

بررسی کارایی نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 جهت حذف ۴-کلروفنل از محلول‌های آبی

محمدملکوتیان^{۱*}، حکیمه مهدی زاده^۲

(۱) مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
(۲) گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱۵

چکیده

مقدمه: ۴-کلروفنل ماده‌ای سمی و خورنده است. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا این ماده را جزو آلاینده‌های دارای اولویت گزارش نموده است. این تحقیق با هدف بررسی کارایی نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 جهت حذف ۴-کلروفنل از محلول‌های آبی انجام گردید.

مواد و روش‌ها: تحقیق حاضر یک مطالعه تجربی است که در نیمه اول سال ۱۳۹۳ در مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی کرمان انجام گردید. ابتدا نانولوله‌های کربنی چند جداره با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 اکسید شد سپس فاکتورهای موثر بر حذف ۴-کلروفنل شامل غلظت اولیه ۴-کلروفنل، زمان تماس، مقدار جاذب و pH مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در شرایط بهینه حذف با محلول واقعی فاضلاب صنعت زغال‌شویی که کیفیت آن تعیین شده بود نیز آزمایش شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط نرم افزار SPSS-16 و آزمون آماری پیرسون انجام گردید.

یافته‌های پژوهش: ۹۱/۸٪ راندمان حذف ۴-کلروفنل در شرایط بهینه شامل pH: ۷، زمان تماس: ۱۰ دقیقه، مقدار جاذب: ۰/۳ گرم و غلظت اولیه ۴-کلروفنل: ۱۵ میلی گرم بر لیتر حاصل شد. بررسی معادلات سینتیک و ایزوترم، نشان داد که فرایند جذب از سینتیک درجه دوم و ایزوترم فروندلیچ تبعیت می نماید.

بحث و نتیجه گیری: نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 جاذب مناسبی برای حذف ۴-کلروفنل از محلول‌های آبی بوده و قادر است با راندمان ۷۸٪ این ماده را از فاضلاب واقعی حذف نماید، بنابراین می تواند به عنوان یک جاذب موثر برای تصفیه آب و فاضلاب‌های آلوده به این آلاینده بکار رود.

واژه‌های کلیدی: نانولوله‌های کربنی، جذب سطحی، ۴-کلروفنل، ایزوترم جذب

* نویسنده مسئول: مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران

Email: m.malakootian@yahoo.com

Copyright © 2017 Journal of Ilam University of Medical Science. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution international 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits copy and redistribute the material, in any medium or format, provided the original work is properly cited.

مقدمه

فنل و مشتقات آن محصولات طبیعی حاصل از تجزیه گیاهان و حیوانات می باشند (۱). ترکیبات فنلی در غلظت‌های مختلف از بسیاری از صنایع نظیر: پتروشیمی، تولید زغال، لاستیک سازی، کاغذ، پلاستیک، پالایشگاه‌ها، آهن، فولاد، آلومینیوم، چرم و همچنین تولید رزین‌های فنلی و... وارد محیط زیست می گردند (۲-۵). تقریباً تمامی ترکیبات فنلی سمی بوه و ماهیت سرطان زایی برخی از آنها به اثبات رسیده است. همچنین این ترکیبات با ورود به زنجیره غذایی انسان سبب بروز مشکلات بهداشتی و سلامتی می شوند (۱). ۴-کلروفنل با فرمول شیمیایی C_6H_5OCl یکی از انواع کلروفنل‌هایی است که در آن کلر جایگزین هیدروژن شماره ۴ در حلقه بنزنی فنل شده است. این ماده از طریق پوست، تنفس و گوارش وارد بدن می شود و به عنوان یک ماده شیمیایی سمی و خورنده سبب تحریک و سوزش چشم، پوست، بینی، افزایش سرفه و مشکلات تنفسی می شود. تماس طولانی مدت با این ماده سبب سردرد، خستگی، بی قراری، اثر بر کبد و کلیه، ضعف عضلانی، تهوع و در نهایت اغما و مرگ می شود (۶). سازمان حفاظت محیط زیست امریکا ترکیبات فنلی را جزو آلاینده‌های دارای اولویت معرفی نموده است و استاندارد ۱ میلی گرم بر لیتر را برای این ترکیبات جهت تخلیه به منابع آبی تعیین کرده است (۳). بنابراین فاضلاب‌های آلوده به ترکیبات فنلی باید قبل از تخلیه به منابع پذیرنده تصفیه گردند.

