بهینه سازی حذف کادمیم(II) از محلول آبی توسط نانوذره‌های کبالت اکسید با استفاده از مدل تاگوچی

نیوشا جوادنیا، عبدالهادی فرخ‌نیا+، زهرا عباسی*

گروه شیمی فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده: *مدل تاگوچی مدلی برای تحلیل آزمایش‌ها می‌باشد که با استفاده از تعداد معینی آزمایش میزان تأثیر و سطح‌های بهینه عامل‌های مؤثر را پیش بینی می نماید. این مطالعه با هدف بهینه سازی فرایند جذب کادمیوم توسط نانوذره‌های کبالت اکسید با استفاده از مدل تاگوچی انجام شد. نانو ذره‌های سنتز شده‌ی Co_3O_4 توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) و طیف بینی فروسرخ تبدیل فوریه (FT-IR) مشخصه‌یابی شد. به منظور بهینه سازی فرایند جذب کادمیوم توسط نانوذره‌های کبالت اکسید ، ۴ پارامتر تأثیرگذار در فرایند جذب: دما، مقدار جاذب، زمان و pH به عنوان آرایه انتخاب شدند. هر کدام از این آرایه ها دارای ۴ سطح بودند که سطح‌های انتخاب هر یک از آن ها برای طراحی آزمایش به روش تاگوچی ارایه شد. بهینه سازی فرایند جذب با مدل تاگوچی نشان داد که عامل‌های مورد نظر برای بهینه سازی شرایط به ترتیب: مقدار جاذب ۲۵ میلی گرم، pH= ۸ ، زمان تماس ۲۰ دقیقه و دما ۱۵ درجه سلسیوس می‌باشد. راندمان جذب کادمیوم بر روی نانوذره‌های کبالت اکسید در شرایط بهینه برابر با ۹۶٫۲۱ درصد تعیین شد.*

واژه‌های کلیدی: *نانوذره‌ها؛ مدل سینتیکی؛ مدل تاگوچی؛ روش سل ـ ژل؛ جذب سطحی.*

KEYWORDS: *Nanoparticles; Kinetic model; Taguchi model; Sol-gel method; Adsorption.*

مقدمه

نخستین گام در تولید ساختارهای نانو، یافتن روش‌های ساده و قابل کنترل و همچنین قابلیت تجاری کردن روش‌ها برای تولید مواد با کیفیت و خلوص بالا است. روش‌های گوناگونی که برای تولید اکسید فلزها در مقیاس نانو به کار می روند منجر به ایجاد ساختارهای متفاوت و در نتیجه ویژگی‌های گوناگون می‌شوند. روش‌های ساخت نانو ذره‌ها به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. از روش‌های فیزیکی می‌توان به تبخیر با استفاده از قوس الکتریکی، تبخیر لیزری، تبخیر گرمایی و تبخیر با پلاسما اشاره کرد. از روش‌های شیمیایی نیز می‌توان به روش‌های سل ـ ژل، هم‌رسوبی، احتراقی، نشاندن بخار شیمیایی، میکروامولسیون، روش‌های هیدروترمال و سنتز در شعله اشاره کرد [۱]. روش سل ـ ژل بیش از ۱۵۰ سال پیش برای ساخت سرامیک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است. این روش طی دو دهه گذشته اهمیت بسیاری در کاربردهای گوناگون یافته و موضوع پژوهش‌های بسیاری بوده است [۲]. فلزهای سنگین مانند سرب، کرم، روی و کادمیم افزون بر خطرناک بودن برای سلامتی انسان‌ها جز منابع تجدید ناپذیر به شمار می‌آیند. امروزه فناوری‌های پیشرفته‌ای برای حذف فلزهای سنگین از پساب‌های صنعتی به منظور کاهش تأثیر آن‌ها

