ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of L-Cysteine Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes On Mercury Removal from Aqueous Solutions

Mohammad Ali Zazouli[1],
ZabihAlla Yousefi[1],
Jamshid Yazdani Cherati[2],
Hajar Tabarinia[3],
Farzaneh Tabarinia[4],
Behrouz Akbari Adergani[5]

[1] Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Health Sciences Research Center, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2] Associate Professor, Department of Biostatics, Health Sciences Research Center, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[3] MSc in Environment Health Engineering, Student Research Committee, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[4] MSc in Chemistry, Mazandaran Standard Office, Sari, Iran
[5] Food & Drug Laboratory Research Center, Food & Drug Organization, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

(Received August 26, 2013 ; Accepted October 29, 2013)

Abstract

Background and purpose: Mercury is a toxic heavy metal which causes irrevocable intense nerve-recognition disturbance to human. Excess contact to mercury causes diseases like tremor, losing sensation, decreasing vision and hearing or growth. WHO recommended the most amount of mercury absorption about 0.3 mg per week and the most concentration in water about 1µg/L. The purpose of this study was to investigate the efficiency of Lcysteinefunctionalized single-walled carbon nanotubes (SWCNs) in mercury removal from aqueous solutions.

Materials and methods: In this study, single-walled carbon nanotubes was used as absorbent. The effects of some parameters such as pH, absorbent dose, contact time and mercury concentration were assessed. All experiments have been done according to standard methods. The sample size was determined by Box-Benkan method.

Results: The result showed that absorption rate increased by increasing of pH, contact time and mass CNTs dose. The Hg removal efficiency decreased by increasing of initial Hg concentration.The maximum and the minimum of absorption rate are 95 and 22 percent, respectively. ANOVA showed that RSM has a significant relationship for single-walled carbon nanotubes with linear conditions.

Conclusion: The study demonstrated that SWCNT-Cysteine is a well absorbent for Hg removal from aqueous solutions Therefore, it can be effective for the removal of mercury from aqueous solutions.

Keywords: Carbon Nanotubes, L-Cysteine, Mercury, Water and Wastewater treatment, Absorption

J Mazand Univ Med Sci 2014; 24(111): 10-21 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره بیست و چهارم شماره ۱۱۱ فروردین سال ۱۳۹۳ (۲۱-۱۰)

بررسی کارایی نانولوله کربنی تک جداره اصلاح شده با عامل ال-سیستئین در حذف فلز جیوه از محیط های آبی

محمدعلی زرولی[۱]
ذبیح ا... یوسفی[۱]
جمشید یزدانی چراتی[۲]
هاجر طبری نیا[۳]
فرزانه طبری نیا[۴]
بهروز اکبری آدرگانی[۵]

چکیده

سابقه و هدف: جیوه یک فلز سنگین به‌شدت سمی است که باعث صدمات عصب شناختی غیرقابل برگشت به انسان می‌شود. مواجهه بیش از حد با جیوه سبب بروز بیماری‌هایی نظیر رعشه، از دست دادن حس، کاهش بینایی و شنوایی یا رشد می‌شود. سازمان جهانی بهداشت حداکثر میزان جذب جیوه را ۰/۳ میلی‌گرم در هفته و حداکثر غلظت قابل قبول جیوه در آب را ۱ میکروگرم بر لیتر توصیه کرده است. هدف از این تحقیق حذف یا کاهش جیوه از محیط آبی با نانولوله کربنی اصلاح شده با سیستئین می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه نانولوله کربنی تک جداره به عنوان جاذب استفاده شد. متغیرهای مورد مطالعه pH محلول، زمان ماند، غلظت جیوه و جرم نانولوله کربنی می‌باشد. کلیه آزمایشات به روش استاندارد انجام شد. حجم نمونه به روش باکس بنکن تعیین گردید.

یافته‌ها: نتایج تحقیق نشان داد که راندمان جاذب در جذب آلاینده باافزایش زمان ماند، کاهش غلظت جیوه و افزایش pH افزایش می‌یابد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار جذب برای نانولوله کربنی به ترتیب ۹۵ و ۲۲ درصد می‌باشد. راندمان جذب در زمان ۱۲۰ دقیقه بیش‌ترین مقدار بود. آزمون آنالیز واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که مدل پاسخ سطحی به لحاظ آماری برای نانو لوله کربنی با شرایط خطی رابطه معنی‌داری دارد.

استنتاج: بر اساس آنالیز آزمایشات مشخص گردید که نانو لوله کربنی تک جداره اصلاح شده با ال- سیستئن یک جاذب خوب برای حذف جیوه از محیط آبی می‌باشد.

واژه های کلیدی: نانولوله کربنی، ال- سیستئین، جیوه، تصفیه آب و فاضلاب، جذب

مقدمه

فلزات سنگین از جمله آلاینده‌هایی هستند که به طور معمول در مقادیر بسیار کم در آب‌های طبیعی و در غلظت‌های بالا در فاضلاب صنایع یافت می‌شوند. وجود آن‌ها موجب آسیب به محیط‌های آبی و به مخاطره افتادن

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی شماره ۸۰- ۹۰ است که توسط معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران تامین شده است.
مولف مسئول: هاجر طبری نیا- ساری:کیلومتر ۱۸ جاده خزرآباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت E-mail: Forough_tabari85@yahoo.com
۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. استادیار، گروه آمار زیستی، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۳. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۴. کارشناس ارشد شیمی، موسسه استاندارد و تحقیقات استان مازندران، ساری، ایران
۵. مرکز تحقیقات آزمایشگاهی غذا و دارو، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تهران، ایران
تاریخ دریافت : ۱۳۹۲/۶/۴ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : ۱۳۹۲/۷/۸ تاریخ تصویب : ۱۳۹۲/۸/۷

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

حیات موجودات زنده به خصوص انسان می‌گردد(۱،۲).

آرسنیک، کادمیوم، کرم، سرب و جیوه از فلزات سمی هستند که می‌توانند در آب حل شوند. این مواد به عنوان آلاینده‌های مقدم توسط سازمان حفظ محیط زیست ایالات متحده معرفی شده اند(۳). جیوه به‌طور وسیع در صنایع تولید فشارسنج و دماسنج، صنایع کاغذ، صنایع پتروشیمی، معدن کاری، کلینیک دندان‌پزشکی و نیز محصولات آرایشی، بهداشتی و دارویی و در بخش کشاورزی استفاده می‌گردد(۶-۴). در این میان جیوه فلز به‌شدت سمی و پایدار در محیط است که باعث صدمات عصب شناختی غیر قابل برگشت در انسان می‌شود(۷). از آن‌جایی که فلز جیوه تبدیل شده به متیل جیوه و ورود زنجیره غذایی مورد مصرف انسان به خصوص ترکیبات دریایی می‌شود، برای سلامت انسان خطرناک هستند(۵). مواجهه بیش از حد با جیوه سبب بروز بیماری‌هایی نظیر مینه ماتا و آلزایمر، رعشه، از دست دادن حس، کاهش بینایی و شنوایی یا رشد می‌شود(۹).