تصفیه بیولوژیکی (۷)، اکسیداسیون شیمیایی (۸، ۶) و روش‌های الکتروشیمیایی (۳) مهمترین روشهای حذف فنل و ترکیبات فنلی از فاضلاب هستند. مشکلاتی نظیر هزینه بالا، راندمان پایین و تولید محصولات جانبی سمی و خطرناک فاکتورهای محدود کننده برای کاربرد بعضی از این روشها هستند (۱، ۲). کاربرد نانوفناوری در تصفیه آلاینده‌های موجود در صنعت آب و فاضلاب با توجه به سهولت کاربرد و اقتصادی بودن آن، در مقایسه با روشهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی متداول توسعه بیشتری داشته است (۹-۱۱). در اوایل سال ۱۹۹۰ نانولوله‌های کربنی توسط Iijima کشف

شد (۱۲). نانولوله‌های کربنی که شامل نانولوله‌های تک جداره و نانولوله‌های چند جداره می باشند به دلیل دارا بودن خصوصیات حرارتی، الکتریکی و مکانیکی منحصر به فردشان بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (۹، ۱۰، ۱۳). این مواد با دوام و در برابر گرما مقاوم هستند و تمیز کردن و استفاده مجدد از آنها ساده است. سطح مقطع وسیع، خلل و فرج بالا و ساختار لایه‌ای این نانولوله‌های کربنی، آن را به جاذبی موثر برای حذف انواع ترکیبات خطرناک همچون ناخالصی‌های کاتیونی و آنیونی، آلی و معدنی تبدیل نموده است (۱۰، ۱۳).

تحقیقات انجام شده نشان می دهد که اصلاح شیمیایی نانولوله‌های کربنی با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 یا HNO_3 منجر به افزایش غلظت گروه‌های عاملی کربونیل و کربوکسیل در سطح نانولوله‌ها می شود. اصلاح نانولوله‌های کربنی با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 می تواند تراکم بالاتری از گروه‌های عاملی را نسبت به HNO_3 به تنهایی ایجاد نماید (۱۴-۱۶).

نتایج مطالعه لیو و همکاران در چین نشان داد که نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده با اسید نیتریک و اکسید شده با ترکیب اسید نیتریک و پرمنگنات پتاسیم، در مقایسه با نانولوله‌های کربنی خام، پتانسیل بالاتری جهت حذف کادمیوم از محلول‌های آبی دارند (۹). نتایج مطالعه شنگ و همکاران در چین نشان داد غلظت گروه‌های عاملی در سطح نانولوله‌های کربنی چند جداره اسیدی شده نسبت به نانولوله‌های خام به میزان قابل توجهی افزایش یافته و در نتیجه میزان جذب ترکیبات اروماتیک (فنل، نفتیلامین، نفتول) نیز افزایش یافت (۱۷). تحقیق انجام شده توسط بذرافشان و همکاران در ایران نشان داد که اکسید کردن نانولوله‌های کربنی تک دیواره با اسید نیتریک می تواند ۴۰۲ درصدی کلروفنوکسی استیک اسید را با راندمان بالای ۹۰ درصد از محلول‌های آبی حذف نماید (۱۸). همچنین تحقیقات انجام شده جهت حذف بنزوآپیرن سرطان زا توسط ذاکری و همکاران در ایران (۱۹)، حذف رنگزای مستقیم آبی ۸۶ توسط قبادی و همکاران در ایران (۱۳)، حذف مس توسط مبارک در مالزی (۲۰) و حذف سرب توسط ملکوتیان و همکاران در ایران (۲۱) ا

استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح شده موفقیت آمیز بوده است.

