نیز افزایش می‌یابد و بازده حذف با افزایش مقدار نانوذره از ۰/۱۳ تا ۰/۲۵ گرم حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که بازده حذف کادمیوم با افزایش مقدار نانوذره از ۰/۵ تا ۰/۷۵ گرم تنها ۳ درصد افزایش داشته است. در مقدار ۰/۷۵ گرم نانوذره، بهترین عملکرد را داشته است، اما با توجه به نزدیکی نتیجه آن با ۰/۵ گرم، مقدار ۰/۵ گرم نانوذره، به‌منزله میزان بهینه نانوذره انتخاب شده است (به دلیل مقرون به صرفه نبودن میزان بیشتر نانوذرات).

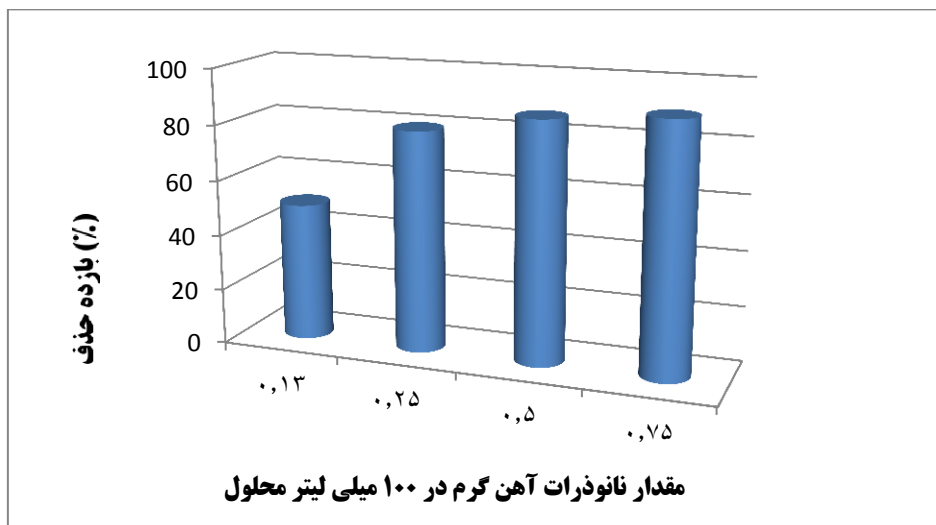
۳.۳. بررسی اثر تغییرات زمان آزمایش در عملکرد نانوذرات در حذف کادمیوم

نتایج جذب کادمیوم در مقادیر متفاوت زمان آزمایش در دمای اتاق، با غلظت اولیه ۶۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار pH برابر با ۷، مقدار ۰/۵ گرم نانوذرات در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول و زمان‌های متفاوت آزمایش ۶۰، ۴۵، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ دقیقه انجام گرفت. نتایج تأثیرات زمان آزمایش در بازده حذف کادمیوم در شکل ۳ نشان داده شده است.