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: ab.farrokhnia@gmail.com

بر محیط زیست به کار گرفته شده‌است که از آن جمله می‌توان به روش‌هایی همچون رسوب شیمیایی، صاف کردن و جذب‌سطحی اشاره کرد. که از بین روش‌های نام برده فرایندهای جذب سطحی به دلیل به صرفه بودن پرکاربردترین روش به شمار می‌آید [۳]. به طور معمول جاذب‌ها موادی بسیار متخلخل هستند و جذب سطحی بیش‌تر روی دیواره‌ها و یا مکان‌هایی در درون ذره اتفاق می‌افتد [۴]. شناسایی و حذف مواد شیمیایی سمی، امری ضروری در حفاظت محیط زیست است. آلاینده‌های سمی مانند یون‌های فلزهای سنگین، به شدت برای ارگانیسم‌های زنده و محیط زیست خطرناک هستند. 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[۵]. کادمیم باعث آسیب‌های کبدی و ریوی، فشار خون، از کار افتادن کلیه، و سرطان زایی می‌شود. درنتیجه لازم است این آلاینده از محیط زیست حذف شود[۶]. در سال ۲۰۱۲ میلادی، *نجفی* و *همکاران*، حذف فلزهای سنگین دو ظرفیتی از جمله کادمیم با استفاده از جاذب‌های NH_2-SG و NH_2-SNH سنتز شده را مورد بررسی قراردادند. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که بیش‌ترین همبستگی برای هم‌دمای جذب‌سطحی لانگمویر ـ فرندلیش و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم برای این روش وجود دارد [۷]. در سال ۲۰۱۲ میلادی، *یانگ* و *همکاران* هم‌دماهای جذب سطحی و سینتیک واکنش حذف فلز کادمیم را با استفاده از TiO_2 مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌های به‌دست آمده سینتیک شبه مرتبه اول و هم‌دمای جذب‌سطحی لانگمویر را برای حذف صورت‌گرفته نشان دادند[۸]. در سال ۲۰۱۳، *خسروی* و *همکاران* با استفاده از زئولیت طبیعی استان آذربایجان غربی موفق به حذف کاتیون‌های دو ظرفیتی از جمله کادمیم شدند. نتیجه‌های این بررسی نشان داد که زئولیت‌ها توانایی بالایی در حذف این فلزهای از پساب‌ها دارند. ظرفیت جاذب مقدار ۱٫۱۷۹ mg/g و راندمان حذف ۹۸٪ به‌دست آمد[۹]. در سال ۲۰۱۳ میلادی، *عثمان* و *همکاران* حذف فلز کادمیم توسط روزنامه باطله را مورد بررسی قرار دادند[۱۰]. *حسین‌زاده* و *همکاران* (۲۰۱۳ میلادی) برای حذف یون کادمیم از محیط آبی با کربن فعال تولیدی از تایرهای فرسوده استفاده کرده اند[۱۱].

این مطالعه با هدف بهینه سازی فرایند جذب یون کادمیوم بر روی نانوذره کبالت اکسید با بررسی مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر فرایند یعنی مقدار جاذب، pH، دما و زمان تماس با استفاده از مدل تاگوچی انجام شد.

بخش تجربی

سنتز نانوذرهای اکسیدکبالت به روش سل ـ ژل

در یک بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری محلول کبالت نیترات تهیه شد و سیتریک اسید ۱ مولار قطره قطره به آن افزوده شد. پس از افزایش اسید به محلول کبالت نیترات، بشر در حمام روغن و بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و دمای حمام در ۸۰ درجه سلسیوس ثابت نگه‌داشته شد تا یک ژل ضخیم تشکیل شود[۶]. برای بیرون آوردن مگنت در پایان تشکیل ژل، از یک آهنربای بسیار قوی کمک گرفته شد. ژل تهیه شده به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس در کوره گذاشته شد و سپس به منظور خالص‌سازی بیش‌تر، اکسید تشکیل شده به مدت ۵ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت.

بهینه سازی فرایند حذف کادمیوم به روش طراحی آزمایش های تاگوچی

در مطالعه حاضر به منظور بهینه سازی فرایند جذب کادمیوم توسط نانوذره‌های اکسید کبالت۴ پارامتر تاثیرگذار در دما، مقدار جاذب، زمان و pH فرایند جذب به عنوان آرایه انتخاب شدند. هر کدام از این آرایه‌ها دارای ۴ سطح می‌باشد که سطح‌های انتخاب هر یک از آن ها برای ارایه به روش تاگوچی ارایه شده است. در روش تاگوچی برای تحلیل آماری و دقیق تر نتیجه‌ها، از یک تابع پاسخ تبدیل یافته که به اثرهای ناشی از (S) به صورت نسبت علامت هر اثر تعریف می‌شود، استفاده می شود. برتری (N) خطا استفاده از این پاسخ جدید در تحلیل آماری، نسبت به شکل اولیه پاسخ، مقایسه بزرگی اثرهای ناشی از هرعامل اصلی با اثرهای ناشی از عامل‌های خطا و اغتشاش در انداز ه گیری است که منجر به برداشت دقیق تری از تأثیر واقعی عامل‌ها بر سامانه خواهد شد. در این مطالعه پاسخ در نظر گرفته شده درصد حذف کادمیوم به صورت معادله (۱) محاسبه S/N می باشد.

$$\frac{S}{N} = -۱۰ \log \frac{\left(۱/y_۱^۲ + ۱/y_۲^۲ + \cdots + ۱/y_\infty^۲\right)}{n} \qquad (۱)$$

مقدار جاذب اندازه گیری شده برای y_n در این معادله تعداد تکرار آزمایش ها n هر آزمایش در هر آزمون و برابر n در اینجا برابر ۳ می باشد. پس از انجام ۲۵ آزمایش پیشنهادی توسط مدل تاگوچی، سرانجام میانگین نتیجه‌ها ۳ بار تکرار آزمایش‌ها، به‌منظور طراحی آزمایش‌ها توسط نرم افزار Minitab 16 به روش تاگوچی

بررسی و شرایط بهینه حذف مشخص شد. حاصل طراحی آزمایش‌ها یک جدول با ۲۵ آزمایش بوده است.