مطالعات فوق نشان دهنده پتانسیل بالای نانو لوله‌های کربنی در حذف آلاینده‌های مختلف از منابع آبی می باشد. بنابراین از این لوله‌ها می توان برای حذف ترکیبات فنلی از منابع آبی آلوده شده توسط فعالیت‌های صنعتی استفاده نمود. از این رو هدف از این تحقیق، تعیین راندمان حذف ۴-کلروفلنل از محلول‌های آبی توسط نانو لوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 و تعیین اثر پارامترهایی نظیر pH، زمان تماس، مقدار نانولوله‌های کربنی و غلظت اولیه ۴-کلروفلنل بر فرایند جذب بود.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر یک مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی است که در نیمه اول سال ۱۳۹۳ در مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان انجام شد.

نانولوله‌های کربنی چند جداره مورد استفاده در این تحقیق از پژوهشگاه صنعت نفت ایران خریداری شد. این نانولوله‌ها دارای سطح ویژه: $270 \text{ m}^2/\text{g}$ ، طول: $10 \mu\text{m}$ ، قطر: $30-100 \text{ nm}$ بودند. مورفولوژی نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش عکس برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscope) در شکل ۱ نشان داده شده است.

۴-کلروفلنل مورد استفاده در این مطالعه با خلوص $99/8$ درصد از شرکت مرک آلمان خریداری شد. همه محلول‌های سنتتیک مورد استفاده در این مطالعه با آب دوبار تقطیر تهیه شدند. pH محلول توسط محلول اسیدسولفوریک $0/1$ نرمال و هیدروکسید سدیم $0/1$ نرمال تنظیم شد و جهت پخش جاذب در محلول از شیکر با سرعت ثابت 200 RPM استفاده شد.

جهت اکسید نمودن نانولوله‌ها ابتدا اسید نیتریک و اسید سولفوریک غلیظ را به نسبت ۳ به ۱ با هم مخلوط نموده و به حجم ۸ میلی لیتر رساندیم. ۱۰۰ میلی گرم نانولوله کربنی به محلول اضافه شد. مخلوط در دمای 70 درجه سانتی گراد به مدت ۸ ساعت بدون هم زدن

توسط دستگاه تقطیر برگشتی جوشانده شد. نمونه در دمای اتاق خنک شده و قطره قطره به 200 میلی لیتر آب مقطر اضافه شد. مواد جامد اسیدی شده توسط فرآیند سانتریفوژ جدا شدند و مجدداً با آب مقطر شستشو شدند. عمل سانتریفوژ و شستشو تا رسیدن به pH خنثی ادامه یافت. نمونه در کوره در دمای 100 درجه سانتی گراد خشک شد و تحت عنوان نانولوله کربنی اکسید شده نام گذاری شد (۱۴).

جهت تعیین گروه‌های عاملی بر روی سطح نانولوله‌ها از طیف سنجی مادون قرمز (Fourier transform infrared spectroscopy [FT-IR: 6300, Japan]) استفاده شد.

به منظور بررسی اثر و کارایی هریک از فاکتورهای pH برابر با ۳، ۵، ۷، ۱۰، زمان تماس: ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ دقیقه، مقدار جاذب ($0/5$ ، $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ گرم بر 100 میلی لیتر) غلظت اولیه ۴-کلروفلنل: ۱۵، ۳۰، ۵۰، ۸۰ میلی گرم بر لیتر و به دست آوردن مقادیر بهینه هر متغیر، آزمایش‌ها با تغییر هر فاکتور موثر در مقادیر متفاوت و با ثابت نگه داشتن سایر فاکتورها در مقدار بهینه انجام گردید. برای افزایش ضریب اطمینان و صحت و دقت آزمایش‌ها ۲ بار تکرار صورت گرفت.

