www.nm.shahrood.ac.ir
نانومواد: ۵۸:۱۶ (۱۴۰۳) ۵۸-۵۱

مقاله پژوهشی

تعیین شرایط بهینه جذب سطحی کادمیوم از محلول‌های آبی توسط نانوذرات اکسید نیکل به روش طراحی آزمایش

نسیم ضیایی‌فر*[۱] و صابر خدایی آشان[۲]

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران
۲- گروه آمار، دانشکده علوم پایه، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵

چکیده

یکی از بهترین روش‌های حذف آلاینده‌های موجود در پساب از جمله کادمیوم، استفاده از فرآیند جذب سطحی می‌باشد. از مهمترین اکسیدهای فلزات واسطه، به عنوان جاذب می‌توان به اکسید نیکل اشاره نمود. در این کارتحقیقی نانوذرات اکسید نیکل به روش سل-ژل در اندازه‌ای در حدود ۷ نانومتر سنتز شد. نانوذرات نیکل اکسید سنتز شده به روش سل-ژل با روش‌های TEM، SEM و XRD مشخصه‌یابی گردید. از نانوذره نیکل اکسید سنتز شده به عنوان جاذب موثر برای حذف کادمیوم از محلول‌های آبی استفاده گردید. برای این منظور تاثیر ۴ پارامتر نظیر، غلظت اولیه Cd، مقدار گرم جاذب NiO، دما و pH در حذف Cd توسط نانوذره NiO سنتز شده به روش سل-ژل مورد مطالعه قرار گرفت. تحت شرایط بهینه (مقدار نانوجاذب ۰/۴ g، pH = ۴/۷، غلظت کادمیوم ۲۰ppm و دمای ۲۰ °C) درصد حذف کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای بررسی تاثیر و تعیین شرایط بهینه هر یک از این پارامترها، روش تاگوچی مورد مطالعه قرار گرفت. در روش تاگوچی ۴ متغیر موثر در فرآیند جذب سطحی شامل غلظت اولیه آلاینده، گرم جاذب، pH و دما به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شد. نتایج طراحی آزمایش به روش تاگوچی نشان داد که، پارامتر گرم نانوجاذب و مقدار آلاینده نسبت به سایر پارامترها بیشترین تاثیر را در جذب سطحی کادمیوم دارد. دما و pH تاثیر چندانی بر راندومان حذف کادمیوم ندارند.

***واژه‌های کلیدی:* کادمیوم، نانوذرات اکسید نیکل، محلول‌های آبی، تاگوچی.**

۱- مقدمه

آب به عنوان ترکیبی که سه چهارم از کل سطح کره زمین را پوشانیده، از عوامل ضروری برای ادامه حیات کلیه جانداران اعم از انسان، حیوان و گیاه محسوب می‌شود، پساب‌های صنعتی به عنوان یکی از مهمترین آلاینده‌های محیط زیست به شمار می‌روند. نقش پساب تصفیه نشده در آلودگی آب‌های تازه به حدی زیاد است که هر متر مکعب پساب می‌تواند

* **عهده‌دار مکاتبات:** نسیم ضیایی‌فر
نشانی: گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، ایران
تلفن: ۰۴۱-۳۷۲۵۱۸۶۰، **دورنگار:** ۰۴۱-۳۷۲۵۱۸۶۰، **پست الکترونیکی:** nz1659@gmail.com