سازمان جهانی بهداشت حداکثر میزان جذب جیوه را ۰/۳ میلی‌گرم در هفته و حداکثر غلظت قابل قبول جیوه در آب را ۱ میکروگرم بر لیتر توصیه کرده است. سازمان حفظ محیط زیست آمریکا نیز محدودیت تخلیه فاضلاب حاوی جیوه را ۱۰ میکروگرم بر لیتر تعیین کرده است(۷). بر این اساس حذف یا کاهش جیوه از آب آشامیدنی آلوده و فاضلاب خروجی صنایع امری اجتناب ناپذیر است.

فرآیندهای مختلفی هم‌چون ترسیب شیمیایی، شناورسازی الکتریکی، تعویض یون، اسمز معکوس، فرآیندهای بیولوژیکی و جذب سطحی به منظور حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته است. جذب سطحی فرآیندی است که به علت کارایی بالا و امکان بازیابی و فعال‌سازی مجدد جاذب برای حذف یون‌های فلزی از آب و فاضلاب به‌کار می‌رود(۱).

تاکنون مواد مختلفی به عنوان جاذب مورد مطالعه قرار گرفته است. از مواد پایه استفاده شده جهت تهیه جاذب مناسب برای حذف جیوه می‌توان به بادام هندی(۱۰)، جلبک‌های دریایی(۱۰)، هسته زردآلو(۱۱)، تفاله نیشکر(۱۲)، رزین(۱۳)، کیتوزان(۱۴)، خاکستر حاصل از احتراق سوخت‌ها(۱۵) و ضایعات پلاستیک(۱۶) اشاره کرد. نانو لوله‌های کربنی نیز به دلیل داشتن مساحت سطحی بالا، نفوذپذیری بالا و پایداری مکانیکی و گرمایی خوب ظرفیت بسیار بالایی برای جذب آلودگی دارند.

مکانیسم‌هایی که سبب جذب یون‌های فلزی می‌شوند بسیار پیچیده هستند و به‌نظر می‌رسد مهم ترین مکانیسم جذب هم‌کنش شیمیایی بین یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی سطح CNTs باشد(۲). نانولوله کربنی از سفت‌ترین مواد هستند و در عین استحکام بالا، بسیار انعطاف‌پذیر هستند(۱۸). نانولوله‌ها دارای اشکال و اندازه‌های مختلفی هستند و بر اساس تعداد لایه‌های اتم‌های کربن در دیواره‌شان به نانولوله‌های تک جداره و چند جداره تقسیم‌بندی می‌شوند(۱۹). این نانولوله‌ها دارای خواص بی‌نظیر مکانیکی- الکتریکی، نوری و حرارتی می‌باشند و در انواع بخش‌ها مانند مواد ذخیره‌ساز هیدروژن، ابررساناها، حس‌گرها، صنایع نساجی، مراکز تصویر برداری، افزایش ظرفیت پیل‌های سوختی، تولید ماهیچه‌های مصنوعی و از بین بردن تومورهای سرطانی کاربرد دارند(۲۰). با وجود مزایای بی‌شمار برای نانولوله‌های کربنی، مشکلاتی ازجمله هزینه بالای تولید مطرح می‌باشد که با توجه به کارایی بالای آن‌ها در جذب آلاینده، می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد(۲۱). تجمع و گرانوله شدن نانولوله‌ها در محلول نیز مکان‌های جذب آلاینده را کاهش می‌دهد که البته اصلاح خصوصیات سطحی نانولوله‌ها این مشکل را برطرف می‌کند(۱۹).

محققین توانایی نانولوله‌های کربنی در حذف فلزات سنگین نظیر سرب، نیکل، کرم، کادمیوم و آرسنیک از محیط‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. زرولی و همکاران توانایی نانو لوله‌های کربنی تک جداره و چند جداره اصلاح شده با ال- سیستئین در حذف کادمیوم از محیط آبی را مورد بررسی قرار دادند(۲۱). هدف از این

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

تحقیق، امکان‌سنجی راندمان نانو لوله‌های کربنی تک جداره اصلاح شده با ال- سیستئن در حذف جیوه از محیط آبی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نانولوله‌های کربنی تک جداره در این تحقیق از شرکت آلوریچ (Alorich) سوئیس خریداری گردید. از محلول استاندارد ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر جیوه ساخت شرکت مرک آلمان جهت تهیه محلول‌های استاندارد ۱۰۰ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر جیوه استفاده شد. سپس با استفاده از رابطه $C_1V_1= C_2V_2$ محلول‌های جیوه با غلظت‌های ۰/۱، ۵/۰۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه گردید. سنجش غلظت جیوه در نمونه‌های استاندارد و مجهول مطابق با روش‌های استاندارد آب و فاضلاب با استفاده از دستگاه جذب اتمی و رسم منحنی کالیبراسیون در طول موج ۲۵۳ نانومتر انجام شد.

جهت انجام آزمایش از ارلن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری به عنوان راکتور ناپیوسته استفاده شد. در این مطالعه تأثیر متغیرهای غلظت اولیه جیوه (۰/۱، ۵/۰۵، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر)، pH (۴، ۷/۵، ۱۱)، زمان واکنش (۱۰، ۶۵، ۱۲۰ دقیقه) و جرم جاذب (۰/۰۱، ۰/۰۵۵، ۰/۱ گرم) در راندمان حذف جیوه توسط نانو لوله‌های کربنی تک جداره بررسی گردید.

جهت اختلاط وتماس مناسب جاذب و جیوه از شیکر اربیتالی با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه استفاده گردید. تنظیم pH با استفاده از اسید سولفوریک وسود ۱ نرمال صورت گرفت. جهت جدا کردن جاذب از نمونه‌های تصفیه شده از سانتریفوژ، پمپ خلاء، قیف بوخنر و نانوفلیتر استفاده شد(۲۳). غلظت جیوه توسط دستگاه جذب اتمی WFX-210مدل RAYLEIGH با روش تکنیک تولید هیدرید جیوه قرائت گردید.

آماده سازی جاذب

نانولوله های کربنی تهیه شده از نظر ویژگی ظاهری با بسته و برگ آنالیز مربوطه مطابقت داده شد. برای اصلاح نانولوله‌های کربنی از روشLiu و همکاران استفاده شد(۲۳). به منظور افزایش جذب انتخابی نانولوله‌های کربنی در محیط آبی نسبت به یون جیوه از روش اتصال گروه عاملی استفاده شد. بدین منظور پس از توزین ۵ گرم نانولوله کربنی، آن را در ۵۰ میلی لیتر محلول به نسبت ۳ به ۱ از اسید سولفوریک به اسید نیتریک دیسپرس کرده و با سونیک کردن در مدت یک ساعت به حالت تعلیق درآورده شد. سپس ظرف حاصل در دمای ۵۰ درجه در داخل حمام آب گرم قرار داده شد به طوری که نانولوله‌ها ضمن اختلاط با یک هم‌زن مغناطیس به مدت ۸ ساعت در محیط اکسیداسیون قرار گیرند.