بعد از انجام فرایند جذب، حجم معینی از محلول برداشته و فوراً سانتریفوژ شد. غلظت باقیمانده ۴-کلروفلنل محلول در طول موج بیشینه 280 نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر دو پرتویی مرئی-فرابنفش (UV/Vis) مدل shimadzu 1800 اندازه گیری شد. سپس کیفیت نمونه واقعی فاضلاب صنعت زغال شویی تعیین گردید و میزان حذف ۴-کلروفلنل در شرایط بهینه آزمایش شد.

ظرفیت تعادلی جذب (q_e): بیان کننده مقدار ۴-کلروفلنل جذب شده روی نانولوله‌های کربنی اکسید شده برای محلول‌های سنتتیک و واقعی می باشد که با استفاده از فرمول ۱ محاسبه شد (۱۸، ۲۲).

$$(1) \quad q_e = \frac{(c_0 - c_t)v}{m}$$

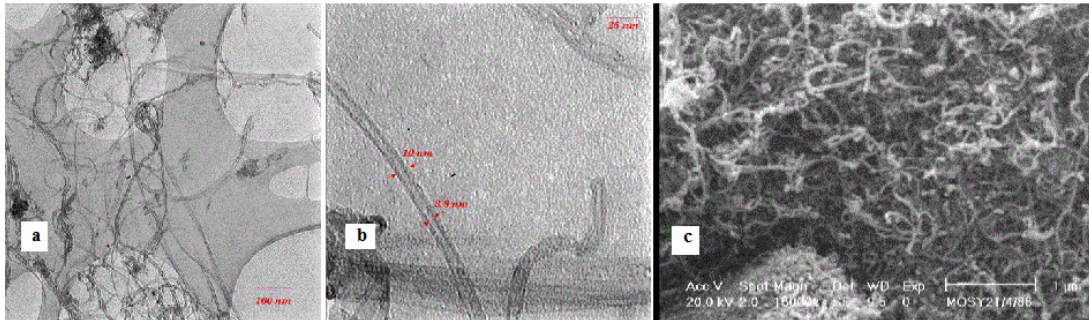
C_0 و C_t غلظت ۴-کلروفلنل در محلول (mg/L) در time = 0 و t، حجم محلول (L) و m جرم جاذب خشک شده اضافه شده به بطری‌ها (g) می باشند.

(۲۳). سپس ایزوترم‌های جذب محاسبه و درجه واکنش تعیین گردید. تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار SPSS-16 و آزمون آماری همبستگی پیرسون انجام شد.

راندمان حذف ۴-کلروفنل در محلول‌های سنتتیک و واقعی با استفاده از فرمول ۲ محاسبه شد (۱۸، ۲۲).

$$(۲) \quad R = \frac{(c_0 - c_t)}{c_0} \times 100$$

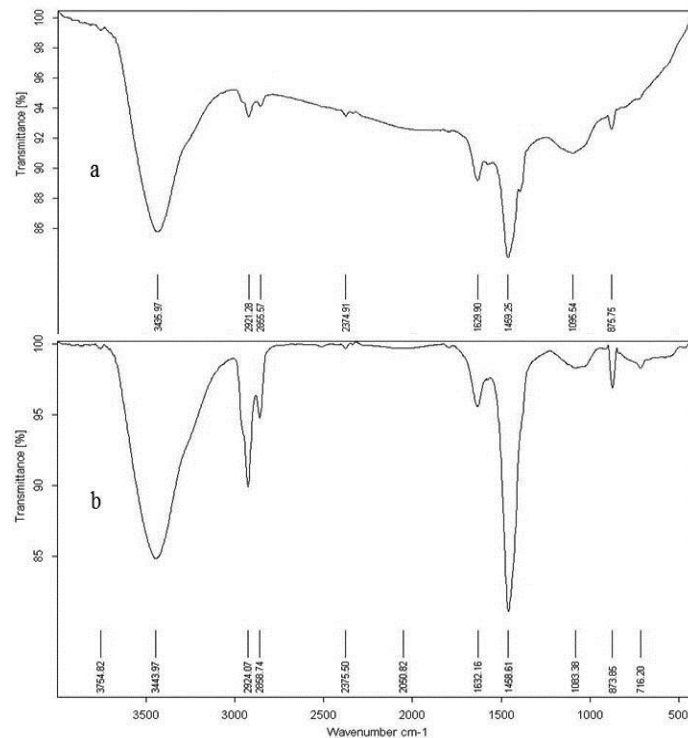
آزمایشات بر اساس روش‌های مندرج در کتاب استانداردهای آب و فاضلاب ویرایش بیستم انجام شد