بیش از چهل مترمکعب آب را آلوده سازد. مهمترین عوامل آلوده کننده‌ای که بر روی پساب‌ها تاثیر می‌گذارند عبارتند از مواد جامد معلق و عوامل بیماری‌زا و فلزات سنگین، تعداد زیادی از فلزات سنگین مانند: کروم، کادمیم، سرب، جیوه و غیره. در غلظت‌های کم نیز خطرناک و سمی هستند و برای سلامت انسان بسیار مضر است. کادمیم یکی از فلزهای سنگین سمی است که از راه‌های گوناگون مانند پساب‌های صنعتی، خانگی، کشاورزی و مکان‌های دفن غیر بهداشتی، مواد زاید شهری و صنعتی وارد منابع آب می‌شود [۱]. روش‌های زیادی مانند هم‌رسوبی، مبادله یون، اسمز معکوس و جذب برای حذف آلاینده‌ها از محلول‌های آبی وجود دارد. فر آیند جذب سطحی به دلیل به صرفه بودن روش متداول برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی است [۴-۲]. بطور معمول جاذب‌ها موادی بسیار متخلخل هستند و جذب سطحی بیشتر روی دیواره‌ها و یا مکان‌هایی در درون ذره اتفاق می‌افتد [۵]. نانوذرات به دلیل ویژگی‌های منحصربفردشان از جمله ظرفیت جذب بالا، سطوح غیراشباع، بهره‌برداری و تولید آسان به عنوان جاذب‌های جدید در حذف فلزات سنگین مطرح می‌باشند. نانوجاذب‌های مختلف نظیر نانوذرات آهن، اکسیدهای فلزی و بیوجاذب‌ها از مهمترین این موارد هستند. اگرچه مطالعات زیادی در مورد حذف فلزات سنگین با استفاده از اکسیدهای آهن، اکسید منگنز و اکسید روی انجام شده است ولی تعداد مقالات منتشر شده در مورد نیکل اکسید اندک است. نانوذره اکسید نیکل سنتز شده به روش سل-ژل بدلیل مساحت سطح ویژه بالا و اندازه ذرات در حد ۷ nm به عنوان یک جاذب موثر می‌باشد [۶]. در فرآیند جذب سطحی فاکتورهایی مانند مقدار غلظت آلاینده، مقدار گرم جاذب، دما، pH و زمان تماس عوامل موثر در فرآیند حذف آلاینده از محلول‌های آبی است. با استفاده از طراحی آزمایش امکان حذف فاکتورهای غیرضروری، محاسبه درصد اهمیت هر متغیر، تعیین میزان خطا و تعیین شرایط بهینه صورت می‌گیرد. از انواع روش‌های طراحی آزمایش می‌توان به طراحی فاکتوریل جزیی اشاره کرد که این روش به ۲ نوع طراحی تاگوچی و روش رویه پاسخ تقسیم می‌شود. در روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد تعداد آزمایش‌ها بسیار کاهش می‌یابد. در همین راستا می‌توان به کارهای تحقیقی ذیل اشاره نمود: کریمی و همکارانش ارزیابی فرآیند جذب سطحی یون‌های کادمیوم از فاضلاب سنتتیک با نانوذرات آهن مغناطیسی سنتز شده را مورد بررسی قرار دادند [۷]. عشقی و ضیایی‌فر حذف رنگ راکتیو قرمز ۱۹۸ از محلول‌های آبی با استفاده از نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با مایعات یونی و بهینه‌سازی فرآیند با طراحی آزمایش به روش تاگوچی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تاگوچی نشان داد که افزایش زمان تماس و pH تاثیر چندانی بر درصد حذف رنگ ندارد [۸]. همچنین به مطالعه‌ای که توسط عزیزی بر روی حذف منگنز از محلول‌های آبی با استفاده از نانوذرات اکسید نیکل صورت گرفت می‌توان اشاره کرد [۹]. در پژوهشی دیگر بهنژادی و همکارش با استفاده از نانوذرات اکسید نیکل، حذف Cr (VI) را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. لذا هدف از انجام این مطالعه تعیین امکان استفاده از نانوذره NiO به عنوان جاذب در حذف فلز کادمیوم از محیط آبی طی فرآیند جذب سطحی می‌باشد، که تاکنون هیچ گزارشی مبنی بر استفاده از نانوذرات نیکل اکسید برای حذف یون‌های کادمیوم منتشر نشده است. برای این منظور در این مقاله پژوهشی، اهمیت فاکتورهای معنی‌دار و شرایط بهینه آزمایشی در فرایند جذب سطحی کادمیوم بوسیله نانوذرات اکسید نیکل، توسط طراحی آزمایش به روش تاگوچی تعیین و بهینه گردید.