نانو لوله‌های حاصل با استفاده از سانتریفوژ ۱۲۰۰۰ دور از محیط جداسازی شدند و سه مرتبه با حجم ۱۰ میلی‌لیتر از آب دیونیزه شست و شو شدند. آب باقی‌مانده در مرحله آخر با وکیوم درایر خارج گردید. سپس در محلولی از تیونیل کلراید قرار گرفت. دمای محیط در طول تماس ۶۰ درجه و زمان تعادل ۲۴ ساعته با سرعت هم‌زدن ۲۰ دور در دقیقه برای آن در نظر گرفته شد. سپس برای جداسازی نانولوله‌ها از محلول تیونیل کلراید از یک مرحله دیگر سانتریفوژ استفاده شد و نانولوله‌ها برای اجرای مرحله اتصال سیستئین آماده شدند. بدین منظور ابتدا محلولی از تری‌اتیل آمین در دی متیل فرم آمید آماده گردید و محلول از ملح متیل استر سیستئین در آن تهیه گردید. سپس نانولوله‌های آماده شده در مرحله قبل به محیط اضافه شد و به کمک جریانی از گاز ازت، از تماس هوا با محیط واکنش جلوگیری گردید. پس از یک زمان توقف ۲۴ ساعته در دمای ۵۵ درجه، نانولوله‌ها جداسازی و طی سه مرحله شست و شو با آب دیونیزه، دی متیل فرم آمید و دوباره آب دیونیزه شدند. نانو لوله‌های اصلاح شده قبل از استفاده در داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شد(۲۴).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

طراحی آزمایش

بهینه‌سازی حذف جیوه با استفاده از روش پاسخ سطحی[1] با به کارگیری مدل باکس بنکن انجام شد. چهار متغیر مستقل زمان تماس، غلظت جیوه، جرم جاذب و pH در سه سطح (۱-، ۰، ۱+) مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول شماره ۱ متغیرها و سطوح مربوطه آورده شده است. تعیین دامنه متغیرها با آزمایشات مقدماتی و بررسی متون انجام گرفت. تعداد نمونه‌های آزمایش از طریق فرمول تعیین گردید.

جدول شماره ۱: چهار متغیر انتخابی در سه سطح

	متغیرهای مستقل	سطوح		
		زیاد	متوسط	کم
F1	pH	۱۱	۷/۵	۴
F2	غلظت جیوه (میلی گرم در لیتر)	۱۰	۵/۰۵	۰/۱
F3	زمان تماس (دقیقه)	۱۲۰	۶۵	۱۰
F4	جرم جاذب (گرم)	۰/۱	۰/۰۵۵	۰/۰۱

تعداد آزمایشات مورد نیاز برای مدل از رابطه $N=2K(K-1)+C$ تعیین گردید که به ترتیب N تعداد نمونه (آزمایشات)، K تعداد فاکتورها (متغیرها) و C_0 تعداد نقطه مرکزی می‌باشند. آزمایشات تعیین شده به همراه راندمان حذف در جدول شماره ۲ آورده شده است.

یک مدل بر هم کنش تقاطعی[2] برای ارزیابی داده‌های آزمایش مورد استفاده قرار گرفت جهت جلوگیری از خطای سیستمیک[3] آزمایشات به صورت تصادفی انجام شد(۲۵). ضرایب مدل برهم کنش تقاطعی تفسیرکننده میزان حذف جیوه (پاسخ) به عنوان عملکرد فاکتورهای مستقل می‌باشد. ضرایب با استفاده از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) آنالیز گردید که مقدار $p<۰/۰۵$ به عنوان سطح معنی‌داری تعیین شد. قابلیت مدل نهایی به وسیله آنالیز Numerical و Raphica با استفاده از نرم‌افزار Minitab16 مورد بررسی قرار گرفت.

جدول شماره ۲: نتایج ماتریکس طراحی آزمایش های انجام شده مطابق طرح باکس-بنکن برای حذف جیوه توسط نانولوله های کربنی تک جداره

شماره آزمایش	زمان (دقیقه)	pH	غلظت جیوه (میلی گرم در لیتر)	جرم جاذب(گرم)	درصد حذف	Qe (میلی گرم بر گرم)
۱	۱۰	۴	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۳۵	۳/۲۱
۲	۶۵	۱۱	۰/۱	۰/۰۵۵	۸۰	۰/۱۴۵
۳	۱۰	۷/۵	۱۰	۰/۰۵۵	۲۷	۴/۹۰
۴	۱۰	۱۱	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۷۵	۶/۸۹
۵	۶۵	۱۱	۵/۰۵	۰/۰۱	۷۲	۳۶/۴
۶	۶۵	۴	۰/۱	۰/۰۵۵	۳۹	۰/۰۷
۷	۱۲۰	۷/۵	۵/۰۵	۰/۰۱	۵۵	۲۷/۸
۸	۶۵	۱۱	۵/۰۵	۰/۱	۸۹	۴/۵
۹	۱۲۰	۴	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۷۵	۶/۸۹
۱۰	۱۲۰	۷/۵	۰/۱	۰/۰۵۵	۶۷	۰/۱۲
۱۱	۱۰	۷/۵	۵/۰۵	۰/۰۱	۲۵	۱۲/۷
۱۲	۱۲۰	۷/۵	۵/۰۵	۰/۱	۶۹	۳/۴۹
۱۳	۶۵	۷/۵	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۵۱	۴/۶۹
۱۴	۶۵	۴	۵/۰۵	۰/۰۱	۲۳	۱۱/۷
۱۵	۶۵	۴	۵/۰۵	۰/۱	۵۰	۲/۵۳
۱۶	۶۵	۷/۵	۱۰	۰/۰۱	۲۲	۲۲
۱۷	۶۵	۷/۵	۰/۱	۰/۰۱	۶۰	۰/۶۰
۱۸	۶۵	۷/۵	۱۰	۰/۱	۴۲	۴/۲۰
۱۹	۶۵	۱۱	۱۰	۰/۰۵۵	۶۵	۱۱/۸۱
۲۰	۱۰	۷/۵	۵/۰۵	۰/۱	۴۵	۲/۲۸
۲۱	۶۵	۷/۵	۰/۱	۰/۱	۸۱	۰/۰۸۱
۲۲	۱۰	۷/۵	۰/۱	۰/۰۵۵	۴۵	۰/۰۸۱
۲۳	۱۲۰	۷/۵	۱۰	۰/۰۵۵	۵۷	۱۰/۳۶
۲۴	۶۵	۴	۱۰	۰/۰۵۵	۳۲	۵/۸۱
۲۵	۶۵	۷/۵	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۵۱	۴/۶۹
۲۶	۱۲۰	۱۱	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۹۵	۸/۷۲
۲۷	۶۵	۷/۵	۵/۰۵	۰/۰۵۵	۵۰	۴/۶۰

1. Estimated Regression Coefficients

2. Full Quadratic Model
3. Systematic Bias

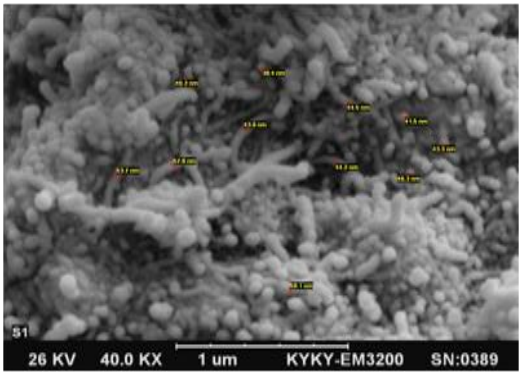
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

