

## مقاله پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان

دوره ۱۸، اسفند ۱۳۹۸، ۱۲۶۹-۱۲۵۳

# مطالعه اثر استفاده از نانو ذره اکسید آهن در حذف فلز کادمیوم از محیط‌های آبی: یک مطالعه آزمایشگاهی

نجلا حمیدیان فر<sup>۱</sup>، محمد هادی ابوالحسینی<sup>۲</sup>، میترا عطاآبادی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۲۲ ارسال مقاله به نویسنده جهت اصلاح: ۹۷/۱۲/۲۰ دریافت اصلاحیه از نویسنده: ۹۸/۶/۲۷ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۳۰

### چکیده

**زمینه و هدف:** کادمیوم یکی از فلزات سنگین است، که دارای سمیت بالا و خاصیت تجمع پذیری بالا در بافت زنده است. هدف از انجام این پژوهش تعیین کارایی نانوذره اکسید آهن در جذب کادمیوم از محیط‌های آبی بود.

**مواد و روش:** این مطالعه آزمایشگاهی در تابستان سال ۱۳۹۷ انجام شد. برای تعیین خصوصیات جاذب (XRD (X-ray powder diffraction) و SEM (Scanning electron microscope) و برای بررسی گروه‌های عملکردی جاذب از آنالیز FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy) استفاده شد. فاکتورهای مختلف از قبیل pH، غلظت کادمیوم، زمان تماس و مقدار جاذب در حذف کادمیوم بررسی شد. ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ برای توصیف داده‌های جذب استفاده شدند. جهت پردازش داده‌های حاصل از طرح بلوک کاملاً تصادفی استفاده شد.

**یافته‌ها:** میزان جذب بعد از ۲۰ دقیقه به صورت ثابت در آمد (۰/۰۳۲، ۶۱٪،  $P=0/032$ ). بیشترین میزان جذب در  $pH=7$  حاصل شد (۰/۰۴۳، ۹۹٪،  $P=0/043$ ) و کمترین مقدار جذب با اختلاف معنی‌داری در  $pH=3$  دیده شد (۰/۰۴۸، ۶۸٪،  $P=0/048$ ). میزان جذب فلز با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایرین در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین و در غلظت ۹۰ میلی‌گرم در لیتر کمترین بود (۹۷ درصد و ۷۰/۵ درصد) ( $P=0/039$ ). در ارتباط با تأثیر مقدار جاذب اکسید آهن بیشترین جذب در ۲ گرم در لیتر و کمترین درصد جذب در ۰/۵ گرم در لیتر با اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (۹۷/۹۶ درصد و ۷۵ درصد) ( $P=0/047$ ). جذب کادمیوم توسط اکسید آهن با مدل لانگمویر مطابقت داشت ( $R^2=0/4888$ ).

**نتیجه‌گیری:** با توجه به نتایج پیشنهاد می‌شود از پوشش نانوذرات برای افزایش راندمان جذب کادمیوم استفاده کرد و می‌توان آن را به عنوان روش مؤثری در حذف کادمیوم برشمرد.

**واژه‌های کلیدی:** نانو ذره اکسید آهن، کادمیوم، جذب، ایزوترم

۱- کارشناس ارشد محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲- (نویسنده مسئول) استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان (خوراسگان)، اصفهان،

ایران. تلفن: ۰۹۱۳۱۷۰۵۰۳۳، دورنگار: ۰۳۱-۳۵۳۵۴۱۱۷، پست الکترونیکی: hadi.mha2001@yahoo.com

۳- استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه خاکشناسی، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

## مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش مصرف آب باعث کاهش منابع آب شده است. تخلیه انواع فاضلاب‌های خانگی، فضولات حیوانی، پساب‌های صنعتی، زهکش‌های کشاورزی سهم عمده‌ای در آلودگی منابع آبی دارد. محدودیت منابع آبی، کمبود بارندگی، خطر بحران آب در کشور و اهمیت بازیابی مجدد آب از یک سو و افزایش آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی به وسیله فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها از سوی دیگر، یافتن راه‌حل‌های زیست محیطی را در جهت حذف این مواد از منابع آبی ضروری می‌سازد. در بین آلاینده‌های منابع آب، فلزات سنگین به دلیل سمی بودن این عناصر توجه محققان را به خود جلب کرده است [۱].

کادمیوم از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی، تولید فلز، آبکاری، ساخت باطری، کودهای شیمیایی فسفات و رنگدانه‌ها وارد محیط زیست می‌گردد. حد مجاز استاندارد کادمیوم برای تخلیه پساب صنایع در آب‌های سطحی برابر ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار تخلیه به چاه جاذب برابر ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر و برای مصارف کشاورزی و آبیاری حدود ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. حد مجاز بین المللی از نظر سازمان جهانی بهداشت برابر ۰/۳ میکروگرم برلیتر و طبق استاندارد USEPA (United States Environmental Protection Agency) برابر ۵ میکروگرم بر لیتر می‌باشد [۲].

کادمیوم که از منابع گوناگون به زیست بوم، پیکره گیاه و زنجیره غذایی انسان‌ها و حیوانات راه می‌یابد و خسارت‌های

جدی به بار می‌آورد [۳]. عنصر سنگین کادمیوم منجر به بیماری‌های بسیاری نظیر فشار خون، آسیب‌های کلیوی، دیابت، ناهنجاری‌های اسکلتی و اختلالات قلبی و عروقی می‌شود، بنابراین حذف این فلز از محیط زیست اهمیت ویژه‌ای دارد [۴].

بسیاری از روش‌های تصفیه شامل جذب سطحی، رسوب سازی، فیلتر کردن (فیلتر کردن بیولوژیکی و یا فیزیکی)، الکترودیالیز، جداسازی غشایی، انعقاد و اکسیداسیون برای تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. شیوه‌های سنتی مانند، رسوب شیمیایی و الکتروشیمیایی برای صنایع کوچک و متوسط مقیاس به لحاظ اقتصادی عملی نیستند، زیرا علاوه بر بالا بودن هزینه‌های این روش‌ها، مقادیر عظیمی از لجن شیمیایی سمی را نیز تولید می‌نمایند [۶]. جذب سطحی یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای برداشت فلزات سنگین از فاضلاب است و دارای کارایی بالایی می‌باشد [۷].

در طول چند دهه گذشته فناوری نانو با توجه به خواص فیزیک و شیمیایی منحصر به فرد به عنوان یک بخش اقتصادی مبتنی بر دانش به سرعت در حال رشد است. نانو تکنولوژی دستکاری عمدی مواد در اندازه کمتر از ۱۰۰ نانو است [۸].