به منظور به دست اوردن میزان حذف یون کادمیوم، جذب محلول باقی‌مانده توسط دستگاه جذب اتمی مطالعه شد و سپس درصد یون‌های کادمیم حذف شده توسط جاذب کبالت اکسید از معادله‌ی (۲) به‌دست آمد:

$$\%Removal=\frac{C_{\circ}-C_e}{C_{\circ}}\times 100 \qquad (۲)$$

که در آن $C_{\circ}$ غلظت اولیه کادمیم و C_e غلظت تعادلی محلول کادمیم پس از جذب می‌باشد.

نتیجه‌ها و بحث

طیف فروسرخ نانوذره‌های کبالت اکسید (شکل ۱) پیک‌های چشمگیری را در ناحیه‌های cm^{-1} ۵۶۷ و cm^{-1} ۶۶۱ نشان داده‌است که به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی Co-O و ارتعاش پیوند پل ساز O-Co-O می‌باشند. همچنین پیک دیده شده در ناحیه cm^{-1} ۱۶۰۰ را می‌توان مربوط به ارتعاش خمشی H-O-H دانست که در واقع به دلیل جذب رطوبت توسط نانوذره‌ها هنگام طیف گیری می‌باشد [۱۳، ۱۲].

الگوی XRD گرفته شده از نانوذره‌های اکسید کبالت خشک شده دردمای ۲۵۰°C در شکل ۲ نشان داده شده‌است که بیانگر ساختار مکعبی این نانوذره‌ها می‌باشد. همچنین پیک‌های نمایان شده در موقعیت‌های 2θ گوناگون (۱۹٫۳۷، ۳۱٫۵۷، ۳۷٫۱۷، ۴۵٫۰۹، ۵۵٫۸۰، ۵۹٫۶۵، ۶۵٫۴۵، ۷۷٫۶۴) از خود نشان دادند.

شکل‌های ۳ تصویرهای به دست آمده از TEMو SEM نانوذره‌های کبالت اکسید تهیه شده در دمای ۲۵۰ °C را نشان می‌دهد که براساس آن اندازه نانوذره‌ها در حدود ۳۰ تا ۴۶ نانومتر تعیین شده است. تصویرهای به دست آمده از نانوذره‌های اکسیدکبالت سنتز شده در دمای ۲۵۰ °C را نشان می‌دهد.

تعیین pH_{zpc} نانوذره‌های اکسید کبالت

برای تعیین این پارامتر از محلول نمک طعام ۰،۰۱ مولار به عنوان الکترولیت و از محلول های سود و هیدروکلریک اسید ۰،۱ مولار به عنوان عامل کنترل کننده pH استفاده شد. مقدار ۵۰ میلی لیتر از محلول الکترولیت در ۱۱ ارلن ریخته شده و pHمحلول ها با استفاده از اسید و سود با مولاریته یاد شده در بازه‌ی ۲-۱۲ تنظیم شد. میزان جرمی ۰،۳ گرم از نانوذره‌های کبالت اکسید در هر کدام از ارلن‌ها افزوده شد. سپس در انکوباتور شیکر گذاشته و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس هم زده شد. پس از سپری شدن ۴۸ ساعت pH پایانی هریک از ارلن‌ها یادداشت شد. نقطه pH_{zpc} از رسم مقدارهای جاذب اولیه در برابر مقدارهای نهایی pH تعیین شد. میزان pH_{zpc} برای نانوذره‌های کبالت اکسید ۷،۲ به دست آمده است.

بهینه‌سازی فرایند حذف یون کادمیم Cd(II) با مدل تاگوچی

آزمایش‌های طراحی شده با مدل تاگوچی شامل ۲۵ آزمایش بود. با توجه به استفاده از روش (L_{25}) اگوچی در این مطالعه نتیجه‌های به دست آمده از اندازه گیری درصد حذف یون کادمیوم، با سه بار اندازه گیری گزارش شد و نتیجه‌های بهتر و بررسی دقیق‌تری از نتیجه‌ها به دست آمد و با استفاده برای هر آزمایش محاسبه شد که S/N از آن‌ها نسبت های در جدول‌های ۲ و ۳ ارایه شده است برای رسم نمودارها از نرم افزار Sigmaplot11 استفاده شده است.