یافته ها

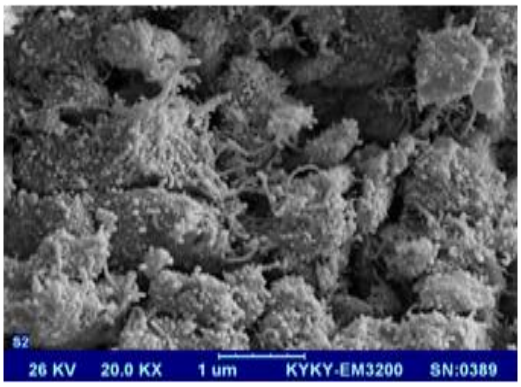
خصوصیات نانولوله ها

نانو لوله‌های کربنی استفاده شده در این تحقیق به رنگ سیاه، با درصد خلوص بالاتر از ۹۰ درصد می‌باشد که براساس مشخصات اعلام شده توسط شرکت سازنده قطر خارجی نانولوله‌ها ۲-۱ نانومتر و طول آن ۲- ۰/۵ میکرومتر می‌باشد. برای اثبات نانولوله بودن جاذب، قبل و بعد از آماده‌سازی تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) با EM-3200 مونتاژ کارخانه KYKY چین گرفته شد. تصاویر مربوطه در تصاویر شماره ۱ و ۲ آورده شده است. تصاویر مربوط به SEM با بزرگ‌نمایی ۴۰۰۰۰ و مقدار ولتاژ ۲۶۰۰۰ ولت که حداکثر این ولتاژ ۳۰ کیلو ولت است، گرفته شد. در میکروسکوپ الکترونی، الکترون به سطح نمونه تأبیده می‌شود، سپس منعکس می‌گردد و توسط دتکتورها جمع‌آوری و تبدیل به فوتون می‌گردد تا تصویر مرئی ایجاد شود. این نوع میکروسکوپ فقط از ساختار سطحی نمونه تصویر می‌دهد. بر اساس تعریف نانو(ساختار اتمی کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر)، تصاویر مربوط نانو بودن مواد را تأیید می‌نماید.

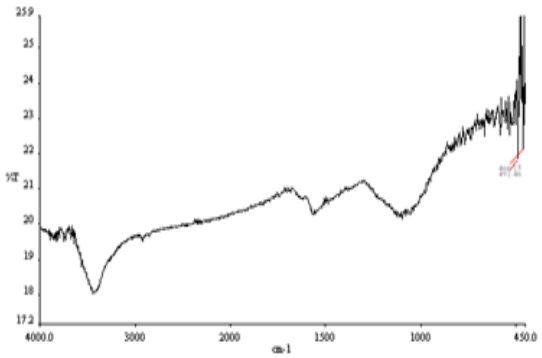
هم‌چنین به منظور اثبات و تعیین گروه های عاملی جاذب، قبل و بعد از آماده‌سازی طیف اسپکتروفتومتری مادون قرمز (FTIR) با دستگاه FT-IR Spectrometer مارک Perkin Elemer گرفته شد. تصاویر مربوطه در نمودارهای شماره ۱و۲ آورده شده است. در این نمودارها، محور عمودی میزان عبور نور (برحسب درصد) و محور افقی عدد موج (cm^{-1}) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ناحیه اول نمودار پیوندهای فلز با ترکیبات آلی می‌باشند که از دیدگاه معدنی اهمیت داشته‌اند و در بحث قرار نمی‌گیرند. پیوند C-O در ناحیه ۱۱۷۸ مربوط به اتصال سیستئین و تشکیل عامل آمیدی نوع دوم می باشد. در ناحیه ۱۶۳۷ پیوند C=O کربونیل عامل آمیدی ظاهر شده است. در ناحیه ۲۰۰۰ پیوندهای S-H هستند که به‌دلیل این که پیوندهای ضعیفی می‌باشند، نشان داده نمی‌شوند. در ناحیه ۳۰۰۰ تا ۳۲۰۰ کشش نامتقارن $C-H_2$ دیده می‌شوند. گروه کششی هیدروکسیل O-H در ناحیه ۳۴۳۵ هستند که پیوند N-H را هم‌پوشانی کرده است و دلیل بر تأیید حضور عامل کربونیل در سطح CNT می‌باشد. پهن شدن پیک از ناحیه ۲۵۰۰ به بعد نشان‌دهنده حضور گروه‌های عامل می‌باشد. در ناتو لوله‌های تک جداره اولیه تنها پیک دیده شده مربوط به پیوند N-H می‌باشد و دیگر پیک‌ها دیده نمی‌شود.



تصویر شماره ۱: تصویر SEM از نانولوله کربنی تک جداره اولیه

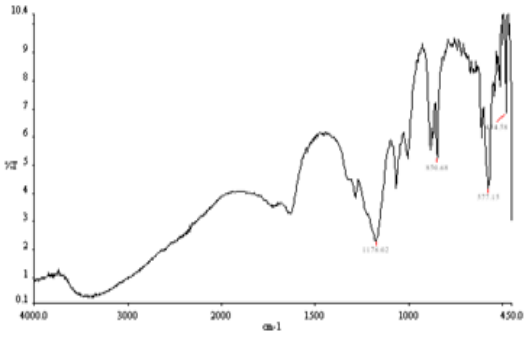


تصویر شماره ۲: تصویر SEM از نانولوله کربنی تک جداره اصلاح شده



نمودار شماره ۱: تصویر FTIR از نانولوله کربنی تک جداره اولیه

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]



نمودار شماره ۲: تصویرFTIR از نانولوله کربنی تک جداره اصلاح شده

راندمان حذف جیوه با نانولوله کربنی تک جداره

آزمایشات تحت شرایط تعیین شده توسط مدل باکس بنکن به روش استاندارد انجام و غلظت جیوه تعیین شد. نتایج آزمایشات در جدول شماره ۲ آورده شده است.

پاسخ سیستم آزمایشی بر اساس معادله شماره (۱) انجام گرفت. مدل مکعبی برای توصیف پاسخ آزمایش مطابق معادله (۱) تنظیم گردید.

بر اساس آزمون آنالیز واریانس داده‌های آزمایش که در جدول شماره ۳ به آن اشاره شده است، مدل به لحاظ آماری برای نانولوله کربنی با شرایط خطی رابطه معنی‌داری دارد.آنالیز رگرسیون چند وجهی جهت تخمین ضرایب رگرسیون بر روی داده‌های آزمایش انجام شد.

ضرایب محاسبه شده برای مدل با p-values مربوطه در جدول شماره ۴ آورده شده است. یک روش حذف معکوس به کار گرفته شد و واژه های غیر معنی‌دار به لحاظ آماری ($p > ۰/۰۵$) از مدل مکعبی حذف گردید و مدل نهایی مطابق معادله ۱ از جدول شماره ۴ به دست آمد. اختلاف مقادیر زمانی معنی‌دار است که ۵ درصد سطوح معنی‌دار باشد[1].