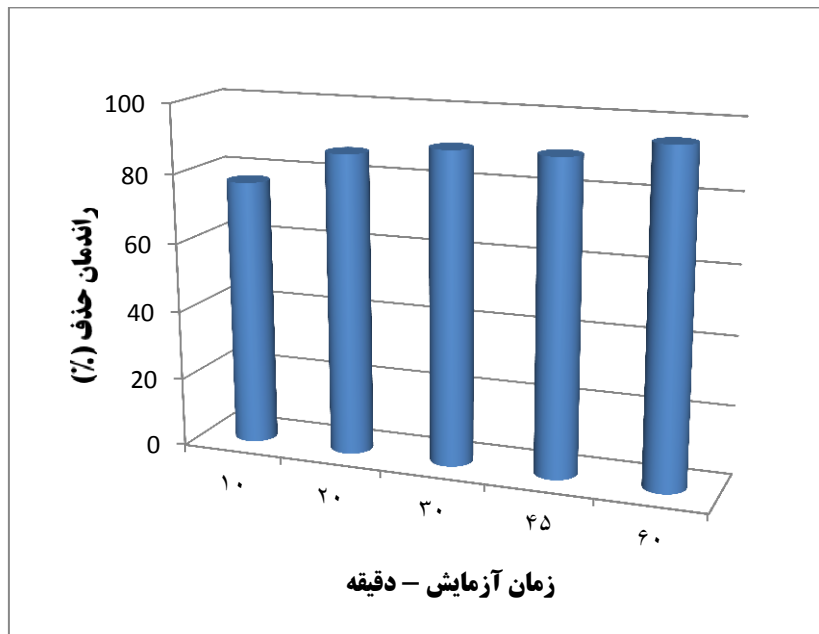
در نمودار بالا مشخص است که با افزایش pH میزان حذف از pH=۵/۸ تا pH=۷/۲ و بازده حذف حدود ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی محلول کادمیوم در pH=۸/۴ بدون حضور نانوذرات تحت شرایط یکسان آزمایش قرار گرفت که مشخص شد بدون حضور نانوذرات در این pH نیز ۸۰ درصد بازده حذف وجود دارد، اما در pH=۷/۲ بدون حضور نانوذرات و سود به صورت تنها، بازده حذف ۳۴ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده این امر است که در pH=۷/۲ حضور نانوذرات بازده حذف را افزایش می‌دهد.

۲.۳. بررسی اثر تغییرات مقدار نانوذرات آهن در عملکرد آن در حذف کادمیوم

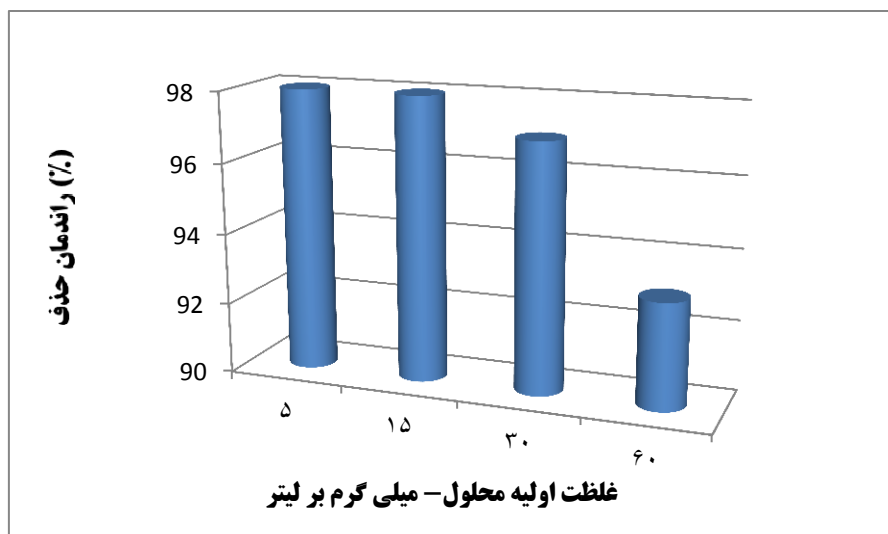
مقدار جاذب یکی از پارامترهای مهم در حذف آلاینده از طریق جذب است. نتایج جذب کادمیوم در مقادیر متفاوت نانوذرات آهن در دمای اتاق، با غلظت اولیه ۶۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار pH برابر با ۷/۲ مقادیر متفاوت ۰/۱۳، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ گرم نانوذرات در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول و زمان آزمایش ۴۵ دقیقه انجام گرفت. شکل ۲ تأثیر تغییرات مقدار نانوذره بر بازده حذف را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تأثیر تغییرات مقدار نانوذره در بازده حذف کادمیوم