با توجه به نمودار رسم شده مقدارهای بهینه برای pH مقدار جاذب دما و زمان به ترتیب ۸ و ۲۵ میلی گرم و ۱۵ درجه سلسیوس و ۲۰ دقیقه می باشد.

می بینیم که عامل pH با سطح اطمینان ۹۹٫۹۹ ٪ مؤثرترین عامل و زمان با سطح اطمینان ۹۵٫۱۷ ٪ کم‌ترین عامل مؤثر شناخته شد.

محاسبه‌ی متغیرهای ترمودینامیکی

متغیرهای ترمودینامیکی جذب‌سطحی Cd(II) در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، pH=۸، ۲۵ میلی‌گرم جاذب و در مدت زمان ۳۰ دقیقه در دماهای ۲۷۸، ۲۸۳، ۲۸۸، ۲۹۳، ۲۹۸ و ۳۰۳K محاسبه شد. انتاپی استاندارد (ΔH°) و انتروپی استاندارد (ΔS°) با استفاده از معادله زیر و انرژی آزاد استاندارد گیبس محاسبه شد. با توجه به داده‌های ارایه شده در جدول زیر داده شده و با رسم نمودار $\ln K_c$ بر حسب $1/T$ می توان مقدار ΔH° را بااستفاده از شیب نمودار رسم شده به‌دست آورد.با توجه به اطلاعات نشان داده شده، شیب نمودار با احتمال ۹۹٫۹۲ ٪ مقدار (۲۶۹۲-) خواهد بود.

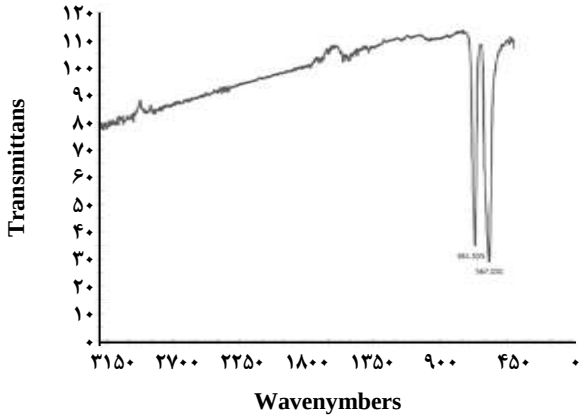
از آنجایی که در بازه‌ی دمایی مورد نظر، با افزایش دما میزان حذف افزایش یافته، مثبت بودن مقدار ΔH^{o}_{ads} با این پدیده،

جدول ۱ـ نتیجه‌های به دست آمده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی با آرایه ی L_{25} در سه بار تکرار آزمایش.