۲- فعالیت‌های تجربی

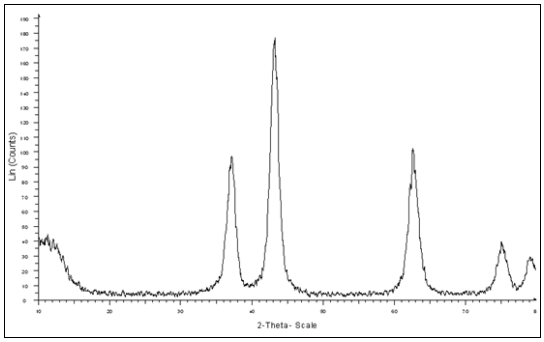
تمام مواد مورد استفاده شده از شرکت مرک می‌باشند و نانوذرات اکسید نیکل سنتزی به روش سل-ژل استفاده شده است. محلول Cd به عنوان آلاینده استفاده شده است. ۰/۱ M HCl و ۰/۱ M NaOH برای تنظیم pH استفاده شده است.

سنتز نانوذرات نیکل اکسید به روش سل ژل انجام گرفت. در این روش مقادیر g ۲/۹۹ از نیکل نیترات شش آبه و g ۲/۱ از سیتریک اسید وزن شده و در بشرهای جداگانه‌ای ریخته می‌شود. بر روی هر کدام مقدار mL ۵۰ آب مقطر افزوده می‌شود تا مواد به صورت محلول درآیند. سپس محلول حاوی یون‌های نیکل قطره‌قطره بر روی محلول اسید در حال هم زده شدن اضافه می‌شود. مخلوط حاصله به مدت h ۱۸ در حال همزدن تحت دمای °C ۷۰ قرار می‌گیرد. پس از حذف آب، ژل حاصله را در °C ۱۱۰ به مدت h ۲۴ در داخل آون خشک نموده و سپس ماده بدست آمده در °C ۳۰۰ در کوره به مدت h ۲ کلسینه می‌شود. ذرات بدست آمده نانوذرات اکسید نیکل می‌باشند [۱۰].

جهت بدست آوردن ساختار کریستالی و اندازه تقریبی نانوذرات سنتز شده از روش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس استفاده شده است. قطر متوسط دانه‌ها از رابطه دبای شرر ۱ محاسبه می‌گردد:

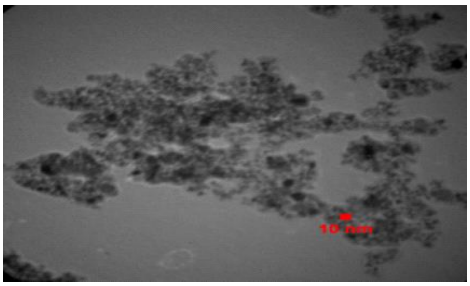
$$d = k\lambda/\beta\cos\theta \qquad (1)$$

که در این معادله k ثابتی معادل با ۰/۸۹، λ طول موج اشعه X معادل با ۰/۱۵۴۰۵۶ nm، β پهنای پیک در نصف ماکزیمم و θ نصف زاویه پراش می‌باشد. جهت تعیین اندازه نانوذرات سنتز شده و بررسی سطح از تکنیک TEM استفاده شده است. تصاویر TEM نمونه مورد نظر در این پژوهش با استفاده از دستگاه Philips CM ۱۰، ۱۰۰ keV استفاده شده است. جهت بررسی مورفولوژی یا ریخت‌شناسی نانوذرات سنتزی از تکنیک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. تصاویر SEM نانوذرات سنتزی در این کار تحقیقی با استفاده از دستگاه Hitachi s4160 تهیه شده‌اند. بررسی ساختار بلوری و اندازه کریستالی نانوذرات NiO با استفاده از تکنیک XRD جهت بدست آوردن ساختار کریستالی و اندازه تقریبی نانوذرات سنتز شده از روش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس استفاده شده است. طیف XRD مربوط به نانوذرات NiO سنتز شده به روش سل-ژل در شکل ۱ آورده شده است. اندازه تقریبی این نانوذرات با استفاده از طیف حاصله و معادله دوبای شرر (معادله ۱) ۷ نانومتر محاسبه شده است. وجود پیک‌هایی در 2θهای ۳۷، ۴۳، ۶۳، ۷۵ و °۷۹ نشان دهنده تشکیل کریستال‌های مکعبی شکل NiO است.