شکل ۳. تأثیر تغییرات زمان آزمایش در بازده حذف کادمیوم



شکل ۴. اثر غلظت اولیه در عملکرد نانوذرات آهن در حذف کادمیوم

۴.۳. بررسی اثر غلظت اولیه در عملکرد نانوذرات در حذف کادمیوم

نتایج جذب کادمیوم در مقادیر مختلف غلظت‌های محلول اولیه در دمای اتاق، با غلظت‌های اولیه ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۵ میلی‌گرم در لیتر، مقدار pH برابر با ۷/۱، مقدار ۰/۵ گرم نانوذرات در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول و زمان آزمایش ۳۰ دقیقه انجام شد. شکل ۴ اثر غلظت اولیه در عملکرد نانوذرات آهن در حذف کادمیوم را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودار بالا مشاهده می‌شود از زمان آزمایش ۱۰ تا ۲۰ دقیقه بازده حذف ۱۰ درصد و از زمان ۲۰ تا ۳۰ دقیقه بازده حذف تنها ۳ درصد افزایش یافته است. همچنین، با افزایش زمان آزمایش میزان جذب افزایش می‌یابد، اما از سرعت افزایش جذب کاسته می‌شود و نتایج اختلاف چشمگیری ندارند. از این رو بهترین زمان آزمایش برای کارایی بهتر فرایند جذب، زمان ۳۰ دقیقه است.

نتایج آزمایش بر ایزوترم فروندلیچ را نشان داده است.

۷.۳. ایزوترم لانگمیر

ایزوترم لانگمیر با فرض جذب تک‌لایه در سطح همگن و با تعداد محدودی از نواحی جذب در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که سطح جاذب اشباع شود جذب بیشتری صورت نخواهد گرفت. هنگامی که یک ناحیه پر می‌شود هیچ جذب بیشتری نمی‌تواند در این ناحیه جایگزین شود. به این ترتیب در نهایت سطح به نقطه اشباع خواهد رسید، جایی که بیشترین جذب سطح به دست خواهد آمد (Saxena, 2001). شکل ۶ میزان انطباق نتایج آزمایش بر ایزوترم لانگمیر را نشان داده است.

منحنی فروندلیچ و لانگمیر رسم شده در بالا نشان می‌دهد که مکانیزم جذب کادمیوم از طریق نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، بیشتر از نمودار لانگمیر پیروی می‌کند. زیرا هرچه رگسیون تابع مورد نظر به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده آن است که مکانیسم جذب از مدل مزبور پیروی می‌کند.

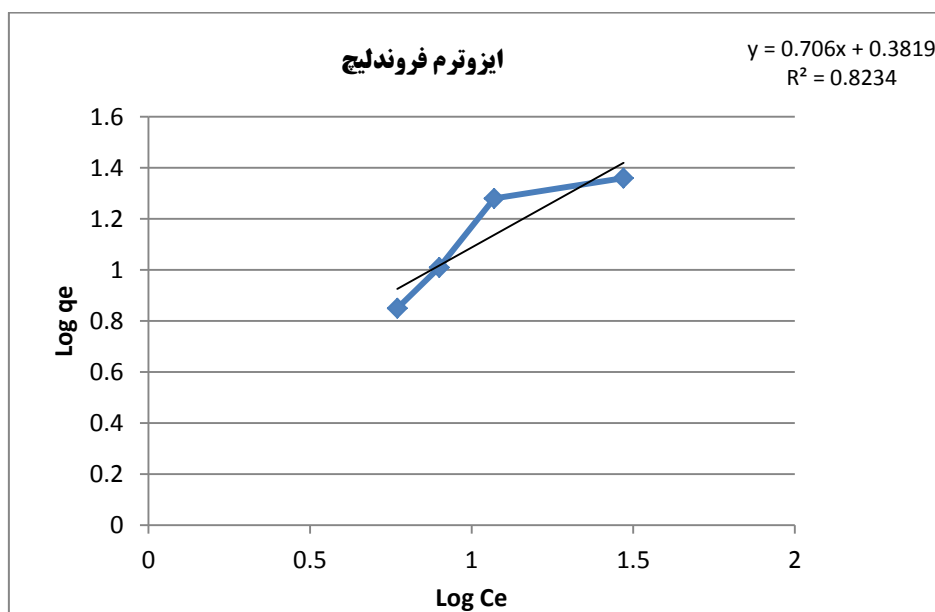
همان‌طور که در نمودار بالا مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت محلول، بازده حذف کاهش می‌یابد. به طوری که بیشترین میزان جذب در محلول با غلظت ۵ و ۱۵ mg/L اتفاق می‌افتد که برابر با ۹۸ درصد حذف فلز کادمیوم و بازده حذف برای هر دو نمونه برابر بوده است.