از میان نانو ذرات مغناطیسی، نانو ذرات اکسید آهن به علت سهولت ساخت، امکان عامل‌دار کردن و پوشش‌دار کردن این نانو ذرات و نیز در مواردی دارا بودن خواص ابرمغناطیس نسبت به حالت توده، مسیری مناسب را برای فناوری

۵۰۰ میلی‌لیتری استفاده شد. با در نظر گرفتن ۴ تیمار ۱- جذب وابسته به pH ۲- جذب وابسته به غلظت اولیه فلز ۳- جذب وابسته به زمان تماس ۴- جذب وابسته به مقدار جاذب، پژوهش طی گام‌های زیر انجام شد.

در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن با روش هم‌رسوبی تهیه شد. برای تهیه نانو ذرات از کلرید آهن (II) چهار آبه ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) با خلوص ۹۹٪، کلرید آهن (III) شش آبه ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) با خلوص ۹۹٪ و هیدروکسید سدیم (NaOH) با خلوص ۹۷٪ و آب یون زدایی شده استفاده شد [۱۱].

ابتدا مقدار مناسبی از نمک‌های آهن (II) و (III) به آب یون زدایی شده اضافه شد، سپس سورفکتانت سدیم اولفات به محلول اضافه شد. ۱۲ میلی‌لیتر از محلول نمک‌ها را به صورت قطره قطره به ۱۲۰ میلی‌لیتر محلول سدیم هیدروکسید تحت اتمسفر نیتروژن اضافه شد. سپس محلول ابتدا از زرد به نارنجی و سپس به قهوه‌ای تا سیاه تغییر رنگ داد. محلول به دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه به وسیله هموژنایزر مدل D 500 ساخت Dragon lab چین با سرعت ۱۰۰۰۰ دور دقیقه هم‌زده شد، پس از مدت زمان ۲ ساعت رسوب حاصل شستشو داده شد و در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک و آسیاب شد. تمامی مواد آزمایشگاهی مورد استفاده ساخت شرکت مرک آلمان بودند [۱۱].

ویژگی‌های ساختاری نانو ذرات اکسید آهن با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) و (FTIR) در محدوده طول موج 400-4000 nm تعیین شد [۱۲]. برای تعیین ساختار

جداسازی مغناطیس آلاینده‌ها فراهم می‌آورد [۹]. نانو ذرات اکسید آهن موقعیت و اهمیت بالایی دارند. به دلیل این که به راحتی از محلول در یک میدان مغناطیسی برای بازیابی و استفاده مجدد جدا می‌شوند و در کاهش هزینه‌ها مؤثر هستند. نتایج نشان داده‌اند که نانو ذرات اکسید آهن جاذبی بسیار مناسب برای حذف فلزات سنگین هستند [۱۰]. در همین راستا مطالعه‌های زیادی صورت گرفت که از جمله آن می‌توان به مطالعه‌ای که توسط Karimi و همکاران بر روی ارزیابی فرآیند جذب سطحی یون‌های کادمیوم از فاضلاب سنتتیک با نانو ذرات آهن مغناطیسی سنتز شده صورت گرفت [۲] و مطالعه‌ای که توسط Bahrami و همکاران نیز بر روی حذف کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از نانوذرات اصلاح شده مگنتیت صورت گرفت [۳]، اشاره کرد. لذا هدف از انجام این مطالعه تعیین امکان استفاده از نانو ذره اکسید آهن به عنوان جاذب در حذف فلز کادمیوم از محیط آبی طی فرآیند جذب سطحی بود.

## مواد و روش‌ها

این مطالعه از نوع آزمایشگاهی است که در تابستان سال ۱۳۹۷ در پژوهشکده پسماند و پساب دانشگاه آزاد اسلامی انجام شد در ضمن این مطالعه دارای کد اخلاق از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) با کد ثبتی IR.IAU.KHUISF.REC می‌باشد. در این پژوهش برای حذف فلز سنگین کادمیوم (II) از محلول استوک ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم از نمک  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  در بالون

نهایتاً درصد حذف کادمیوم و ایزوتروم‌های جذب برای تمام مراحل به ترتیب با استفاده از معادلات (۳-۱) و (۳-۲) محاسبه شد.

معادله (۱)

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

$C_0$  و  $C_e$  غلظت اولیه کادمیوم در محلول و غلظت کادمیوم

بعد از انجام آزمایش می‌باشند [۱۵].

معادله (۲)

$$Q_t = \frac{(C_i - C_t)}{M}$$

$Q_t$  = مقدار فلز جذب شده در واحد جرم جاذب،  $C_i$

غلظت اولیه فلز،  $C_t$  = غلظت ثانویه فلز در زمان  $t$ ،  $M$  = جرم

جاذب

$V$  = حجم محلول [۱۶].

معادله لانگمویر به صورت زیر است:

معادله (۳)

$$1 + kc(x/m) = Kcb/$$

$x/m$ : جرم جذب شونده در واحد جرم جاذب. همان  $q_e$ ،  $K$ .

: عدد ثابت مربوط به انرژی جذب،  $b$ : حداکثر مقدار جذب

شونده ای که می‌تواند جذب گردد (یک لایه مولکولی کامل)،

$C$ : غلظت تعادلی جذب شونده

فرم خطی معادله لانگمویر:

معادله (۴)

$$c/x/m = 1/kb + c/b$$

کریستالی نانو ذرات از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل PW1800 ساخت کارخانه PHILIPS کشور هلند و برای تعیین ساختار نانو ذره اکسید آهن، از دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریه (FTIR) مدل TENSOR 27 ساخت BRUKER OPTICS کشور آلمان و برای به دست آوردن نوع ساختار و اندازه نانو ذرات از تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل MIRA3 محصول شرکت TESCAN کشور جمهوری چک استفاده شد [۱۳].

مقادیر متغیرهای مختلف برای pH (۳، ۵، ۷ و ۹)، برای مقدار جاذب (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ گرم در لیتر)، برای زمان تماس (بازه‌های زمانی ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ دقیقه) و برای مقدار غلظت‌های مختلف کروم (غلظت‌های ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌گرم بر لیتر) بود و مقادیر پارامترهای ثابت برای pH=۳، برای مقدار جاذب ۱ گرم در لیتر، برای غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر و برای زمان ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. در تمامی مراحل نمونه‌ها، به مدت زمان مشخص شده در دور ۱۸۰ rpm به وسیله دستگاه شیکر مدل Gfl35 ساخت کشور آلمان مخلوط شدند. سپس از کاغذ صافی ۰/۴۵ میکرون PVDF واتمن انگلستان عبور داده شدند. غلظت باقی‌مانده فلز در محلول توسط دستگاه جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrophotometer) نوع PERKIN ELEMER مدل ۳۰۳۰ ساخت کشور آمریکا قرائت گردید. این کار با سه تکرار انجام شد [۱۴]. نهایتاً درصد حذف و ایزوتروم‌های جذب برای تمام مراحل به ترتیب با استفاده از معادلات (۱) و (۲) محاسبه شد [۱۵].