معادله شماره ۱: راندمان حذف جیوه با نانولوله کربنی تک جداره توسط متغیرهای معنی‌دار

$$Y= a_0+ a_1\times(pH) + a_2\times(T^2) +a_3\times (C^3) + a_4\times(M^4) + a_5\times (pH)^2$$

$$Y= 50.6667 + 18.50 \times (pH) + 13.8333 \times (T) - 10.5833\times (C) + 9.9167 \times (M) + 10.7083 \times (pH)^2$$

تأیید مدل پاسخ سطحی

ترسیم توزیعی داده‌های آزمایش در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در تصویر شماره ۳ آورده شده است که نشان دهنده قابل قبول بودن مدل می‌باشد.

تحلیل نمودار باقی مانده‌ها برای مناسبت مدل:

در تحلیل آزمایش و استفاده از مدل‌های خطی تمام کارها با داشتن فرض‌های زیر انجام می‌شود:

۱- باقی‌مانده‌ها دارای توزیع نرمال با میانگین صفرباشند.

۲- باقی مانده‌ها دارای واریانس ثابت σ^2 باشند.

۳- باقی مانده‌ها مستقل باشند.

در صورت درستی این سه فرض است که مدل انتخاب شده معتبر می‌باشد و در غیر این صورت باید:

۱- تصویر شماره ۳: نمودارهای سمت چپ، بالا و پایین، جهت بررسی نرمال بودن باقی‌مانده‌ها می‌باشند.

جدول شماره ۳: نتایج آنالیز واریانس داده های مورد آزمایش در سطوح مختلف برای نانولوله کربنی تک جداره

منبع	DF (درجه آزادی)	Seq SS (مجموعه مربعات ترتیبی)	Adj SS (مجموعه مربعات تعدیل یافته)	Adj MS	T	P
رگرسیون	۱۴	۱۰۰۹۲/۹	۱۰۰۹۲/۹	۷۲۰/۹۲	۹/۰۸	<۰/۰۰۱
خطی	۴	۸۹۲۷/۵	۸۹۲۷/۵	۲۲۳۱/۸۸	۲۸/۱۱	<۰/۰۰۱
مجذور (مربع)	۴	۹۹۹/۱	۹۹۹/۱	۲۴۹/۷۸	۳/۱۵	۰/۰۵۵
برهم کنش	۶	۱۶۶/۳	۱۶۶/۳	۲۷/۷۱	۰/۳۵	۰/۸۹۷
خطای باقیمانده	۱۲	۹۵۲/۸	۹۵۲/۸	۷۹/۴۰	–	–
عدم برازش	۱۰	۹۵۲/۱	۹۵۲/۱	۹۵/۲۱	۲۸۵/۶۳	۰/۰۰۳
خطای خالص	۲	۰/۷	۰/۷	۰/۳۳	–	–
کل	۲۶	۱۱۰۴۵/۶				

1. Note: Shade d values are statistically significant at 5% level o f significance
2. Contact Time
3. Mercury Consenttration
4. SWCNT emont

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

جدول شماره ۴: ضرایب رگرسیون مدل پاسخ سطحی برای درصد حذف جیوه توسط نانولوله کربنی تک جداره

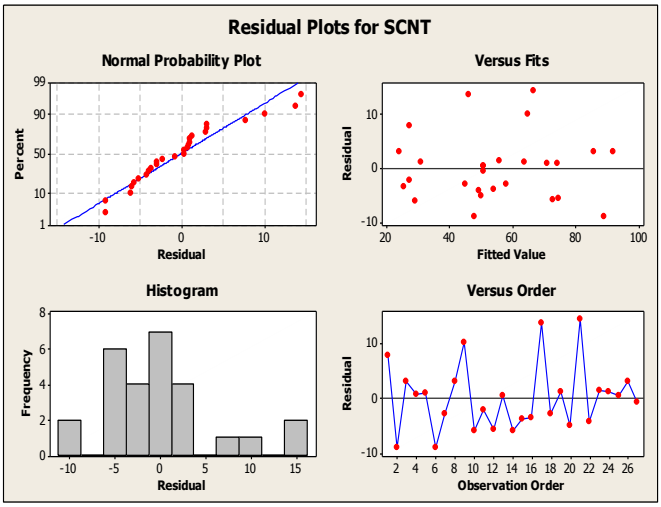
واژه	ضریب	ضریب تخمین	خطای استاندارد	T	سطح معنی داری
ضریب ثابت	A_0	۵۰/۶۶۶۷	۵/۱۴۴	۹/۸۴۹	<۰/۰۰۱
pH	A_1	۱۸/۵۰۰	۲/۵۷۲	۷/۱۹۲	<۰/۰۰۱
T	A_2	۱۳/۸۳۳۳	۲/۵۷۲	۵/۳۷۸	<۰/۰۰۱
C	A_3	-۱۰/۵۸۳۳	۲/۵۷۲	-۴/۱۱۴	۰/۰۰۱
M	A_4	۹/۹۱۶۷	۲/۵۷۲	۳/۸۵۵	۰/۰۰۲
pHpH×	A_5	۱۰/۷۰۸۳	۳/۸۵۸	۲/۷۷۵	۰/۰۱۷
		R-Sq(adj)=٪۸۱/۳۱	R-S=٪۹۱/۳۷	S=۸/۹۱۰۴۳	

در نمودار بالا P-P خط وسط نیم‌ساز ربع اول مقادیر مورد انتظار توزیع نرمال است و نقاط قرمز باقی‌مانده‌ها در صورتی که به خط نزدیک باشند بیان کننده نرمال بودن باقی‌مانده‌ها می‌باشند. در نمودار بالا انحرافی در نرمال بودن باقی‌مانده‌ها دیده نمی‌شود. نمودار پایین که هیستوگرام باقی‌مانده‌ها می‌باشد نیز همین را بیان می کند.

۲- تصویر شماره ۳: نمودار سمت راست و بالا، پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش داده شده جهت بررسی فرض ثابت بودن واریانس باقی‌مانده‌ها می‌باشد. در صورتی که در این نمودار روند خاصی دیده نشود، فرض ثابت بودن واریانس هم پذیرفته می‌شود. در نمودار بالا روند خاصی که بیان کننده زیاد شدن و یا کم شدن واریانس باشد دیده نمی‌شود، پس فرض ثابت بودن واریانس نیز پذیرفته می‌شود.

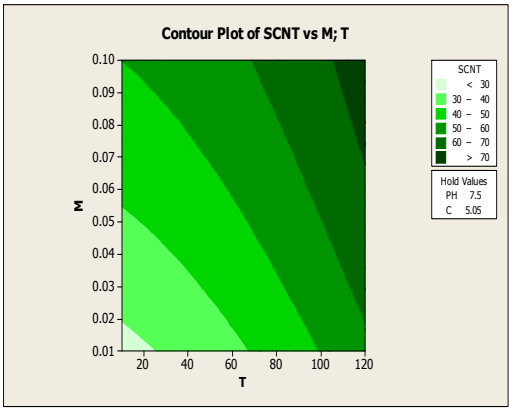
۳- تصویر شماره ۳: نمودار سمت راست و پایین، پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به ترتیب زمان جمع‌آوری داده‌ها، برای بررسی استقلال بین باقی‌مانده‌ها است. در صورت عدم مشاهده هر گونه روندی مانند سینوسی بودن در این نمودار، فرض مستقل بودن باقی‌مانده‌ها پذیرفته می‌شود. در نمودار بالا روند خاصی که بتوان با آن فرض استقلال باقی‌مانده‌ها را رد کرد مشاهده نمی‌شود. بنابراین با توجه به تحلیل نمودارهای فوق و مورد قبول واقع شدن فرض‌های موردنظر، مدل انتخاب شده برای تحلیل داده‌ها مناسب می باشد.