شکل ۱: a, b تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و c تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، از نمونه نانولوله‌های کربنی چند جداره

طیف FTIR نانوله‌های کربنی چند جداره اصلاح شده و اصلاح نشده در محدوده $5000-4000 \text{ cm}^{-1}$ مورد مطالعه قرار گرفت نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است.

یافته‌های پژوهش تعیین گروه‌های عاملی موجود در سطح نانولوله‌ها



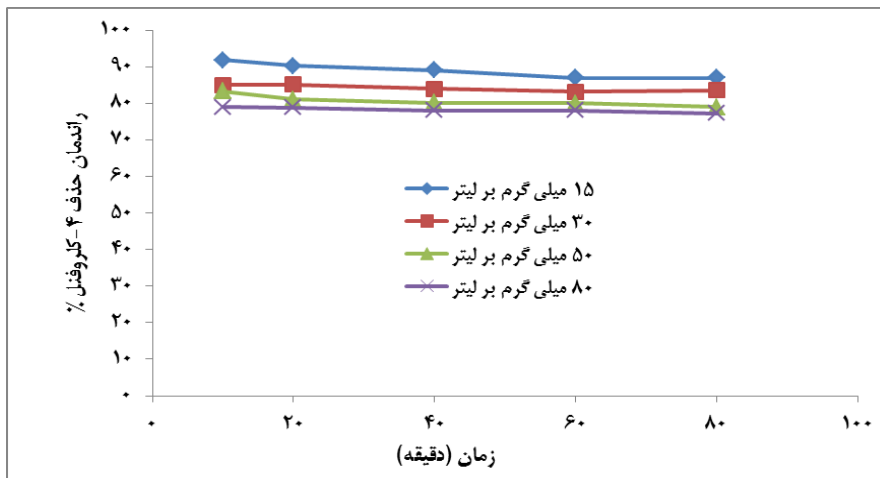
شکل ۲: طیف FTIR نانولوله‌های کربنی چند جداره قبل از اصلاح (a) و اکسید شده با مخلوط $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ (b)

تأثیر غلظت اولیه ۴-کلروفلن

تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفلن توسط نانولوله‌های کربنی اکسید شده در غلظت‌های متفاوت ۴-کلروفلن

شکل ۳ نشان داده شده است.

در مقدار ثابت نانولوله‌های کربنی با افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفلن از ۱۵ میلی گرم بر لیتر به ۸۰ میلی گرم بر لیتر میزان راندمان حذف از ۹۱/۸٪ به ۷۹٪ کاهش یافت. با افزایش زمان تماس از ۱۰ دقیقه تا ۸۰ دقیقه در راندمان حذف تغییر چشمگیری ایجاد نشد و مقداری کاهش یافت. غلظت بهینه ۴-کلروفلن: ۱۵ میلی گرم بر لیتر در شکل ۳ نشان داده شده است.