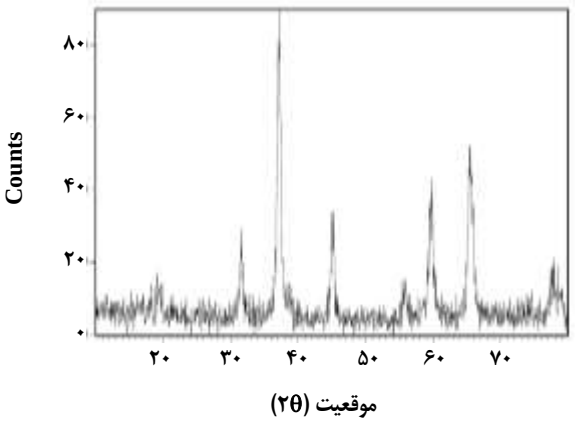
شماره آزمایش	جذب ۱	جذب۲	جذب۳	درصد حذف۱	درصد حذف۲	درصد حذف۳	میانگین درصد حذف
۱	۱۳۶۵/۰	۱۴۳۲/۰	۱۳۶۶/۰	۲۸۹/۴۸	۲۶۵/۴۵	۸۹۲/۴۷	۱۴۸/۴۷
۲	۲۷۷۶/۰	۲۵۹۹/۰	۲۹۳/۰	۳۶۱/۷۸	۰۲۱/۷۹	۰۲۱/۷۹	۰۴۸/۷۹
۳	۳۳۲۵/۰	۳۴۴۹/۰	۳۲۶۶/۰	۹۷۲/۷۳	۰۰۱/۷۳	۴۵۸/۷۴	۸۱۰/۷۳
۴	۳۱۹۴/۰	۳۱۹۶/۰	۳۲۴۳/۰	۰۱۵/۷۵	۷۶۹/۷۵	۶۴۳/۷۴	۱۴۲/۷۵
۵	۳۸۶۵/۰	۴۰۳۲/۰	۳۹۶۱/۰	۶۹۷/۶۹	۳۶۵/۶۸	۹۳۱/۶۸	۹۹۷/۶۸
۶	۲۹۳۲/۰	۳۱۱۰/۰	۲۹۴۱/۰	۱۲/۷۷	۶۹۸/۷۵	۰۴۷/۷۷	۶۲۱/۷۶
۷	۲۲۵۶/۰	۲۱۵۷/۰	۲۲۴۴/۰	۴۲۸/۸۲	۲۷۸/۸۳	۵۹/۸۲	۷۸۸/۸۲
۸	۱۳۸۲/۰	۱۳۸۲/۰	۱۴۹۵/۰	۴۵۱/۸۹	۳۲۶/۸۹	۵۴۸/۸۸	۱۰۸/۸۹
۹	۱۳۸۴/۰	۱۳۸۱/۰	۱۳۵۱/۰	۴۵۵/۸۹	۱۲۶/۹۰	۶۹۴/۸۹	۷۵۸/۸۹
۱۰	۲۵۵۷/۰	۲۶۷۴/۰	۲۵۱۲/۰	۱۰۳/۸۰	۱۶۷/۷۹	۴۵۷/۸۰	۱۴۲/۸۰
۱۱	۲۶۸۵/۰	۲۷۶۶/۰	۲۶۹۴/۰	۰۸۵/۷۹	۴۳۵/۷۸	۰۱۲/۷۹	۸۴۴/۷۸
۱۲	۱۸۱۵/۰	۱۷۶۶/۰	۱۸۴۹/۰	۰۰۶/۸۶	۳۸۹/۸۶	۷۳۴/۸۵	۰۴۳/۸۶
۱۳	۲۰۸۵/۰	۲۰۵۴/۰	۲۱۱۷/۰	۸۵۳/۸۳	۱۰۵/۸۴	۵۹۸/۸۳	۸۵۳/۸۳
۱۴	۱۵۳۲/۰	۱۵۳۲/۰	۱۵۷۱/۰	۲۵۷/۸۸	۵۶۳/۸۸	۹۴۶/۸۷	۲۵۵/۸۸
۱۵	۱۲۷۶/۰	۱۲۰۳/۰	۱۱۳۲/۰	۴۳۸/۹۰	۸۷۵/۹۰	۴۳۷/۹۱	۹۱۶/۹۰
۱۶	۲۵۷۵/۰	۲۶۳۷/۰	۲۵۲۳/۰	۹۶/۷۹	۴۶۱/۷۹	۳۶۸/۸۰	۹۲۹/۷۹
۱۷	۱۷۸۳/۰	۱۸۱۸/۰	۱۷۷۱/۰	۲۶/۸۶	۹۷۹/۸۵	۳۵۴/۸۶	۱۹۷/۸۶
۱۸	۱۰۲۶/۰	۱۰۶۱/۰	۱۱۰۲/۰	۲۸۳/۹۲	۰۰/۹۲	۶۷۴/۹۱	۹۸۵/۹۱
۱۹	۰۶۵۶/۰	۰۶۱۴/۰	۰۷۰۲/۰	۲۲۶/۹۵	۵۵۶/۹۵	۸۵۳/۹۴	۲۱۱/۹۵
۲۰	۰۸۰۹/۰	۰۸۱۹/۰	۰۷۷۷/۰	۰۰۹/۹۴	۹۲۳/۹۳	۲۵۷/۹۴	۰۶۳/۹۴
۲۱	۰۸۵۸/۰	۰۸۷۴/۰	۰۸۰۴/۰	۶۱۹/۹۳	۴۸۶/۹۳	۰۴۵/۹۴	۷۱۶/۹۳
۲۲	۰۴۸۵/۰	۰۳۸۷/۰	۰۴۳۶/۰	۵۸۷/۹۶	۳۶۴/۹۷	۸۹/۹۶	۹۴۷/۹۶
۲۳	۰۲۹۸/۰	۰۲۵۵/۰	۰۳۳۸/۰	۰۷۴/۹۸	۴۱۳/۹۸	۷۴۹/۹۷	۰۷۸/۹۸
۲۴	۰۱۸۳/۰	۰۲۳۶/۰	۰۱۳۸/۰	۹۸۹/۹۸	۵۶۸/۹۸	۳۴۲/۹۹	۹۶۶/۹۸
۲۵	۰۱۶۵/۰	۰۱۱۰/۰	۰۱۸/۰	۱۳۲/۹۹	۵۶۸/۹۹	۸۶۹/۹۸	۱۸۹/۹۹

جدول ۲ـ تحلیل واریانس (ANOVA) جهت حذف Cd(II) به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی.