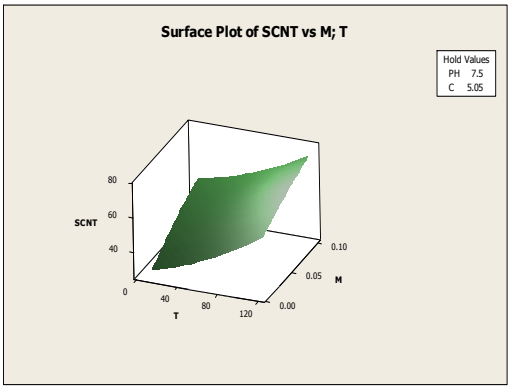
با توجه به تصاویر شماره ۴، ۵، ۶ در حذف جیوه توسط نانولوله کربنی و با توجه به معادله شماره ۱ مشخص گردید که افزایش زمان تماس، pH و میزان جاذب، اثر مثبت بر روی حذف داشته و راندمان حذف افزایش می یابد. تصویر شماره ۴ نشان دهنده افزایش راندمان حذف جیوه در مقابل افزایش زمان تماس و میزان جرم جاذب، می‌باشد. بر اساس تصویر شماره ۵ پیدا است با افزایش pH و میزان جاذب درصد حذف جیوه بیش‌تر می گردد. هم‌چنین تصویر شماره ۶ نشان می‌دهد با افزایش زمان تماس و pH، راندمان حذف افزایش می‌یابد.



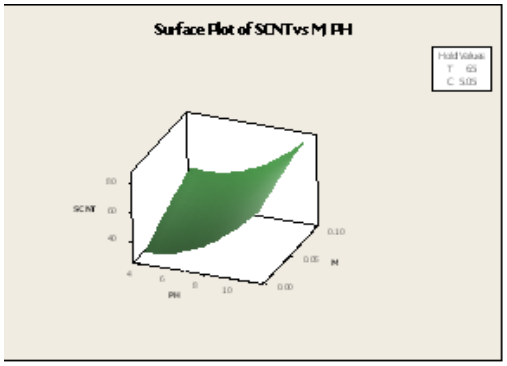
تصویر شماره ۳: ترسیم توزیعی داده های آزمایش در مقابل مقادیر پیش بینی شده برای نانولوله های کربنی تک جداره

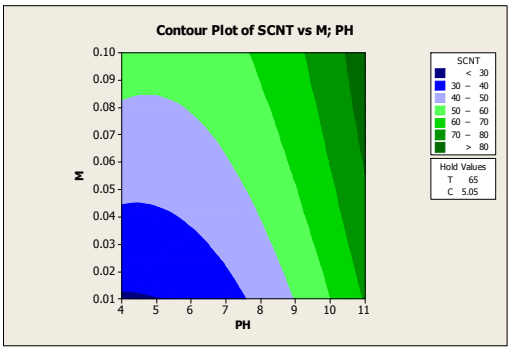
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]



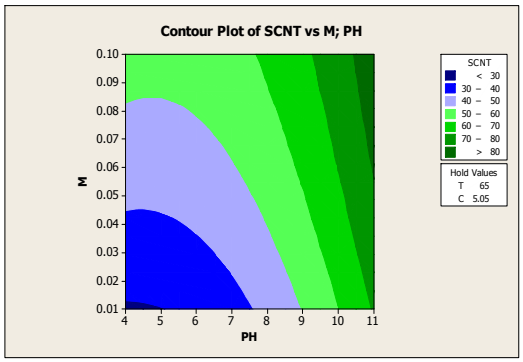


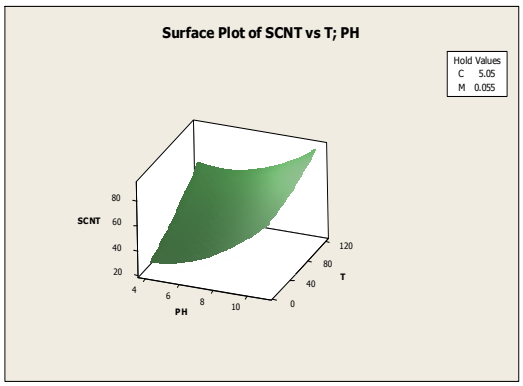
تصویر شماره ۴: ترسیم توزیعی داده های آزمایش در مقابل مقـادیر پیش بینی شده (اثر متقابل زمـان تمـاس و جرم جـاذب بـر درصـد حذف جیوه توسط نانولوله های کربنی تک جداره عامل دار شده)





تصویر شماره ۵: ترسیم توزیعی داده های آزمایش در مقابل مقـادیر پیش بینی شده (اثر متقابل جرم جاذب و pH بر درصد حذف جیوه توسط نانولوله های کربنی تک جداره عامل دار شده)





تصویر شماره ۶: ترسیم توزیعی داده های آزمایش در مقابل مقـادیر پیش بینی شده (اثر متقابل زمان تماس و pH بر درصد حذف جیـوه توسط نانولوله های کربنی تک جداره عامل دار شده)

بحث

در این مطالعه تأثیر متغیرهـای غلظـت اولیـه جیـوه، pH، زمـان واکـنش و جـرم جـاذب در رانـدمان حـذف جیوه توسط نـانو لولـه‌های کربنـی تـک جـداره بررسـی گردید. نتایج آزمایشـات نشـان داد کـه رانـدمان حـذف جیوه توسط نانولوله کربنی با افزایش pH و زمان تمـاس افزایش می‌یابد. هر چه pH به سمت قلیایی پیش می‌رود، ظرفیت جذب نانولولـه کربنـی نیـز افـزایش مـی‌یابـد. از محدوده pH برابر ۴ تا ۱۱، همراه با افزایش زمان تماس، میزان جذب جیوه بـه ازای واحـد جـرم نانولولـه کربنـی تک جداره از ۳/۲۱ به ۸/۷۲ میلی‌گرم بر گرم و راندمان حـذف از ۳۵ درصـد بـه ۹۵ درصـد افـزایش مـی یابـد. بیش‌تـرین رانـدمان حـذف در pH=۱۱ بـا غلظـت ۵/۰۵ میلی‌گرم در لیتر جیوه، زمان تماس ۱۲۰ دقیقـه و مقـدار جاذب ۰/۰۵۵ گرم معادل ۹۵ درصد و بیش‌ترین ظرفیت جذب نانولوله کربنی تک جداره برابـر ۳۶/۴ میلـی‌گـرم

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

بـر گـرم بـوده اسـت. از آن‌جـایی کـه در ایـن مطالعـه آزمایشات انجام شده بر اساس آزمایشات طراحـی شـده توسط نرم افزار بوده و همه آزمایشات در تمـام متغیرهـا انجام نشده است، در زمان ماند ۱۲۰ دقیقه با pH= ۴ نیـز راندمان نسبتاً بالایی (۷۵ درصد) توسط جـاذب داشـتیم، یعنی در pH پایین نیز راندمان حذف بالا است.