داخل شیکر (مدل Gfl35، ساخت کشور آلمان) با دور ۱۵۰ قرار داده شد و بعد از گذشت ۴۸ ساعت pH ثانویه آن‌ها اندازه گیری شد [۱۹].

داده‌های به دست آمده توسط نرم افزارهای Excel نسخه ۲۰۱۶ و SAS نسخه ۹/۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای رسم نمودارهای تأثیر pH، مقدار جاذب، غلظت و زمان تماس بر جذب کل کادمیوم از محلول ساختگی از نرم‌افزارهای Excel نسخه ۲۰۱۶ و جهت پردازش داده‌های حاصل در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی در نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ استفاده شد. سپس ایزوترم لانگمویر و فروندویچ فلز سنگین کادمیوم از محلول ساختگی توسط مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ مورد بررسی قرار گرفت. سطح معنی‌داری در آزمون‌ها ۰/۰۵ بود.

### نتایج

تحقیق حاضر با هدف تعیین جذب کادمیوم با استفاده از نانو ذره اکسید آهن سنتز شده از محلول آبی صورت گرفت. نتایج این تحقیق در بخش‌های زیر ارائه شد. برای تعیین ویژگی‌های جاذب مورد آزمایش از دستگاه پراش اشعه ایکس استفاده شد (شکل ۱). نتایج نشان داد که این جاذب به صورت غیرمتبلور بود.

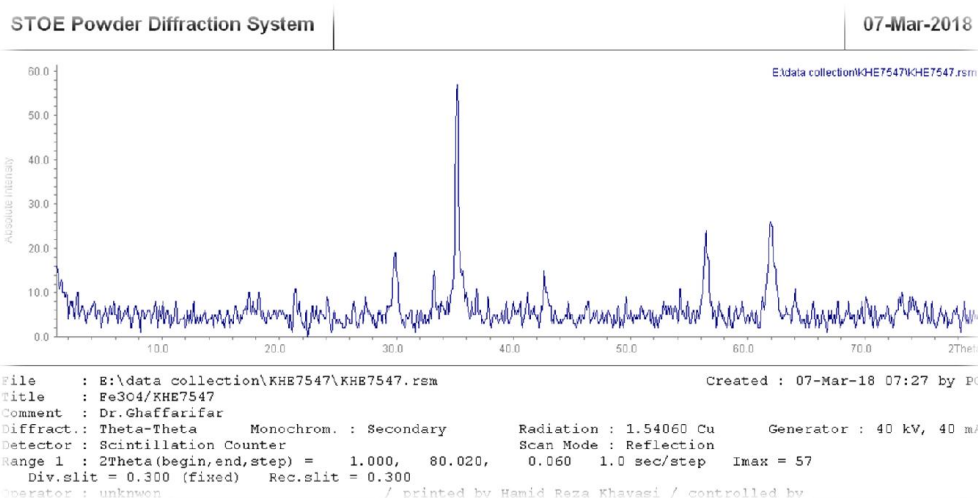
ماهیت مناسب جذب و خصوصیات ویژه هم دمای جذب لانگمویر را می‌توان به کمک یک ثابت بدون واحد به نام فاکتور جداسازی (separation factor) یا پارامتر تعادلی (equilibrium parameter) که در سال ۱۹۶۶ توسط Hall و همکاران معرفی شد، تشریح نمود [۱۷].

معادله (۵)

$$R_L = 1 / (1 + bC_0)$$

$R_L = b$  = ثابت لانگمویر،  $C_0$  = غلظت اولیه جذب شونده در محلول (میلی‌گرم بر لیتر) اگر مقدار  $R_L$  برابر صفر شود، نشان دهنده جذب غیر قابل برگشت،  $R_L > 0$  بیان‌گر جذب مطلوب،  $R_L = 1$  بیان‌گر جذب خطی و  $R_L < 1$  بیان‌گر جذب نامطلوب است [۱۸].

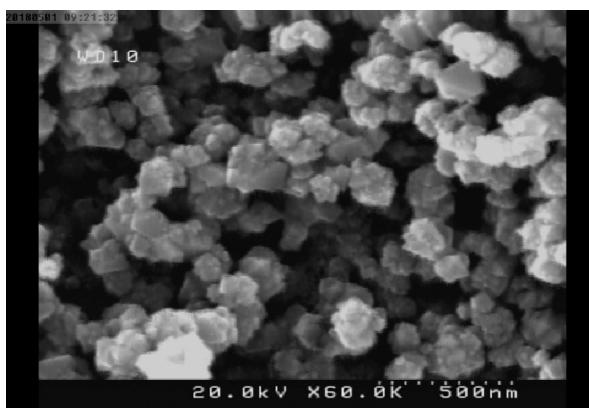
یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر در ساختار جاذب، تعیین نقطه بار صفر ( $pH_{ZPC}$ ) جاذب است. برای این منظور تغییرات pH جاذب در محلول‌هایی با pH برابر ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳ بررسی شد. برای هر آزمایش مقدار ۰/۲ گرم از جاذب به محلول‌های ۲۰ میلی‌لیتری سدیم کلرید ۰/۰۱ مولار با pHهای اولیه ذکر شده افزوده شد. جهت تنظیم pH از محلول‌های ۰/۱ نرمال HCl و NaOH استفاده گردید. نمونه‌ها



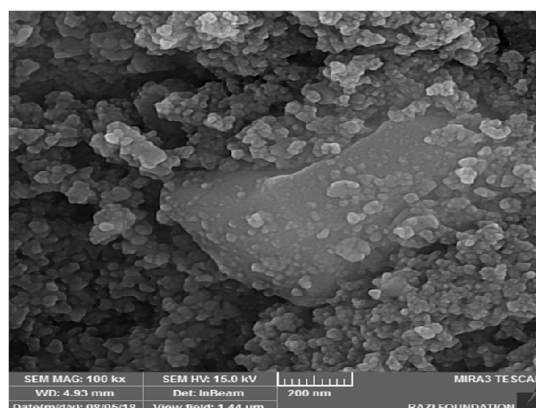
شکل ۱- نمودار حاصل از پراش پرتو ایکس به جاذب مورد آزمایش

جاذب بعد از جذب را نشان داد (هر دو تصویر با بزرگ‌نمایی یکسان ۵۰۰ x بود).