۵.۳. ایزوترم‌های جذب

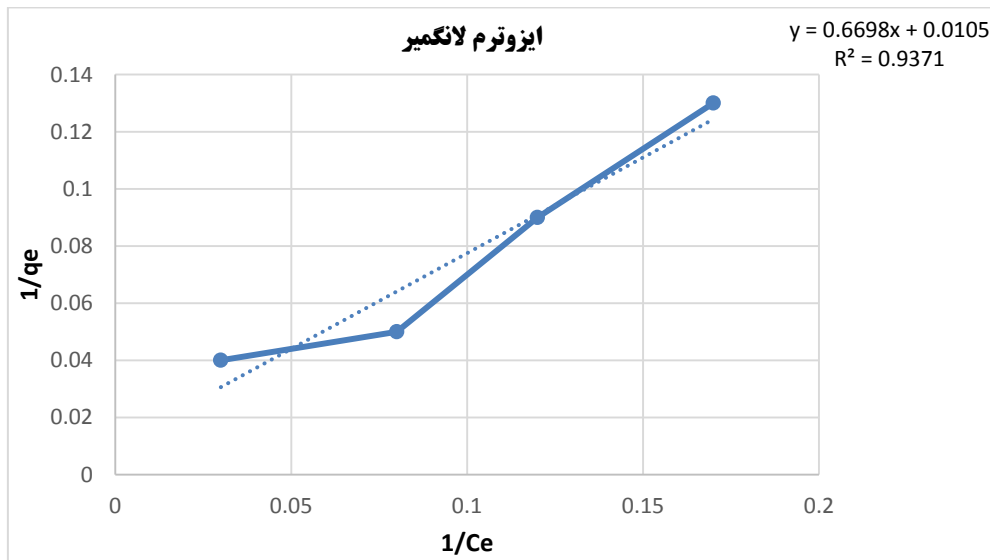
داده‌های جذب با استفاده از چند رابطه که توزیع یون فلز بین فاز مایع و جامد را نشان می‌دهد تفسیر می‌شوند. استفاده از یک مدل، تنها به کفایت بین گرایش‌های مشاهده‌شده تجربی و شکل قوانین ریاضی مرتبط با این مدل‌ها متکی است. در این میان مدل‌های جذب فروندلیچ و لانگمیر به طور معمول برای تناسب داده‌های تجربی، هنگامی که جذب املاح با یک جاذب چند لایه اتفاق می‌افتد، استفاده می‌شوند (Benguella, 2000).

۶.۳. ایزوترم فروندلیچ

ایزوترم فروندلیچ برای هر دو جذب به صورت چند لایه مناسب است و بر پایه این فرض که جاذب در سطح ناهمگن جذب می‌کند، استوار است. شکل ۵ میزان انطباق



شکل ۵. ایزوترم فروندلیچ



شکل ۶. ایزوترم لانگمویر

طریق فرایند جذب کنترل می‌شود و این مقدار در pH بزرگ‌تر از ۷ به طور قابل توجهی با رسوب هیدروکسید کادمیوم افزایش می‌یابد. در تحقیق انجام‌شده از سوی ال‌وی و همکارانش در زمینه حذف کروم شش با نانوذرات آهن، مشخص شد که افزایش pH موجب کاهش بازده حذف فلز سنگین می‌شود. با افزایش pH به بالاتر از ۷، بازده حذف کاهش می‌یابد و بهترین pH، $pH \leq 7$ اتفاق می‌افتد (Xiaoshu, et al., 2012).