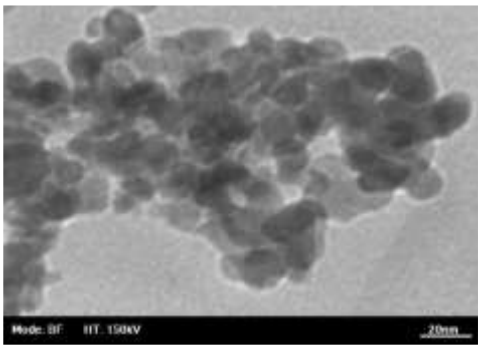
عامل	درجه آزادی	واریانس	سطح معنی داری	درصد تاثیر عامل
pH	۴	۲۲۳/۱۶۳	۰۰۰۱/۰<	۱۱۳/۷۳
مقدار جاذب (میلی گرم)	۴	۹۶۵/۴۶	۰۰۰/۰<	۸۸۵/۲۰
دما ($^{\circ}C$)	۴	۰۱۴/۱۰۲	۰۰۰/۰<	۵۵۲/۴
زمان(دقیقه)	۴	۴۶۹/۳۲	۰۴۸۳/۰	۴۴۹/۱

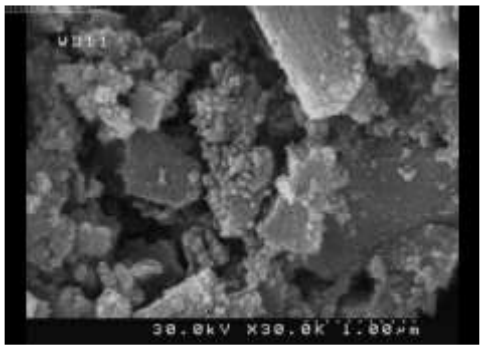


شکل ۱ـ طیف FT-IR گرفته شده از Co_3O_4 سنتز شده.



شکل ۲ـ طیف XRD گرفته شده از Co_3O_4 سنتز شده.





شکل ۳ـ تصویر TEMو SEM گرفته شده از نانوذرات Co_3O_4.

همخوانی دارد. با توجه به معادله زیر، انرژی آزاد استاندارد گیبس به‌دست آمد. نتیجه‌های محاسبه شده در جدول ۳ ارایه شده است.

$$\Delta G^{o}_{ads} = -RT\ln K_c$$

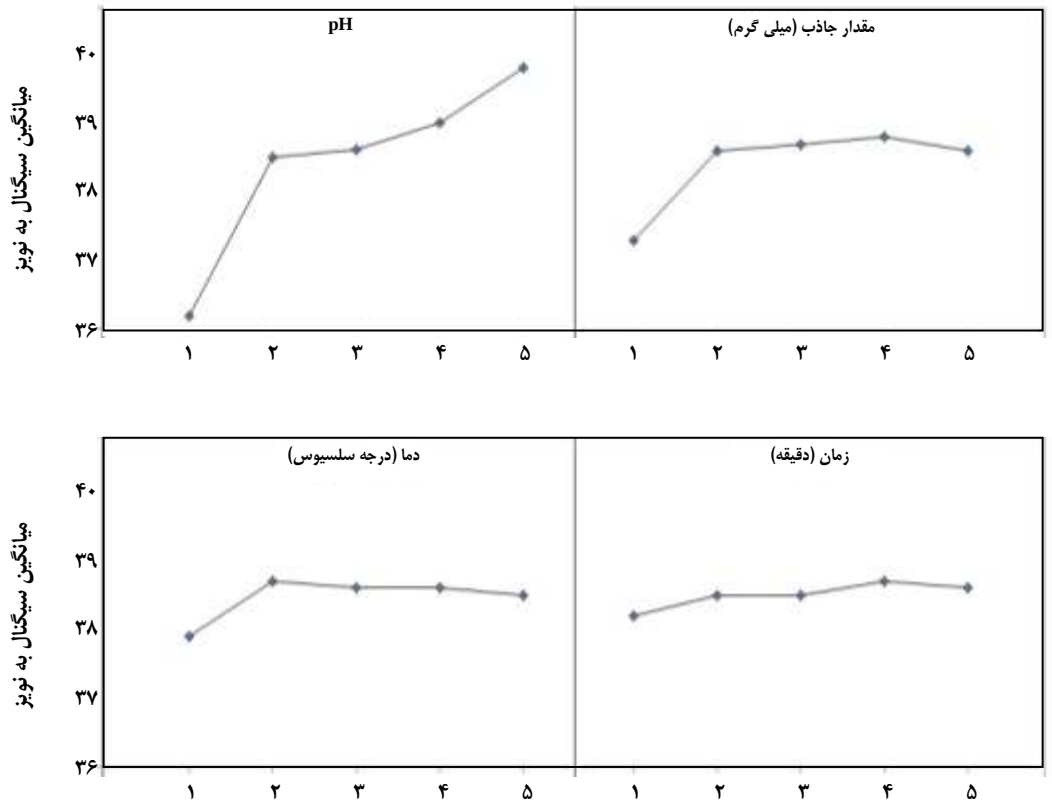
مقدارهای ΔG^{o}_{ads} منحنی نشان دهنده‌ی فرایند جذب دلخواه در شرایط استاندارد می‌باشد. انتروپی استاندارد جذب محاسبه و نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است.