Lu و همکاران در بررسی حذف فلـز روی و نیکـل توسـط نانولولـه کربنـی تـک جـداره اصـلاح شـده بـا هیپوکلرید سدیم نشان دادند که با افزایش pH از ۱ تا ۸، میزان جذب روی افزایش یافت و در محدوده pH برابـر ۸ تا ۱۱ تقریباً ثابت ماند(۲۶،۲۵). نتـایج مطالعـه حاضـر بـا تحقیق چانگ مطابقت دارد.

در مطالعه Vukovic و همکاران گزارش شده است که بهترین میزان جذب برای نانولوله‌های کربنی اصـلاح شده با اتیلن دی آمـین برابـر ۹ و حـداکثر میـزان جـذب برای نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شـده در pH برابر ۶ تـا ۱۰ بـوده اسـت(۲۷). نتـایج ایـن تحقیـق کـه بـا افزایش pH راندمان جذب نیز افزایش پیدا کرده اسـت، مطالعه حاضر را تأیید می‌کند.

با افزایش زمان تمـاس از ۱۰ دقیقـه بـه ۱۲۰ دقیقـه، جذب جیوه بـه ازای واحـد جـرم نانولولـه کربنـی تـک جـداره از ۱۲/۷ بـه ۲۷/۸ میلی‌گـرم بـر گـرم و رانـدمان حذف از ۲۵ درصد به ۵۵ درصد افـزایش مـی‌یابـد و در شرایطی که مقدار نانولوله کربنی افزایش می‌یابد، جذب جیوه به ازای واحد جرم نانولوله کربنـی تـک جـداره از ۲/۲۸ به ۳/۴۹ میلی‌گرم بر گرم و رانـدمان حـذف از ۴۵ درصد به ۶۹ درصد افزایش می یابد. نتایج مطالعـه Lu و همکاران نشـان داد کـه بـرای تمـام آزمـایش‌هـا، میـزان جذب یون نیکل همراه با افزایش زمان تماس به سـرعت افـزایش مـی‌یابـد و سـپس بـه آرامـی بـه حالـت تعـادل مـی‌رسـد. جـذب نیکـل بـرای غلظـت‌هـای ۱۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر دسی‌متر مکعب به ترتیب در زمان تماس ۱۰ و ۱۲۰ دقیقه بـه تعـادل رسـید(۲۶). نتـایج مطالعـه کـه بـا افزایش غلظت جاذب زمـان بـیش‌تـری بـرای بـه تعـادل رسیدن میزان جذب و افزایش راندمان جذب لازم است با مطالعه حاضر مطابقت دارد.

زززولی در حذف بیس فنل A توسط کـربن فعـال و پوسته تخم مرغ نشـان داد کـه بـا افـزایش زمـان تمـاس، راندمان حذف افـزایش مـی‌یابـد و در زمـان ۱۲۰ دقیقـه بیش‌ترین حذف حاصل گشت(۲۸). نتایج مطالعه حاضـر با تحقیق زززولـی و همکـاران مطابقـت دارد. بـا افـزایش مقدار نانولوله کربنی در محلول، رانـدمان حـذف جیـوه افزایش یافته است. با افـزایش مقـدار نانولولـه کربنـی از ۰/۰۱ به ۰/۱ گرم در زمان تمـاس ۶۵ دقیقـه، pH=۷/۵ و غلظت ۵/۰۵ میلیگرم در لیتر جیوه راندمان حـذف از ۲۵ به ۴۵ درصد افزایش یافت، که این امر می‌تواند به دلیـل وجود مکان‌های جذب بیش‌تر باشد. زززولی و همکـاران در بررسی حذف کادمیوم با نانولوله کربنی تک جـداره با عامل ال- سیسـتئین نشـان دادنـد کـه بـا افـزایش جـرم جاذب تا یک مقدار مشخص جذب افـزایش مـی‌یابـد و بعد از آن جذب بیش‌تری اتفـاق نمـی‌افتـد و جـذب بـه حالت تعادل می‌رسد(۲۲).

در مطالعه Kosa و همکـاران نیـز مشـخص گردیـد که با افزایش جرم جاذب از ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ گرم، راندمان حذف کادمیوم از صفر به ۳۹ درصد، راندمان حذف فلز روی از ۶/۵۸ بـه ۹۷/۶۸، رانـدمان حـذف فلـز سـرب از ۱۹/۲۳ بـه ۹۷/۳۴ و رانـدمان حـذف مـس از ۹۹/۸۳ بـه ۹۹/۹۴ درصد افزایش یافت(۲۹). در مطالعه حاضر نیـز بـا افزایش مقدار نانولولـه کربنـی رانـدمان حـذف افـزایش یافت که با نتایج تحقیقات همکاران مطابقت دارد.

نتایج تأثیر غلظت اولیـه جیـوه بـر میـزان جـذب آن توسط نانولوله کربنی تک جداره نشان داد کـه افـزایش غلظت اولیه جیوه با فرض ثابت بودن سایر متغیرها، تأثیر معکوس بر راندمان حذف داشته است. با افزایش غلظت اولیه جیوه در محلول، میزان جیوه جـذب شـده بـه ازای جرم نانولوله کربنی افـزایش و رانـدمان حـذف کـاهش یافـت. بـا افـزایش غلظـت اولیـه جیـوه از ۰/۱ بـه ۱۰ میلی‌گرم در لیتر در در زمان تمـاس ۱۰ دقیقـه، pH=۷/۵

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

و مقدار جاذب ۰/۰۵۵ گرم راندمان حذف از ۴۵ به ۲۷ درصد کاهش و در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه، pH=۷/۵ و مقدار جاذب ۰/۰۵۵ گرم راندمان حذف از ۶۷ به ۵۷ درصد کاهش یافت.

Hu و همکاران در بررسی حذف کرم با استفاده از نانولوله کربنی از محلول‌های آبی نشان داند که درصد حذف کرم با افزایش غلظت اولیه آن در محلول کاهش می‌یابد(۳۰).

نتایج تحقیق با مطالعه حاضر مطابقت دارد. هم‌چنین زرولی و ویسی در حذف بیس فنل A توسط کربن فعال و پوسته تخم مرغ نشان دادند که مدل پاسخ سطحی برای تحقیق مناسب بوده است(۲۵). در مطالعه حاضر نیز مشخص گردید که مدل پاسخ سطحی برای این آزمایش مناسب می‌باشد و با تحقیق زرولی و ویسی مطابقت دارد. افزایش زمان تماس، pH و میزان جاذب اثر مثبت بر روی حذف داشته و راندمان حذف افزایش می‌یابد. نانولوله کربنی تک جداره اصلاح شده به‌علت داشتن سطح تماس بالا و نفوذ پذیری بالا، یک جاذب خوب برای حذف جیوه می‌باشد که با افزایش زمان تماس، pH و میزان جاذب راندمان حذف افزایش می‌یابد.