شکل (۲) تصاویر SEM تهیه شده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی تصاویر رویشی از جاذب اکسید آهن و



الف



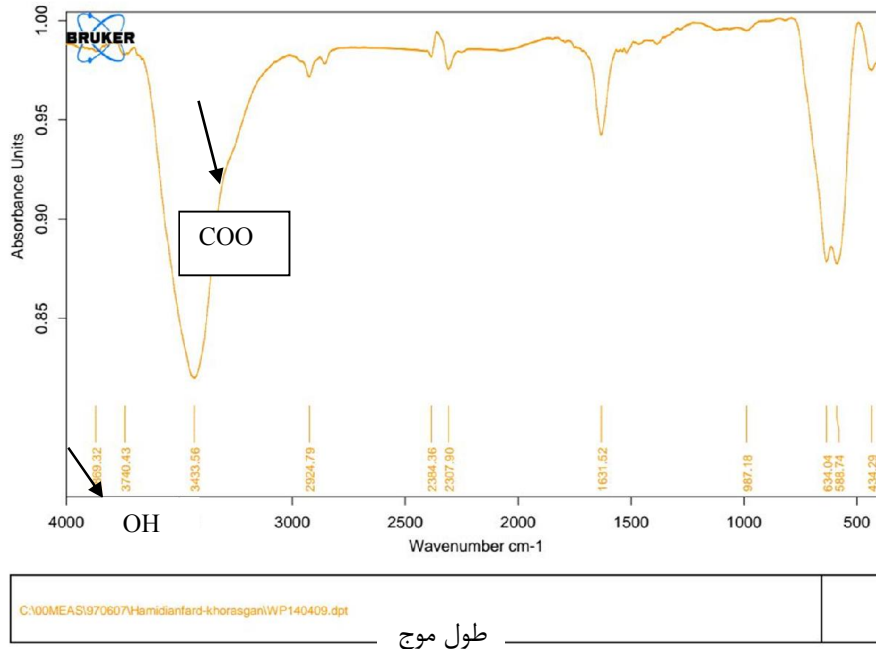
ب

شکل ۲- تصاویر SEM تهیه شده از جاذب (الف) جاذب قبل از جذب کادمیوم، (ب) جاذب بعد از جذب کادمیوم

یک ماده بر طیف ماده دیگر بیان گر یکسان بودن ترکیب آن دو ماده بود [۱۸]. نتایج آنالیز FTIR در شکل (۳) نشان داده شد.

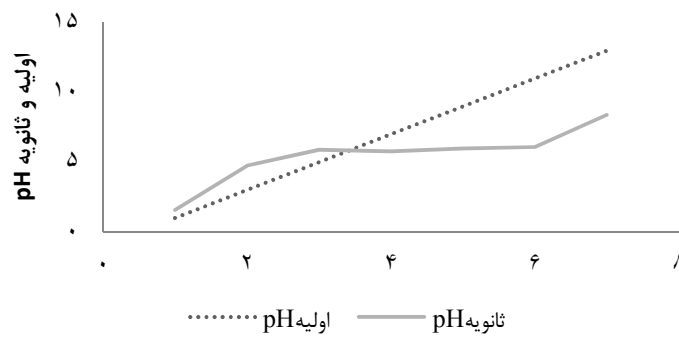
تغییر محل و شکل باندهای طیف FTIR همراه با تغییرات محیط مولکولی می‌تواند راهنمای مناسبی راجع به ساختمان مولکولی یک ترکیب باشد و انطباق کامل تمام پیک‌های طیف

واحد جذب



شکل ۳- طیف سنجی FTIR نانو ذره اکسید آهن

pH نقطه صفر الکتریکی (pH<sub>ZPC</sub>) جاذب مقدار ۵/۳ بود. به مقدار اولیه pH را نشان داده شده است (شکل ۱) نمودار تغییرات pH بعد از گذشت مدت زمان ۴۸ ساعت نسبت



نمودار ۱- نمودار تغییرات pH بعد از گذشت مدت زمان ۲۴ ساعت نسبت به مقدار اولیه pH

۱۲۶۰ مطالعه اثر استفاده از نانو ذره اکسید آهن در حذف فلز کادمیوم...

طبق جدول (۱) در میزان جذب کادمیوم توسط اکسید آهن از pH=۷ به بعد اختلاف معنی داری دیده نشد و کمترین مقدار آن با اختلاف معنی داری در pH=۳ دیده شد ( $p < 0/05$ ).

جدول ۱- مقایسه میانگین درصد جذب  $Fe_3O_4$  در pHهای مختلف

pH	۳	۵	۷	۹
درصد جذب	۶۸/۰۰ ± ۷/۰۷۱	۹۲/۵ ± ۰/۷۰۷	۹۹/۰۰ ± ۰	۹۹/۰۰ ± ۰

طبق جدول ۲ میزان جذب اکسید آهن در ۱/۵ و ۲ گرم در لیتر با اختلاف معنی داری بیش تر از دیگر مقدارهای این جذب بود و کمترین مقدار آن با اختلاف معنی داری در ۰/۵ گرم در لیتر دیده شد ( $P < 0/05$ ).

جدول ۲- مقایسه میانگین درصد جذب جاذب در مقدارهای مختلف جاذب

مقدار جاذب	۰/۵	۱	۱/۵	۲
درصد جذب	۷۵ ± ۲/۷۵	۸۳/۸۶ ± ۱/۳۷	۹۳/۸۹ ± ۱/۱۹	۹۶/۹۷ ± ۰/۲۶

طبق جدول (۳) در میزان جذب کادمیوم بین زمانهای مختلف اختلاف معنی داری دیده نشد و بعد از زمان ۲۰ دقیقه

جدول ۳- جدول مقایسه میانگین درصد جذب کادمیوم در زمانهای مختلف

زمان تماس	۱۰	۲۰	۴۰	۸۰
میانگین درصد جذب	۶۱/۰۰ ± ۰	۶۱/۰۰ ± ۰	۶۱/۰۰ ± ۰	۵۴/۰۰ ± ۰

طبق جدول (۴) میزان جذب کادمیوم در ۲۰ میلی گرم بر لیتر با اختلاف معنی داری بیش تر از دیگر غلظت ها بود و کمترین مقدار آن با اختلاف معنی داری در ۹۰ میلی گرم در لیتر دیده شد ( $P = 0/046$ ).