در زمان آزمایش ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه بازده حذف افزایش، اما سرعت جذب کاهش می‌یابد به طوری که میزان جذب در ۳۰ و ۴۵ دقیقه ثابت است. بنابراین، ۳۰ دقیقه به‌منزله زمان بهینه در نظر گرفته شد. در تحقیق ال‌کودامی و همکارانش در زمینه حذف کادمیوم و سرب با نانوذرات آهن مشخص شده است که بهترین میزان حذف کادمیوم از طریق نانوذرات آهن در ۲۰ دقیقه اولیه تماس حاصل می‌شود. این امر ممکن است در اثر انباشتگی سریع نانوذرات که موجب کاهش سطح فعال و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب شود، اتفاق بیافتد (Alqudami, et al., 2012).

بیشترین میزان جذب با در نظر گرفتن تمامی شرایط بهینه در محلول ۵ میلی‌گرم در لیتر اتفاق افتاد. در تحقیق بهرامی و همکارانش در زمینه حذف کادمیوم از محلول آبی

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق انجام‌شده مشخص شد که نانوذرات آهن به‌منزله جاذب مناسب در کاهش کادمیوم است. افزایش میزان نانوذرات موجب افزایش میزان جذب است که میزان بهینه آن ۰/۵ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر حجم محلول به دست آمد. در تحقیق بهرامی و همکارانش در زمینه حذف کادمیوم از محلول آبی از طریق نانوذرات مگنتیک، مشخص شده است که با افزایش میزان جاذب بازده حذف نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار جاذب، جایگاه‌های جذب قابل دسترسی برای فلز کادمیوم افزایش می‌یابد و جذب بهتری صورت می‌گیرد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲).

با افزایش pH از مقدار ۳ تا ۹ بازده حذف کادمیوم افزایش می‌یابد، اما همان‌طور که در نمودار مشخص است سرعت افزایش این بازده در pH بین ۷ تا ۹ بسیار ناچیز و بازده حذف تنها ۱۰ درصد افزایش یافته است. همچنین، رسوب‌دهی نقش بسزایی در حذف یون‌های کادمیوم در بازه قلیایی ایفا می‌کند. از سوی دیگر، احتمال رسوب‌دهی هیدروکسیدی فلزی در حفره‌ها و فضاهای اطراف ذرات بسیار کم است، زیرا فرایند جذب سریع‌تر از فرایند رسوب‌دهی است. بنابراین، می‌توان گفت که حذف کادمیوم در مقادیر pH حدوداً کمتر از ۷ به طور غالب از

به دلیل اشباع‌بودن مکان‌های جذبی از طریق ماده جذب‌شونده، در غلظت‌های بالا بازده جذب کاهش یافته است.

یادداشت‌ها

1. World Health Organization (WHO)
2. Mothrohm
3. Hatch
4. Power Sonic 240

از طریق نانوذرات مگنتیک مشخص شده است که با افزایش غلظت محلول بازده حذف نیز کاهش می‌یابد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲). در غلظت پایین کادمیوم سطح ویژه و مکان‌های جذب جاذب بیشتر است و یون‌های کادمیوم قادرند با موقعیت‌های جذب موجود بر سطح جاذب برهم‌کنش داشته باشند و لذا بازده جذب بیشتر است. با افزایش غلظت اولیه هرچند مقدار وزنی جذب افزایش یافته، اما چون نسبت جاذب به محلول ثابت است