شکل ۱: طیف XRD مربوط به نانوذرات NiO سنتز شده به روش سل-ژل.

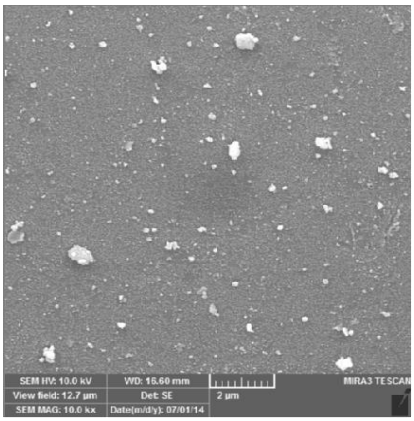
به منظور بررسی مورفولوژی سطحی نانو ذرات سنتز شده، آنالیز TEM از نانوذره انجام شد. تصاویر TEM نانوذرات NiO سنتز شده به روش سل-ژل در شکل ۲ آورده شده است. بر اساس این تصویر اندازه نانوذرات حدود ۱۰ nm می‌باشد که با نتایج بدست آمده از XRD هم‌خوانی خوبی دارد و تأیید کننده نتایج حاصله از تصاویر XRD می‌باشد.



شکل ۲: تصاویر TEM مربوط به نانوذرات NiO سنتز شده به روش سل-ژل.

برای مشاهده مورفولوژی نانوذرات NiO سنتز شده به روش سل-ژل از تصاویر SEM بهره برده شده است. میکروگراف

مربوط به نانوذرات NiO سنتزی در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که در تصویر مشخص است نانوذرات سنتزی توزیع اندازه بطور نسبی یکنواختی دارند.



شکل ۳: تصویر SEM مربوط به نانوذرات NiO سنتز شده به روش سل-ژل.

آزمایشات جذب با اضافه کردن مقادیر متفاوتی از جاذب و آلاینده در دمای ۲۰±۱ °C و pHهای مختلف در زمان‌های مختلف انجام می‌گیرد. بعد از صاف کردن نمونه آزمایشی توسط دستگاه اسپکتروفتو متر جذب نمونه آزمایشی اندازه‌گیری می‌شود. سپس درصد جذب طبق معادله ۲ محاسبه می‌گردد:

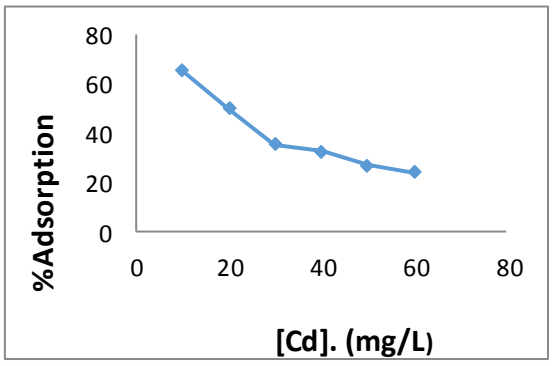
$$R\% = \left[{(C_0 - C_t)}/{C_0}\right] \times 100 \qquad (۲)$$

به طوریکه C_0 و C_t به ترتیب غلظت اولیه و نهایی کادمیوم هستند.

طراحی آزمایش به روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد تعداد آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: کاهش تعداد آزمایشات و هزینه‌ها، تعیین سهم هر فاکتور، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه در روش تاگوچی ۴ متغیر موثر در فرآیند جذب سطحی شامل غلظت اولیه آلاینده، گرم جاذب، pH و دما را به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته هر یک از این فاکتورها نیز در ۳ سطح مورد بررسی قرار گرفته جمعا ۹ آزمایش با در نظر گرفتن شرایط سطوح برای بهینه‌سازی و تعیین درجه تاثیر هر یک از فاکتورها لازم است جهت کاهش خطا هر آزمایش ۲ بار تکرار شده است.