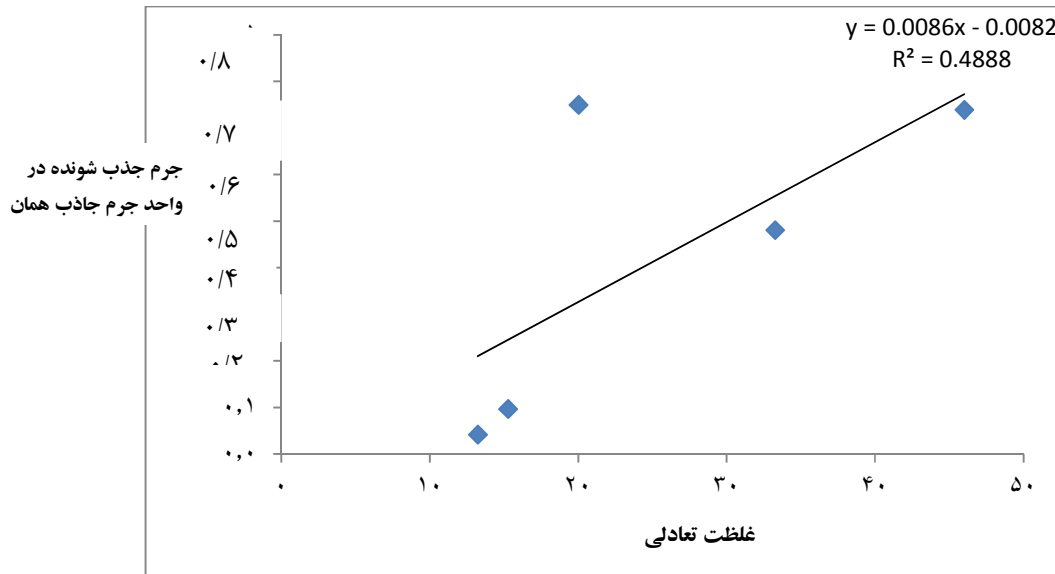
جدول ۴- جدول مقایسه میانگین درصد جذب اکسید آهن در غلظت های مختلف

غلظت آلودگی	۲۰	۳۰	۵۰	۷۰	۹۰
درصد جذب	۹۷/۰۰ ± ۰	۹۲/۵ ± ۳۰/۵۳	۷۰/۰۰ ± ۲/۸۲	۷۶/۰۰ ± ۵/۶۵	۷۰/۵۰ ± ۳/۵۳

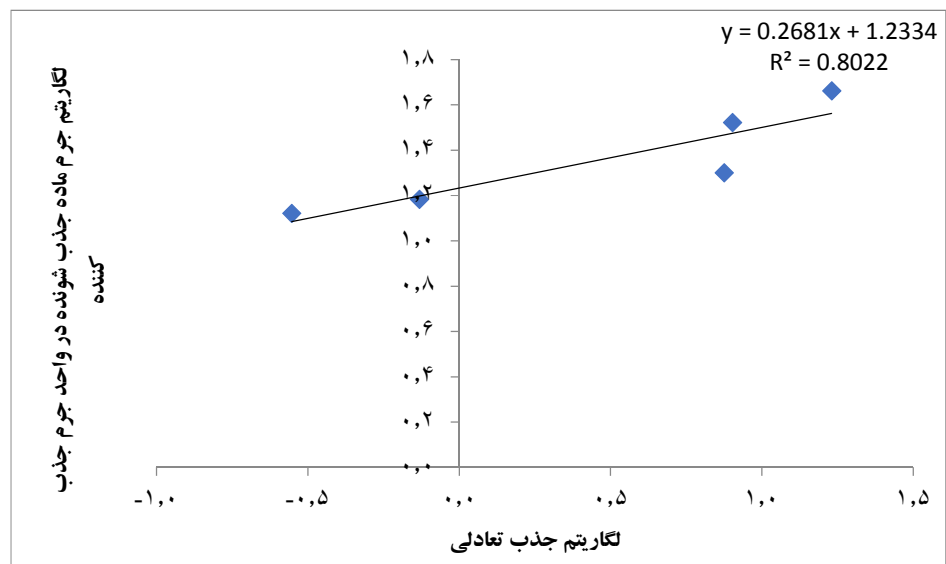
به منظور برآزش مدل های جذبی بر روی هم دماهای جذب باید به این نکته اشاره کرد که این هم دماها در اصل جذب سطحی مواد حل شونده بر روی مواد جامد را در دمای ثابت تعادلی جذب شونده بودند [۱۹]. به این منظور برآزش نتایج بر اساس واحدهای کمی توصیف کردند. هم دماهای جذب سطحی نشان دهنده مقدار جذب به عنوان تابعی از غلظت تعادلی جذب شونده بودند [۱۹]. به این منظور برآزش نتایج



به دست آمده با مدل های جذبی لانگمویر و فروندلیچ برای فلز کادمیوم در نمودارهای ۲ و ۳ نشان داده شد. پارامترهای این مدل ها در جدول ۵ ارائه شد.



نمودار ۲- هم دمای جذبی لانگمویر جذب کادمیوم به وسیله اکسید آهن



نمودار ۳- هم‌دمای جذبی فروندلیچ جذب کادمیوم به وسیله اکسید آهن

پس از مقایسه ضرایب تبیین هم‌دمای خطی در جذب سطحی، مدل لانگمویر به خاطر  $R^2$  بالاتر برای فلز کادمیوم انتخاب شد. جذب کادمیوم به وسیله اکسید آهن از مدل لانگمویر به علت داشتن  $R^2$  بالاتر (میزان ۰/۴۸۸۸)، تبعیت کرد. ضریب  $K_f$  نیز که معیاری از قدرت جذب می‌باشد که برابر ۱۷/۱۱۵ لیتر بر گرم بود.

جدول ۵- ثابت‌های هم‌حرارت‌های جذبی لانگمویر، فروندلیچ برای جذب اکسید آهن

مقدار	ضریب	مدل
۱۷/۱۱۵	$k_f$ (L/g)	فروندلیچ $\text{Log } q_e = \text{Log } k_f + 1/n \text{ Log } C_e$
۰/۲۶۸۱	1/n	
۰/۸۰۲۲	$R^2$	
۱/۰۴۸	$K_L$ (L/mg)	لانگمویر $c/x/m = 1/kb + c/b$
۱۱۶/۲۷	B ( $\mu\text{g/g}$ )	
۰/۴۸۸۸	$R^2$	
۰/۰۲۹	$R_L$	

بحث

داشت، چرا که مکان‌های فعال زیاد و خالی در سطح جذب، با گذشت زمان اشغال شد و به همین علت روند افزایش جذب در زمان‌های اولیه بیش‌تر و در زمان‌های نهایی به علت کاهش ظرفیت جذب، میزان جذب کم‌تر بود. در تحقیقی انجام شده توسط Karimi و همکاران حذف مواد آلی طبیعی توسط نانو ذره اکسید آهن پوشش داده شده با سلیس تا زمان ۹۰ دقیقه افزایش و پس از آن میزان حذف ثابت شد [۲۰]. در مطالعه‌ای که توسط Salehnia و همکاران بر روی حذف یون مس (II) با استفاده از کربن فعال مغناطیسی شده با نانو ذرات اکسید آهن انجام شد، بیش‌ترین میزان جذب در زمان ۲ ساعت به میزان ۹۵٪ بود [۲۱].

نتایج حاصل از باندهای جذبی طیف سنجی FTIR نانو ذره اکسید آهن نشان داد که در طیف FTIR نمونه‌ها چند پیک جذبی مربوط به گروه OH ظاهر شد. در نمونه مگنتیک سنتز شده، در محدود  $3433/56 \text{ cm}^{-1}$  یک پیک مشاهده می‌شود که دلیل آن جذب  $\text{OH}^-$  توسط  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  است. پیک ظاهر شده در  $589/04 \text{ cm}^{-1}$  به پیوند ارتعاشی Fe-O در  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  نسبت داده می‌شود. هم‌چنین نتایج حاصل از آنالیز XRD نشان دهنده غیرمتبلور بودن جذب بود.