منابع

- بهرامی، م. برومندنسب، س. کشکولی، ح. فرخیان فیروزی، ا. بابایی، ع. ۱۳۹۲. حذف کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از نانوذرات مگنتیت اصلاح‌شده، مجله سلامت و محیط، دوره ۶، شماره ۲، ص ۲۲۱-۲۳۲.
- بهرامی، م. برومندنسب، س. کشکولی، ح. فرخیان فیروزی، ا. بابایی، ع. ۱۳۹۲. سنتز نانوذرات مگنتیت و بررسی کارایی آن در حذف کادمیوم از محلول آبی، مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۴، شماره ۸۷، ص ۵۴-۶۲.
- رحمانی، ع. غفاری، ح. صمدی، م. ضرابی، م. ۱۳۹۰. سنتز نانوذرات آهن و بررسی کارایی آن در حذف آرسنیک از محیط‌های آبی، مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۲، شماره ۷۷، ص ۳۵-۴۱.
- سمیعی، ع. ۱۳۸۴. بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرایند جذب و بازیافت سیانید از آب سد باطله کارخانه فرآوری طلای آق‌دره تکاب بر روی کربن فعال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- کوهپایه‌زاده، ح. ترابیان، ع. نبی بیدهدندی، غ. حبشی، ن. ۱۳۹۱. تأثیر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بر حذف آرسنیک پنج ظرفیتی از آب آشامیدنی، مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۳، شماره ۸۳، ص ۶۰-۶۷.
- Alqudami, A., Alhemiari N. A., Munassar, S. 2012. Removal of Pb(II) and Cd(II) Ions from Water by Fe and Ag Nanoparticles Prepared Using Electro-Exploding Wire Technique, Environ Sci Pollut Res, 19:2832-2841.
- Benguella, B. 2000. Cadmium Removal from Aqueous Solutions by Chitin, Water Research 36:2463-2474.
- Boparai, H. K., Joseph, M., O'Carroll, D. M. 2011. Kinetics and Thermodynamics of Cadmium Ion Removal by Adsorption onto Nano Zerovalent Iron Particles, Journal of Hazardous Materials, 186(1):458-65.
- Dhermendra, K. T. 2008. Application of Nanoparticles in Waste Water Treatment. World Applied Sciences Journal 3 (3): 417-433.
- Saxena, S., Prasad, M., Amritphale, S. S., Chandra, N. 2001. Adsorption of Cyanide from Aqueous Solutions at Pyrophyllite Surface. Separation and Purification Technology 24: 263-270.
- Seol, A. K., Seralathan, K. K., Kui, J. L., Yool, J. P., Patrick, J., Leed, W., Kimd, H. 2013. Removal of Pb(II) from Aqueous Solution By a Zeolite-Nanoscale Zero-Valent Iron Composite. Chemical Engineering Journal 217: 54-60.
- Shafaei, A., Ashtiani, F. Z., Kaghazchi, T. 2007. Equilibrium Studies of the Sorption of Hg (II) Ions onto Chitosan. Chemical Engineering Journal. 133(1-3):311-16.
- Xiaoshu, L. V., Jiang, X., Guangming, J., Jie, T., Xinhua, Xu. 2012. Highly Active Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI)-Fe₃O₄ Nanocomposites for the Removal of Chromium(VI) from Aqueous Solutions. Journal of Colloid and Interface Science 369: 460-469.
- Yunfei, X. M. 2010. Reduction and Adsorption of Pb²⁺ in Aqueous Solution by Nano-Zero-Valent Iron-A SEM, TEM and XPS study. Materials Research Bulletin 45:1361-1367.
- Zhang, Z., Li, M., Chen, W., Zhu, S., Liu, N., Zhu, L. 2010. Immobilization of Lead and Cadmium from Aqueous Solution and Contaminated Sediment Using Nano-Hydroxyapatite. Environmental Pollution. 158(2):514-19.