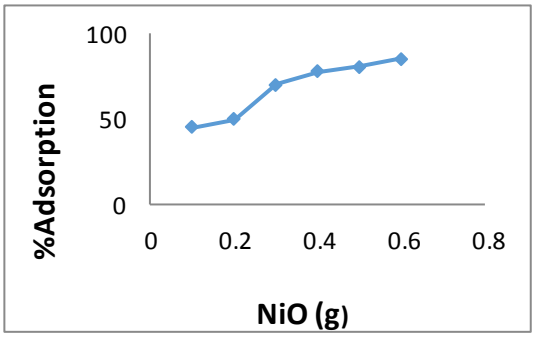
۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی روند حذف کادمیوم از محلول‌های آبی توسط نانوذرات اکسید نیکل پارامترهای تجربی شامل pH، مقدار جاذب، مقدار آلاینده و دما مورد بررسی قرار می‌گیرد. تأثیر غلظت اولیه کادمیوم بر میزان جذب سطحی آن بر روی نانوذرات NiO مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده در شکل ۴ قابل مشاهده است. بر طبق این نمودارها افزایش غلظت اولیه کادمیوم موجب کاهش درصد حذف می‌گردد، چرا که با افزایش غلظت آلاینده مکان‌های فعال جاذب سریع‌تر اشغال شده و دیگر جاذب قادر به جذب سطحی بیشتری از آلاینده نمی‌باشد. در واقع اشباع شدن سطح جاذب مانع از جذب بیشتر می‌گردد. کاهش میزان حذف از ۶۵/۵۸ به ۲۳/۶۹٪ نشان دهنده این واقعیت است که تعداد مکان‌های فعال جاذب جهت جذب آلاینده محدود می‌باشد [۱۱]. این مشاهدات نشان‌دهنده آن است که در غلظت‌های پایین‌تر تعداد سایت‌های کافی در سطح جاذب برای حذف کادمیوم وجود دارد. با افزایش غلظت کادمیوم سایت‌های کافی برای حذف فلز وجود نداشته، لذا با افزایش غلظت، جذب سطحی کاهش می‌یابد.



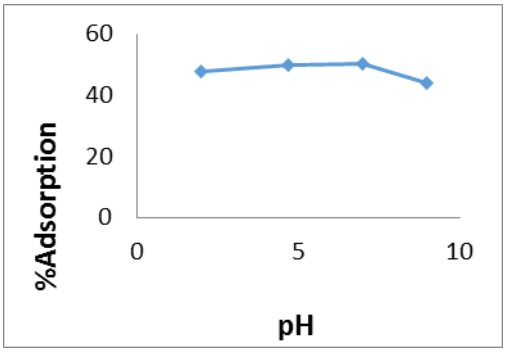
شکل ٤: تأثیر غلظت اولیه مختلف Cd بر فرآیند جذب سطحی آن بوسیله نانوذرات NiO.

تأثیر مقدار گرم جاذب (NiO) بر میزان جذب سطحی کادمیوم از محیط‌های آبی بوسیله نانوذرات NiO مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده در شکل ۵ قابل مشاهده است. مقدار g ۰/۴ اکسید نیکل به عنوان مقدار بهینه می‌باشد. چون درصد حذف با استفاده از جاذب بعد از g ۰/۴ تقریبا ثابت مانده است. با افزایش جرم جاذب، به عنوان تأثیرگذارترین فاکتور در فرآیند جذب سطحی، میزان درصد جذب Cd نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان افزایش مساحت سطح در دسترس جهت جذب آلاینده و وجود مکان‌های جذبی بیشتر برای تعداد ثابتی از مولکول‌های جذب شونده دانست [۱۲]. در تحقیقی مشابه از نانوذرات دی اکسید منگنز در حذف Pb و Cd استفاده گردید، نتایج نشان داد که با افزایش میزان جاذب درصد حذف سرب و کادمیوم افزایش می‌یابد [۱۳]. در حالت کلی، با افزایش مقدار جاذب، راندمان جذب افزایش یافته است. اما افزایش مقدار جاذب تا مقدار مشخصی، راندمان بالایی داشته و پس از آن، تغییرات نامحسوسی در راندمان حذف مشاهده می‌شود.