طبق آزمایشات و تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته، جذب کادمیوم با استفاده از اکسید آهن در  $\text{pH}=7$  به بعد اختلاف معنی‌داری دیده نشد. یکی از پارامترهای مهم در فرآیند

نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که جذب کادمیوم توسط نانو ذرات اکسید آهن سریع بوده و در همان ۲۰ دقیقه اول اتفاق افتاد و افزایش زمان تماس در افزایش میزان جذب تأثیر زیادی نداشت. مطالعات انجام شده در این راستا نشان داد که با افزایش زمان تماس در ابتدا میزان حذف سیر صعودی

جذب pH اولیه محلول بود. افزایش pH سبب افزایش بارهای منفی روی سطح جاذب شد و منجر به تشدید نیروهای الکتروستاتیکی در فرآیند جذب و در نتیجه حذف بیش‌تر یون‌های فلزی شد [۲۲]. در مطالعه‌ای انجام شده توسط Rozaini و همکاران تاثیر pH در دامنه ۱۰-۲ برای حذف نیکل مورد بررسی قرار گرفت و به نتیجه رسیدند که افزایش pH سبب افزایش جذب شد در ادامه تا pH=۷ شیب نمودار جذب ثابت شد و افزایش pH تأثیری بر میزان جذب نداشت. در مطالعه‌ای که از نانو ذرات اکسید آهن برای حذف مواد آلی از محیط آبی استفاده شد، نتایج نشان داد که pH ۱۰ تا ۱۱ محدوده مناسب برای عملکرد بهتر بود. در تحقیقی تأثیر pH بر راندمان جذب کادمیوم توسط نانوکامپوزیت نیکل فریت-اکسید تیتانیوم نشان داد با افزایش pH محلول، روند جذب کادمیوم توسط جاذب افزایش پیدا کرد. بیش‌ترین میزان جذب در pH=۶ اتفاق افتاد [۲۳].

با افزایش میزان دز جاذب، درصد حذف فلز کادمیوم افزایش یافت، علت این امر افزایش مکان‌های در دسترس برای جذب فلزات بود که با افزایش مقدار جاذب صورت گرفت [۲۵-۲۴]. Meng و همکاران در پژوهشی به منظور جذب سرب با استفاده از ذرات دی اکسید منگنز آب‌دار انجام شد، به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان جاذب درصد حذف افزایش یافت. هم‌چنین نتایج مشابهی برای فلز کروم به دست آمد. به طوری که با افزایش مقدار جاذب از ۰/۱ به ۲۰ گرم در لیتر، راندمان جذب از ۱۳/۱۸٪ به ۶۲/۰۸٪ افزایش یافت [۲۶]. Azari و همکاران در مطالعه خود بر روی جذب کروم (VI) از

محیط‌های آبی توسط کربن فعال مغناطیسی شده با نانو ذرات آهن صفر (CMFeO) انجام شد به نتیجه مشابهی رسیدند که با افزایش میزان جاذب از ۰/۱ به ۲ گرم در لیتر کارایی جذب کروم از ۶۰/۷۱ به ۵۶/۹۱ درصد افزایش یافت [۲۷]. در مطالعه‌ای که توسط DivbandHafshejani و همکاران بر روی سینتیک و الگوهای هم دمای جذب کروم شش ظرفیتی از محیط‌های آبی توسط نانو ذرات خاکستر برگ درخت کنار انجام شد، مقدار بهینه جاذب برای جذب کروم با غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر برابر ۵ گرم بر لیتر به دست آمد [۲۸]. در مطالعه دیگری که توسط Hosseini Fard و همکاران بر روی حذف مس از محلول‌های آبی با استفاده از نانو ذرات دی اکسید منگنز منتشر شد، این نتیجه حاصل شد که با افزایش میزان جاذب از ۰/۱۵ گرم در لیتر به ۰/۵ گرم در لیتر، درصد جذب افزایش یافت [۲۹].

با بررسی تغییرات غلظت اولیه کادمیوم مشخص شد که با افزایش غلظت کادمیوم، میزان جذب آن نیز کاهش یافت. با توجه به ثابت بودن میزان دز جاذب و محدود بودن تعداد سایت‌های جذب موجود، کاهش درصد حذف آلاینده متناظر با افزایش غلظت آلاینده ورودی منطقی بود [۲۸]. در تحقیقی که توسط Karimi و همکاران، با هدف تعیین فرآیند جذب سطحی یون‌های کادمیوم به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت اولیه کادمیوم از فاضلاب سنتتیک با نانو ذرات آهن مغناطیسی سنتز شده میزان جذب کاهش یافت. در پژوهشی با افزایش غلظت یون‌های کادمیوم راندمان جذب نانوکامپوزیت نیکل کاهش پیدا کرد بطوری که در غلظت ۱۰

میله گرم به کمترین میزان خود رسید [۲]. در تحقیقی علت این پدیده را افزایش یون های در حال رقابت برای واکنش با گروه های فعال سطحی و در نهایت با کاهش مکان های فعال سطحی و اشباع شدن آن ها درصد حذف کاهش یافت [۲۹]. طی مطالعه ای که Akhbarzade و همکاران، بر روی توانایی نانو ذرات اکسید آهن، در حذف رقابتی و بازیابی کروم شش و نیکل دو ظرفیتی از پساب معادن انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت اولیه فلزات کروم و نیکل میزان جذب کاهش یافت و علت آن را ثابت بودن سطح جذب نانو ذرات گزارش کرد [۳۰].

نتایج به دست آمده از هم دماهای جذب لانگمویر و فروندلیچ نشان داد که، جذب کادمیوم با استفاده از نانو ذره اکسید آهن از مدل لانگمویر به علت داشتن  $R^2$  بالاتر (میزان ۰/۴۸۸۸)، تبعیت کرد. پس از انجام تجزیه تحلیل هم حرارت های جذب، جذب نانو ذره اکسید آهن با ضریب  $K_f$  که معیاری از قدرت جذب بود برابر ۱۷/۱۱۵ لیتر بر گرم بود. ضریب  $1/n$  که معیار شدت جذب است، برای این جذب ۰/۲۶۸۱ تعیین شد. برازش مدل هم دمای فروندلیچ برای جذب کادمیوم نیز نشان دهنده اشباع نشدن جذب در محدوده غلظتی به کار برده شده بود. در این مدل ثابت  $K_f$  را می توان یک شاخص کمی در ارتباط با ظرفیت جذب دانست به طوری که با افزایش این ثابت، ظرفیت جذب جذب برای جذب ماده جذب شونده افزایش یافت. افزایش این ثابت از جذب اکسید آهن، ظرفیت جذب بالای برای کادمیوم را نشان داد. ثابت  $n$  نیز به عنوان شاخص شدت جذب بیان شد و معیاری

از انحنای معادله برازش یافته و میزان ناهمگنی سطح جاذب بود [۳۰]. در تحقیقی Karimi و همکاران برای برازش مدل های جذبی، در حذف مواد آلی از محلول های آبی با استفاده از نانو ذرات اکسید آهن مغناطیسی پوشش داد شده با سیلیس به دلیل  $R^2$  بالاتر (مقدار ۰/۹۴۴۲) مدل لانگمویر را انتخاب نمودند [۲].