سپاسگزاری

هزینه این تحقیق از گرنت تحقیقاتی اعطای بنیاد ملی نخبگان به دکتر محمدعلی زرولی تأمین شده است. بدین‌وسیله از بنیاد ملی نخبگان به خاطر اعطای گرنت تحقیقاتی و کارکنان بخش نانوتکنولوژی مرکز تحقیقات آزمایشگاهی غذا و دارو وزارت بهداشت به‌خاطر اصلاح نانو لوله‌ها صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد. لازم به ذکر است این مقاله بخشی از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط خانم هاجر طبری‌نیا می‌باشد.

References

1. Boparai HK, Joseph M, O'Carroll DM. Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nanozerovalent iron particles. J Hazard Mater 2010, doi: 10.1016/j.hazmat.2010.11.029.
2. Wang K, Xing B. Mutual effects of cadmium and phosphate on their adsorption and desorption by goethite. Environmental Pollution 2004; 127(1): 13-20.
3. Wang FY, Wang H, Ma JW. Adsorption ofcadmium (II) ions from aqueous solution bya new low-cost adsorbent-Bamboo charcoala new low-cost adsorbent-Bamboo charcoal. Journal of Hazardous Materials 2010; 177 (1-3): 300-306.
4. Girginova PI, Daniel-da-silvia AL, Lopes CB, Figueira P, Otero M, Amaral VS, et al. Silica coated magnetite particles for magnetic, Removal of Hg^{+2} from water. Journal of Colliod and Interface Science 2010; 345(2): 234-240.
5. Li P, Feng XB, Qiu GL, Shang LH, Li ZG. Mercury pollution in Asia: A review of the contaminated sites. Journal of Hazardous Materials 2009; 168(2-3): 591-601.
6. Zhu J, Deng B, Yang J, Gang D. Modifying activated carbon with hybrid ligands for enhancing aqueous mercury removal. Carbon 2009; 2009; 47(8): 2014-2025.
7. Chen X, Feng X, Liu J, Fryxell GE, Gong M. Mercury separation and immobilization using self assembled monolayers on mesoporous supports. SAMMS, Sep Sci Technol 1999; 34(6-7): 1121-1132.
8. Bailey SE, Olin TJ, Bricka RM, Adrian DD, A review of potentially low-cost sorbents. Water Research 1999; 33(11): 2469-2479.
9. Gibicar D, Horvat M, Logar M, Fajon V,

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

Falnoga I, Ferrara R. Human exposure to mercury in the vicinity of chlor-alkali plant. Environment Research 2009; 109(1): 355-367.

10. Stephen Inbaraj B, Sulochana N. Mercury adsorbtionon a carbon sorbent derived from fruit shell of terminaliacatappa. Journal of Hazardous Material 2006; 133(1-3): 283-290.
11. Herrero R, Lodeiro P, Castro CR, Vilarin T, Vicente MESD. Removal of organic mercury from aqueous solutions biomass of the marine macroalgaCystoseirabaccata. Water Research 2005; 39(14): 3199-3210.
12. Ekinci E, Budinova T, Yardim F, Petrov N, Razvigorova M, Minkova V. Removal of mercury ion from aqueous solutions by activated carbons obtained from biomass and coals. Fuel Processing Technology 2002; 77-78(1): 437-443.
13. Krishnan KA, Anirudhan TS. Removal of mercury (II) from aqueous solutions and chlor-alkali industry effluent by steam activated and sulphurised activated carbons prepared from bagasse: ineticsans equilibrium studies. Journal of Hazardous Material 2002; 92(2): 161-183.
14. Chiarle S, Ratto M, Rovatti M. Mercury removal from water by ion exchange resins adsorption. Water Res 2000; 34(11): 2971-2978.
15. Jeon C, Holl WH. Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal. Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal. Water Research 2003; 37(9): 4770-4780.
16. Yardim F, Budinova T, Ekinci E, Petrov N, Razvigorova M, Minkova V. Removal of mercury (II) from aqueous solutions by activated carbons obtained from furfural. Chemosphere 2003; 52(5): 835-841.
17. Skodras G, Diamantopoulou I, Zabaniotou A, Stavropoulos G, Sakellaropoulos GP. Enhanced mercury adsorption in activated carbons obtained from biomss materials and waste tires. Fuel Processing Technology 2007; 88(8): 749-758.
18. Tuzen M, Saygi K, Soylak M. Solid phase extraction of heavy metal ions in environmental samples on multiwalled carbon nano tubes. Journal of Hazardous Materials 2008; 152(2008): 632-639.
19. Ren X, Chen C, Nagatsu M, Wang X. Carbon nanotubes as adsorbents in environmental pollution management: A review. Chemical Engineering Journal 2010; 170(2-3): 395-410.
20. Shamspur T, Mostafavi A. Application of modified multiwalled carbon nanotubes as a sorbent for simultaneous separation and preconcentration trace amounts of Au (III) and Mn (II). Journal of Hazardous Materials 2009; 168(2009): 1548-1553.
21. Tofighy MA, Mohammadi T. Permanenthard water softening using carbon nanotube. Sheets Desalination 2011; 268(1-3): 208-213.
22. Zazouli MA, Yousefi Z, Taghavi M, Akbari B, Yazdani J. Cadmium removal from aqueous solutions using L-Cysteine functionalized Single-walled Carbon Nanotubes. J Mazand Univ Med Sci 2013; 23(98): 37-47 (Persian).
23. Yan-hui L, Ze-chao D, Zhao-kun L. Removal of heavy metal from aqueous solutions by carbon nanotubes: adsorption equilibrium and kinetic. Journal of Environmental Sciences 2004; 16(2): 208-211.
24. Liu Y, Li Y, Yan XP. Preparation, Characterization and application of L-Cysteine functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes as a selective sorbent for

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]

separation and preconcentration of Heavy Metals. Advanced Functional Materials 2008; 18(10): 1536-1543.

25. Lu C, Chiu H. Adsorption of zinc (II) from water with purified carbon nanotubes. Chemical Engineering Journal 2006; 61(4): 1138-1145.
26. Lu Ch, Liu Ch. Removal of Nikel (II) from aqueous solution by carbon nanotubes. Chem Technol Biotechnol 2006; 81(12): 1932-1940.
27. Vukovic GD, Marinkovic AD, Colic M, Ristic MD, Alesksic R, Peric-Grujic AA, et al. Removal of cadmium from aqueous solutions by oxidized and ethylenediamine functionalized multi-walled carbon nanotubes. Chemical Engineering Journal 2010; 157(2010): 238-248.
28. Zazouli MA, Veisi F. Modeling Bisphenol A Removal from Aqueous Solution by Activated Carbon and Eggshell. J Mazand Univ Med Sci 2013; 23(Suppl-2): 129-138 (Persian).
29. Kosa SA, Al-Zahrani G, Abdel Salam M. Removal of heavy metals from aqueous solutions by Multi-walled Carbon Nanotubes modified with 8-hydroxyquionline. Chemical Engineering Journal 2012; 181-182(0): 159-168.
30. Hu J, Chen Ch, Zhu X, Wang X. Removal of Chromium from aqueous solution by using oxidized Multi-walled Carbon Nanotubes. Journal of Hazardous Materials 2009; 162 (2-3): 1542-1550.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-27]