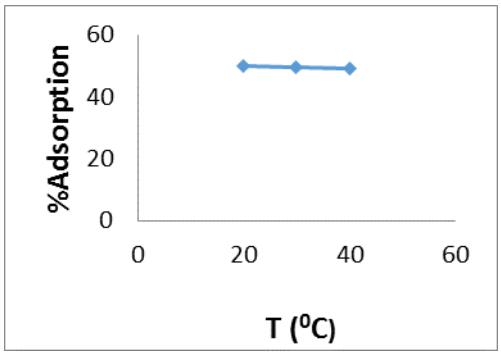
شکل ۵: تأثیر مقدار گرم جاذب NiO در میزان درصد حذف Cd.

تأثیر pH بر میزان جذب سطحی Cd از محیط‌های آبی بوسیله نانوذرات NiO مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده در شکل ۶ قابل مشاهده است. بر اساس اطلاعات تجربی بدست آمده و نتایج موجود، pH مطلوب جهت حذف کادمیوم بوسیله نانوذرات NiO، pH = ۴/۷ می‌باشد. تاثیر pH بر جذب کادمیوم بوسیله اکسید نیکل را می‌توان با در نظر گرفتن خصوصیات سطح نانوذرات اکسید نیکل به خوبی تفسیر کرد. در واقع با افزایش pH میزان درصد جذب سطحی آلاینده کاهش پیدا می‌کند. pH بر خاصیت شیمیایی محلول حاوی یون فلزی و هم بار سطحی جاذب تأثیرگذار است. [۱۴]. در نتیجه در pHهای پایین کادمیوم بهتر و راحت‌تر بوسیله جاذب دارای بار مثبت جذب سطحی می‌شود. در پژوهشی که از رزین پوششی نانوذرات دی اکسید منگنز در حذف کادمیوم و سرب استفاده شد نیز، می‌توان به نتایج مشابهی اشاره کرد، نتایج نشان دادکه بیشترین درصد حذف در pH حدود ۵ رخ داده است [۱۳].



شکل ٦: تأثیر pH بر فرآیند جذب سطحی Cd توسط نانوذرات NiO.

تأثیر دما بر میزان جذب سطحی کادمیوم از محیط‌های آبی توسط نانوذرات NiO مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده در شکل ۷ قابل مشاهده است. افزایش دما تأثیر چندانی بر فرآیند جذب سطحی ندارد. ولی بطور کلی می‌توان این نتیجه را گرفت که، دماهای بالاتر باعث آزادسازی یون کادمیوم جذب شده توسط جاذب، در محیط آبی می‌گردد. افزایش بیشتر دما باعث برگشت واکنش یا جذب شده و مقادیر یون کادمیوم به صورت مشخص از جاذب جدا شده و وارد محیط می گردد و باعث افزایش غلظت کادمیوم در محیط آبی می‌گردد. پس کنترل شرایط بهره‌برداری در این نوع جذب بسیار حائز اهمیت می‌باشد.



شکل ۷: تأثیر دما بر فرآیند جذب سطحی Cd بوسیله نانوذرات NiO.

در طراحی آزمایش جذب سطحی Cd از محیط‌های آبی توسط نانوذرات NiO بر اساس خواص آرایه‌های متعامد برای بدست آوردن تعداد آزمایش‌های لازمه استفاده می‌شود. فاکتورهای مورد استفاده و سطوح آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: فاکتورها و سطوح آن‌ها برای طراحی آزمایش.

فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
مقدار جاذب (g)	۰/۱	۰/۲	۰/۴
مقدار آلاینده (ppm)	۱۰	۳۰	۴۰
T (°C)	۲۰	۳۰	۴۰
pH	۲	۴	۸

با در نظر گرفتن ۴ فاکتور در ۳ سطح تغییر برای هر کدام، باید آرایه متعامد مناسب برای آن انتخاب گردد. از آنجایی که هر فاکتور دارای درجه آزادی ۲ می‌باشد، در نتیجه کل درجه آزادی برابر با ۸ خواهد شد، از این‌رو آرایه مناسب، آرایه L_9 خواهد بود. آرایه L_9 مورد نظر در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲: آرایه متعامد L_9 جهت طراحی آزمایش.

شماره آزمایش	سطوح فاکتورها			
	مقدار جاذب (g)	مقدار آلاینده (ppm)	T (°C)	pH
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
٤	۲	۱	۲	۳
٥	۲	۲	۳	۱
٦	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

به منظور تعیین شرایط بهینه و تعیین سهم هر یک از پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند حذف، از روش S/N و رسم نمودار مربوط به آن استفاده شده است. مقدار نسبت S/N با استفاده از معادله ۳ محاسبه شده و در جدول ۳ گزارش شده است.

$$\frac{S}{N} = 10log\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\frac{1}{Y_i^2} \qquad (۳)$$

r: تعداد آزمایش، Yi: نتیجه آزمایش i ام برای هر یک از تعداد آزمایش

جدول ۳: مقدار S/N برای آزمایش‌های مختلف.

شماره آزمایش	پاسخ S/N
۱	۳۲/۷۳۸
۲	۲۸/۹۸۹
۳	۲۴/۴۲۷
۴	۳۳/۱۵۸
۵	۳۰/۴۳۵
۶	۲۶/۵۰۵
۷	۳۸/۲۴۴
۸	۳۵/۷۴۱
۹	۳۱/۲۴۵

متوسط مقدار S/N برای هرسطح از پارامترها به عنوان S/N پاسخ در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ٤: پاسخ آنالیز تاگوچی برای فرآیند جذب سطحی حذف کادمیوم از طریق نانوذره.

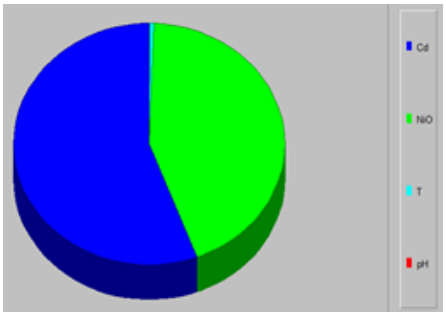
فاکتور	S/N متوسط		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
مقدار جاذب (g)	۲۸/۷۱۸	۳۰/۰۳۳	۳۴/۹۸۴
مقدار آلاینده (ppm)	۳۴/۷۱۳	۳۱/۷۲۲	۲۷/۲۹۹
دما (°C)	۳۱/۶۶۲	۳۱/۰۳۸	۳۱/۰۳۵
pH	۳۲/۳۸۰	۳۱/۲۴۶	۳۱/۱۰۹

در روش تاگوچی برای تعیین اثر هر یک از پارامترهای ورودی و سهم هر کدام از فاکتورها در میزان پاسخ، از آنالیز

واریانس (ANOVA) استفاده می‌شود. نتایج آنالیز ANOVA در جدول ۵ گزارش شده است. همانطور که در جدول ۵ و شکل ۸ مشخص است، مقدار جاذب و زمان تماس بیشترین تأثیر را در میان فاکتورهای انتخابی دارند. دما و pH نیز کمترین تأثیر را در راندمان فرآیند حذف دارد.

جدول ۵: نتایج بدست آمده از تحلیل واریانس به منظور تعیین درصد تأثیر فاکتورهای مختلف در فرآیند حذف کادمیوم از محیط‌های آبی بوسیله نانوذره.