تعیین ترکیبات موجود در ساختار یک جاذب یکی از مهم ترین نکات در فرآیند جذب بوده که بایستی مورد توجه قرار گیرد [۳۱]. اندازه بسیار کوچک ذرات اکسید آهن باعث ایجاد سطح بسیار بزرگی شدند، گروه های عملکردی که بر روی نانوذرات اکسید آهن قرار داشت نیز سبب افزایش میزان واکنش ها شدند [۳۲]. یکی از مهم ترین مزایای استفاده از نانوذرات مگنتیک در محیط زیست این بود که به راحتی می توان آن ها را توسط یک میدان مغناطیسی بیرون از نمونه حذف نمود. نانو ذرات مگنتیک می تواند سطح بسیار زیادی را ایجاد کند و در عین حال خاصیت مگنتیک نیز داشت.

در ادامه پیشنهاد می گردد که برای پژوهش های بیش تر به بررسی میزان احیاء و واجذب این جاذب مطالعه شود و هم چنین با توجه به کارآمد بودن این جاذب در جذب فلز کادمیوم، توانایی جذب سایر فلزات نیز بررسی گردد. در نهایت نتایج پژوهش حاضر بیان گر این است که نانوکامپوزیت نیکل فریت می تواند توانایی بالایی در جذب فلز سنگین کادمیوم از محلول های آبی داشته باشد که می توان از آن تحت شرایط بهینه به عنوان جاذب مؤثر برای حذف کادمیوم استفاده کرد.

#### نتیجه گیری

که نانو ذرات دی اکسید آهن می‌تواند کارایی بالایی در جذب کادمیوم از پساب داشته باشد و می‌تواند در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

به این وسیله نویسنده مقاله بر خود لازم می‌داند از ریاست پژوهشکده پسماند و پساب دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) و کارشناس پژوهشکده سرکار خانم مهندس پیرستانی به جهت کمک در انجام پروژه و در اختیار قرار دادن امکانات برای انجام این پژوهش، کمال تقدیر و تشکر را نماید.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش pH، میزان جذب برای فلز افزایش می‌یابد. بیش‌ترین جذب در زمان ۲۰ دقیقه اتفاق افتاد و با افزایش زمان تماس میزان جذب تقریباً ثابت ماند. با افزایش میزان جاذب میزان جذب افزایش یافت و افزایش غلظت اولیه یون‌های کادمیوم در محلول ساختگی، سبب کاهش میزان جذب می‌شود. در نهایت مشخص شد که جذب فلز کادمیوم توسط نانو ذرات اکسید آهن با مدل لانگمویر مطابقت داشت. در نهایت مشخص شد

## References

- [1] Miklos DB, Remy C, Jekel M, Linden KG, Drewes JE, Hübner U. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment—A critical review. *Water Research* 2018; 1(139):118-31.
- [2] Karimi L, Farzad Kia M, Ovdı A, Esraflı A, Golshan M. Evaluation of the process of adsorption of cadmium ions from synthesized sewage with magnetic nanoparticles synthesized. *Journal of Health and Environment* 2014; 7(2): 171-84. [Farsi].
- [3] Bahrami M, Boroumand Nasab S, Kashkoli H, Farrokhan Firouzi A, Babaee A. Cadmium removal from aqueous solutions using modified magnetite nanoparticles. *Journal of Health and Environment* 2013; 6 (2): 221-32. [Farsi].
- [4] Sharma PR, Chattopadhyay A, Sharma SK, Geng L, Amiralian N, Martin D, Hsiao BS. Nanocellulose from spinifex as an effective adsorbent to remove cadmium (II) from water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2018; 6(3):3279-90.
- [5] Li YS, Liu CC, Chiou C. Kinetic studies of adsorption of lead(II) from aqueous solution by wine-processing waste sludge, *Water Environment Research* 2006; 78(3): 263-71.

- [6] Sud D, Mahajan G, Kaur MP. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solution - A review, *Bioresource Technology* 2008; 99: 6017-27.
- [7] Sari Y, Tuzen M, Soylak M. Adsorption of Pb (II) and Cr (III) from aqueous solution on Celtek clay. *Journal of Hazardous Materials* 2007; 144: 41-6.
- [8] Samanta HS, Das R, Bhattachajee C. Influence of Nanoparticles for Wastewater Treatment- A-Short Review. *Austin Chemical Engineering* 2016; 3(3): 1036-42.
- [9] Kazemeinejad A, Ahmadi Zadeh. Effect of pH on removal of copper ion from aqueous environments using iron oxide nanoparticles and iron oxide/hydroxyapatite nanocomposites. *Magnetic Resonance Systems Research* 2013; 3 (5): 41-9.
- [10] Mahdavi S, Jalali M, Afkhami A. Removal of heavy metals from aqueous solutions using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ZnO, and CuO nanoparticles. *In Nanotechnology for Sustainable Development* 2012; 171-188.
- [11] Rouhani M, Shabaniyan M, Kurd B. Effect of modified iron oxide nanoparticles on magnetic, thermal and mechanical-dynamic properties of nanocelulose/poly vinyl alcohol interconnect films. 1394, 6 (2): 251-63.[Farsi].
- [12] Kumar H, Rni R. Structural Characterization of Silver Nanoparticles Synthesized by Micro emulsion Route. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* 2013; 3(3): 2277-54.
- [13] Nisea A.K, Babaei V, Mozaffari S. Effect of modified Clinoptilolite Zeolites with Hexadecyltrimethyl Ammonium Chloride Surfactants and n Cetyl Pyridinium Bromide in Removal of Nitrate from aqueous solutions. *Scientific Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences* 2016; 15 (4): 343-54.
- [14] Mobasherpour I, Salahi E, Pazouki M. Removal of nickel (II) from aqueous solutions by using nanocrystalline calcium hydroxyapatite. *Journal of Saudi Chemical Society* 2011; 15: 105-12.
- [15] Malekutan M, Khazaei A. Comparison of the efficiency of zero-valent iron nanoparticles and manganese compounds in removal of cadmium ions from aqueous environments. *Journal of Ilam University of Medical Sciences* 2014; 22 (2): 93-103.
- [16] Hekmatzadeh A.A, Karimi-Jashni A, Talebbeydokhti N, Klove B. Adsorption kinetics of nitrate ions on ion exchange resin. *Desalination* 2013; 326: 125– 34.
- [17] Hall, K, Eagleton, R., Acrivos, L., Vermeulen, A. Pore and solid diffusion kinetics for fixed-bed adsorption