$$\Delta S^{o}_{ads} = \frac{\Delta H^{o}_{ads} - \Delta G^{o}_{ads}}{T}$$

مقدارهای مثبت ΔS^{o}_{ads} نشان دهنده‌ی افزایش بی‌نظمی یا به عبارتی افزایش درجه‌های آزادی در سطح مشترک فاز جامد–محلول باشد.

جدول ۳ـ مقدارهای ΔG^{o}_{ads} برای جذب‌سطحی Cd(II) در دماهای متفاوت.

دما(K)	۲۷۸	۲۸۳	۲۸۸	۲۹۳	۲۹۸	۳۰۳
$\ln K_c$	۱٫۸۱۰	۲٫۰۲۹	۲٫۱۷۷	۲٫۴۵۶	۲٫۵۰۹	۲٫۵۶۵
$\Delta G^{\circ}_{ads}(kJ/mol)$	-۴٫۱۸۳	-۴٫۷۷۴	-۵٫۲۱۳	-۵٫۹۸۳	-۶٫۲۱۶	-۶٫۴۶۱

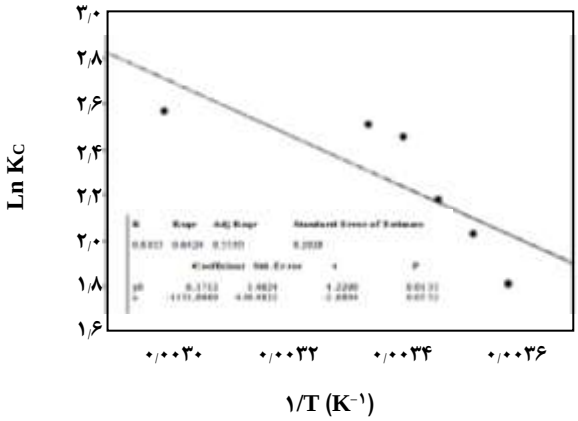


شکل ۴ـ نمودار سیگنال به نویز در روش تاگوچی با آرایه ی L_{25}.

نتیجه‌گیری

نانو ذره‌های کبالت اکسید به روش سل ـ ژل به عنوان جاذب فلز کادمیم سنتز شدند.

مهم‌ترین نتیجه‌های به دست آمده از این مطالعه عبارتند از: به کارگیری مدل تاگوچی برای تعیین شرایط بهینه فرایند جذب یون کادمیوم بر روی نانوذره کبالت اکسید نشان داد که زمان تماس مهم‌ترین عامل در افزایش کارایی حذف می‌باشد. در سطح‌های گوناگون S/N نتیجه‌های به‌دست آمده برای نرخ‌های عامل‌ها نشان داد که شرایط بهینه جذب به ترتیب برابر است با: مقدار جاذب ۲۵ میلی‌گرم، pH=۸ ، زمان تماس ۲۰ دقیقه و دما ۱۵ درجه سلسیوس می باشد.



شکل ۵ ـ منحنی $\ln K_c$ برحسب $1/T$ برای حذف Cd(II) توسط اکسیدکبالت.

جدول ۳ـ مقدارهای ΔG^{o}_{ads} برای جذب‌سطحی Cd(II) در دماهای متفاوت.