فاکتور	DOF (f)	Sum of Squares(S)	Variance (V)	F-Ratio (F)	Pure Sum (S^2)	Percent (P%)
مقدار جاذب	۲	٦٥/٥٠٢	٣٢/٧٥١	–	٦٥/٥٠٢	٤٣/٧٠٥
مقدار آلاینده	۲	٨٣/٤٧٧	٤١/٧٣٨	–	٨٣/٤٧٧	٥٥/٦٩٩
دما (°C)	۲	٠/٧٨٢	٠/٣٩١	–	٠/٧٨٢	٠/٥٢١
pH	۲	٠/١٠٩	٠/٠٥٤	–	٠/١٠٩	٠/٠٧٣



شکل ۸: نمودار اهمیت فاکتورهای مؤثر در فرآیند حذف کادمیوم بوسیله نانوذره.

با توجه به اینکه مقدار S^2 برای پارامتر دما و pH کم می‌باشد، می‌توان از این پارامتر در تخمین شرایط بهینه چشم‌پوشی کرد.

٤- نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقی، کارایی جذبی نانوذرات اکسید نیکل سنتز شده به روش سل-ژل در حذف کادمیوم از محلول‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفت. تاثیر پارامترهای عملیاتی مختلف نظیر غلظت اولیه Cd، مقدار گرم جاذب NiO، دما و pH در حذف Cd توسط NiO سنتز شده به روش سل-ژل مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه جذب به ترتیب برابر با: مقدارجاذب ۰/۴ g، مقدار آلاینده ۲۰ ppm، pH= ۴/۷ و دما ۲۰ °C می‌باشد. نتایج روش تاگوچی که ابزاری قدرتمند در تعیین شرایط بهینه حذف می‌باشد، نشان داد که پارامتر گرم جاذب و مقدار آلاینده نسبت به سایر پارامترها تاثیر بیشتری در کارایی جذب سطحی Cd توسط نانوذرات دارد و کمترین تأثیر مربوط به دما و pH می‌باشد. بنابراین نتایج پژوهش حاضر بیان‌گر این است که نانوذره اکسید نیکل می‌تواند توانایی بالایی در جذب فلز سنگین کادمیوم از محلول‌های آبی داشته باشد که می‌توان از آن تحت شرایط بهینه، به عنوان جاذب مؤثر برای حذف کادمیوم استفاده کرد.

مراجع

[1] M. Sorbiun, E. Shayegan Mehr, A. Ramazani, S. Taghavi Fardood, *International Journal of Environmental Research*, **12**, 2018, 29.
[2] M. Ozacar, I.A. Sengil, *Bioresource. Technology*, **96**, 2005, 791.
[3] T. Mahmood, M.T. Saddique, A, Naeem, S. Mustafa, J. Hussain, B. Dilara, *Journal Non-Crystal. Solids*, **357**, 2011, 1016.
[4] N. Rasouli, H. Salavati, M. Movahedi, A. Rezaei, *Chemical Methodologies*, **1**, 2017, 79.
[5] N. Modirshahla, M.A. Behnajady, M.R, Jangi Oskui, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, **28**, 2009, 49.
[6] A.E. Nemr, O. Abdelwahab, A. El-Sikaily, A. Khaled, *Journal of Hazardous Materials*, **161**, 2009, 102.
[7] L. Karimi, M. Farzad Kia, A. Ovdi, A. Esrafli, M. Golshan, *Journal of Health and Environment*, **7**, 2014, 84.
[8] B. Eshghi, N. Ziyaifar, H. Sheikh Loui, *Shahrood Nano Materials Journal*, **43**, 2019, 141.
[9] M. Azizi, First International Conference on Chemistry, Nanotechnology and Petroleum, Tehran, 2023.
[10] M.A. Behnajady, S. Bimeghdar, *Chemical Engineering Journal*, **239**, 2014, 105.
[11] M.A. Behnajady, N. Mansoriieh, *Environ Technologies*, **33**, 2012, 265.
[12] R. Nithya, T. Gomathi, P. Sudha, S. Anil, *International Journal of Biological Macromolecules*, **87**, 2016, 545.
[13] D. Lijing, Z. Zhiliang, M. Hongmei, Q. Yanling, Z. Jianfu, *Journal of Environmental Science*, **22**, 2010, 225.
[14] H. Guo, S. Luo, L. Chen, X. Xiao, Q. Xi, W. Wei, *Bioresource Technology*, **101**, 2010, 08599.