- under Constant- Pattern Condition, *Industri & Eng. chem. Fundamental* 1996; 5: 212-23.
- [18] Roop Ch. B, Goyal M. Activated Carbon Adsorption, CRC Press, 2005; pp.497.
- [19] Wang J.L. Chen C. Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a review, *Biotechnology Advances* 2006; 24(5): 427-51.
- [20] KarimiPasandide A, Rezaei Kalantari R, Naseri S, Mahvi A, NabiZazadeh A, Nabizade A and Esrafil A. Investigation of the efficiency of magnetic iron oxide nanoparticles coated with silica in the removal of organic matter of water. *Iranian Society of Public Health* 2013; 7 (3): 289-300. [farsi]
- [21] SalehNia S, Barikbin B, Dori H. Investigation of the Efficiency of Magnesium Activated Carbon with Iron Oxide Nanoparticles in Removal of Copper (II) from aqueous solutions. *Journal of Birjand University of Medical Sciences* 2016; 23(1). [farsi].
- [22] Rastafar N, Rabi B. Removal of nickel and cadmium from synthetic wastewater using wastes of cherry orchards and beech skin. *Journal of Environmental Engineering* 2014; 1(2): 35-45.
- [23] Shokri H, Sayyadi M, Rezaei M, Allahanesani A. Investigation of cadmium removal from aqueous solutions by nickel ferrite nanocomposite with titanium oxide coating. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences* 2017; 16(2).
- [24] Melamed R, Luz A.B. Efficiency of industrial mineral on the removal of mercury species from liquid effluents, *Sci. Total Environ* 2006; 1368: 403-6.
- [25] SantosYabe M.J, Oliveira E. Heavy metals removal in industrial effluents by sequential adsorbent treatment. *Adv. Environ. Res* 2003; 7: 263-72.
- [26] Meng X, Hongjie W, Di L, Dan Q, Yujia Z, Yili W. 2013. "Removal of Pb(II) from aqueous solution by hydrous manganese dioxide: Adsorption behavior a mechanism. *J. of Environmental Sciences* 25(3): 479-86.
- [27] Azari A, Gholami M, Mokhtari M, Kakavand B, Ahmadi A, Sattari Tabrizi M. Removal of six volumes of chromium from aqueous medium using activated carbon with zero iron nanoparticles (CMFeO): Study of kinetics, isotherms and thermodynamics. *Journal of Health and Development* 2014; 3(1).
- [28] DivbandHafshejani L, Mortazavi Ghanavati P, SabzAlipour S, BoroumandNasab S. Study of kinetics and patterns of the absorption rate of six-volume chromium from aqueous media by nanoparticles of ash leaves. *Irrigation Engineering Engineering Journal* 2014; 36(1): 31-23. [Farsi].

- [29] Hosseini Fard, et al. Synthesis of manganese dioxide nanoparticles and its performance evaluation in copper removal from aqueous solutions. *Journal of Water and Sewage* 2016, 27.3: 2-11. [farsi].
- competitive elimination and recovery of chromium 6 and bivalent nickel from wastewater. *Ecology Journal* 38 (4): 1-8.
- [30] AkhbarZade R, Shaiestefar M, DareZereshki A. 2012. Investigating the ability of iron oxide nanoparticles in



## Investigation of the Effect of Using Iron Oxide Nanoparticles in Removing Cadmium from Aqueous Media: A Laboratory Study

N. Hamidianfar<sup>1</sup>, M. H. Abolhasani<sup>2\*</sup>, M. Ataabadi<sup>3</sup>

Received: 12/01/2019 Sent for Revision: 11/01/2019 Received Revised Manuscript: 18/09/2019 Accepted: 21/09/2019

**Background and Objectives:** Cadmium is a heavy metal, which has high toxicity and high accumulation properties in living tissue. The purpose of this study was to determine the efficiency of iron oxide nanoparticles in the adsorption of cadmium from aqueous media.

**Materials and Methods:** This laboratory study was performed in the summer of 2018. XRD (X-ray powder diffraction) and SEM (scanning electron microscope) were used to characterize the adsorbent properties and FTIR (fourier-transform infrared spectroscopy) analysis was performed to investigate the adsorbent functional groups. Various factors in cadmium removal were investigated such as pH, cadmium concentration, contact time and adsorbent dose. Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were used to describe adsorption data. For data processing, a completely randomized block design was used.

**Results:** Adsorption rate was fixed after 20 minutes (61%,  $p=0.032$ ). The highest adsorption was achieved at  $pH=7$  (99%,  $p=0.043$ ) and the lowest adsorption was observed with a significant difference at  $pH=3$  (68%,  $p=0.048$ ). The adsorption rate of metal, significantly different compared to the others, was the most in the concentration of 20 mg / L and the lowest in the concentration of 90 mg / L (97% and 70.5%,  $p=0.039$ ). In relation to the effect of iron oxide adsorption, the highest adsorption was observed at 2 grams per liter and the lowest adsorption percentage was at 0.5 grams per liter (97.96% and 75%,  $p=0.047$ ). The adsorption of cadmium by iron oxide was consistent with the Langmuir model ( $R^2=0.4888$ ).

**Conclusion:** According to the results, it is recommended to use nanoparticle coatings to increase the cadmium uptake efficiency, and it can be considered as an effective way to remove cadmium.

**Key words:** Iron oxide nanoparticles, Cadmium, Adsorption, Isotherms

**Funding:** This study did not have any funds.

**Conflict of interest:** None declared.

**Ethical approval:** The Ethics Committee of Islamic Azad University University of Khorasan branch approved the study (Ethical approval: IR.IAU.KHUISF.REC).

**How to cite this article:** Hamidianfar N, Abolhasani M H, Ataabadi M. Investigation of the Effect of Using Iron Oxide Nanoparticles in Removing Cadmium from Aqueous Media: A Laboratory Study. *J Rafsanjan Univ Med Sci* 2020; 18 (12): 1253-69. [Farsi]

1- MSc in Environmental Science, Isfahan Islamic Azad University (Khorasan), Isfahan, Iran, ORCID: 0000-0001-7973-7053

2- Assistant Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan Islamic Azad University (Khorasan), Isfahan, Iran, ORCID: 0000-0003-0780-7256

(Corresponding Author) Tel: 09131705033. Fax: (031) 35354117, E-mail: hadi.mha2001@yahoo.com

3- Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan Islamic Azad University (Khorasan), Isfahan, Iran, ORCID: 0000-0001-9591-4371