دما(K)	۲۷۸	۲۸۳	۲۸۸	۲۹۳	۲۹۸	۳۰۳
$\ln K_c$	۱٫۸۱۰	۲٫۰۲۹	۲٫۱۷۷	۲٫۴۵۶	۲٫۵۰۹	۲٫۵۶۵
$\Delta G^{\circ}_{ads}(kJ/mol)$	−۴٫۱۸۳	−۴٫۷۷۴	−۵٫۲۱۳	−۵٫۹۸۳	−۶٫۲۱۶	−۶٫۴۶۱

داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش دما تا ۲۰ درجه سلسیوس، میزان حذف یون کادمیم افزایش یافته‌است در نتیجه واکنش در این بازه‌ی دمایی گرماگیر می‌باشد همچنین کاهش حذف در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، نشان دهنده‌ی گرمازا بودن واکنش در این دما می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده دمای ۱۵ درجه سلسیوس به عنوان دمای بهینه انتخاب شد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲

مراجع

[1] Shayegan Mehr E., Sorbiun M., Ramazani A., Taghavi Fardood S., Plant-Mediated Synthesis of Zinc Oxide and Copper Oxide Nanoparticles by Using Ferulago Angulata (schlecht) Boiss Extract and Comparison of Their Photocatalytic Degradation of Rhodamine B (RhB) under Visible Light Irradiation, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **29**(2): 1333-1340 (2018).

[2] Kamran S., Amiri Shiri N., A Comparative Study for Adsorption of Alizarin Red S from Aqueous Samples by Magnetic Nanoparticles of Fe_3O_4, $CoFe_2O_4$ and Ionic Liquid-Modified Fe_3O_4, *Chemical Methodologies (Chem. Method.)*, **3**(1) 1-84, 24-38 (2018).

[3] Rasouli N., Salavati H., Movahedi M., Rezaei· A., An Insight on Kinetic Adsorption of Congo Red Dye from Aqueous Solution Using Magnetic Chitosan Based Composites as Adsorbent, *Chemical Methodologies (Chem. Method.)*, **1**(1) 1-93: 79-93 (2017).

[4] Modirshahla N., Behnajady M.A., Jangi Oskui M.R., Investigation of the Efficiency of ZnO Photocatalyst in the Removal of p-Nitrophenol from Contaminated Water, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **28**(1): 49-55 (2009).

[5] Sorbiun M., Shayegan Mehr E., Ramazani A., Taghavi Fardood S., Green Synthesis of Zinc Oxide and Copper Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of Oak Fruit Hull (Jaft) and Comparing Their Photocatalytic Degradation of Basic Violet 3, *International Journal of Environmental Research*., **12**(1): 29-37 (2018).

[6] Khatamian M., Daneshvar N., Sabaee S., Heterogeneos Photocatalytic Decolorization of Brown NG by TiO_2-UV Process, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **29**(3): 19-25 (2010).

[7] Yang W-W, Miao A-J., Yang L-Y., Cd^{2+} Toxicity as Affected by Bare TiO_2 Nanoparticles and Their Bulk Counterpart, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **85**: 44-51 (2012).

[۸] خسروی، ا.؛ اسم حسینی، م.؛ خضری، س.؛ حبیبی مهر، م.؛ حذف فلزات سنگین دو ظرفیتی (کادمیم، کبالت، روی، سرب و آمونیوم) از پساب ها با استفاده از زئولیت طبیعی استان آذربایجان غربی، *مجله اندیشه علوم شیمی کاربردی دانشگاه سمنان*، **۲۰**: ۶۰ تا ۷۴ (۱۳۹۰).

[9] Ossman M., Mansour M., Removal of Cd(II) Ion from Wastewater by Adsorption onto Treated old Newspaper: Kinetic Modeling and Isotherm Studies, *Journal of Industrial Chemistry*, **4**: 13 (2013).

[۱۰] حسین‌زاده، ا.؛ رحمانی، ع.؛ بررسی کارایی حذف یونهای کادمیوم از محیط های ابی باکربن فعال تولیدی ازتایرهای فرسوده، دانشگاه علوم پزشکی سمنان، **۴**: ۵۶۶ تا ۵۷۷ (۱۳۹۲)

[۱۱] اسلامپور، غ.ر.؛ پارسافر، غ.ع.؛ مقاری، ع.؛ نجفی، ب.؛ "شیمی فیزیک: ترمودینامیک محلول‌ها و سنتیک شیمیایی" تالیف ا. لواین، جلد دوم، انتشارات فاطمی، (۱۳۸۷).

[12] Sari A., Tuzen M., A Novel Bio-Adsorbent of Mint Waste for Dyes Remediation, *Applied Clay Science*, **88**: 63-72 (2014).

[13] Binitha N.N., Suraja P.V., Yaakob Z., Resmi M.R., Silija P.P., Simple Synthesis of Co_3O_4 Nanoflakes Using a Low Temperature Sol–Gel Method Suitable for Photodegradation of Dyes, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **53**: 466-469 (2010).

[14] Ai L., Jiang J., Influence of Annealing Temperature on the Formation, Microstructure and Magnetic Properties of Spinel Nanocrystalline Cobalt Ferrites, *Current Applied Physics*, **10**: 284-288 (2010).