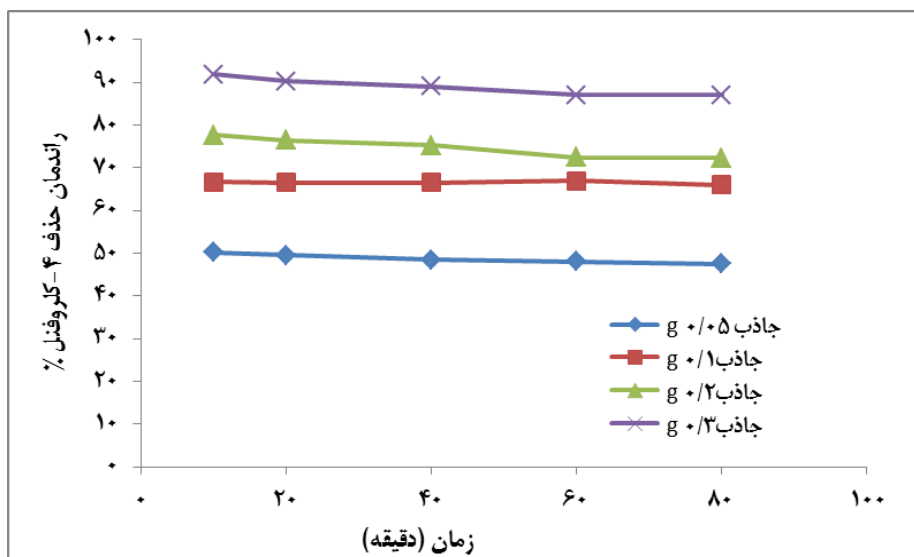


شکل ۳: تأثیر غلظت اولیه ۴-کلروفلن در راندمان حذف (جاذب: ۰/۳ g، pH: ۷)

تأثیر مقدار نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده

تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفلن در برابر غلظت‌های متفاوت نانولوله‌های کربنی اکسید شده (۰/۳-۰/۰۵) گرم بر ۱۰۰ میلی لیتر) با افزایش زمان تماس در pH: ۷، غلظت ۴-کلروفلن: ۱۵ میلی گرم بر لیتر در شکل ۴ نشان داده شده است.

با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۵ گرم به ۰/۳ گرم بازده حذف ۴-کلروفلن از ۵۰/۲٪ به ۹۱/۸٪ افزایش یافت. با افزایش زمان تماس از ۱۰ دقیقه تا ۸۰ دقیقه در راندمان حذف تغییر چشمگیری ایجاد نشد و مقداری کاهش یافت. بنابراین مقدار جاذب ۰/۳ گرم و زمان تماس ۱۰ دقیقه به عنوان بهینه انتخاب شد.



شکل ۴: تأثیر مقادیر نانولوله‌های کربنی بر روی راندمان حذف ۴-کلروفلن (pH: ۷، ۱۵ mg/L)

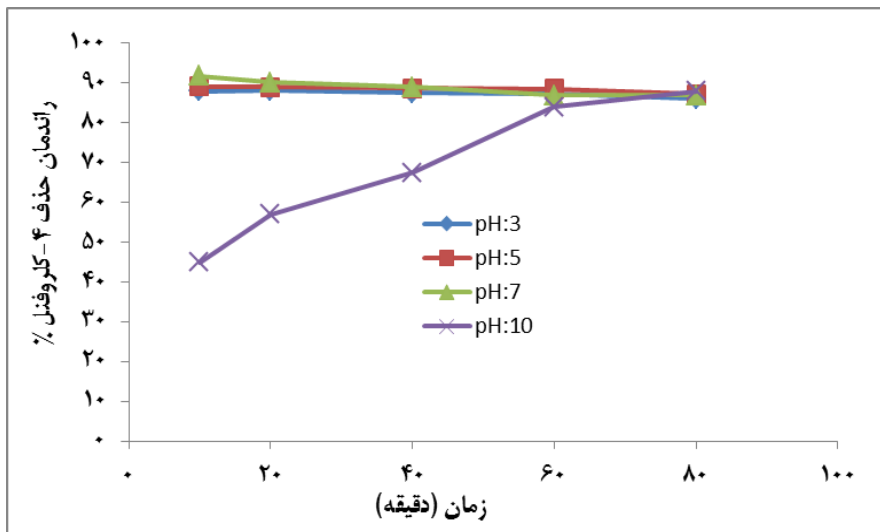
با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۵ گرم به ۰/۳ گرم بازده حذف ۴-کلروفلن از ۵۰/۲٪ به ۹۱/۸٪ افزایش یافت. با افزایش زمان تماس از ۱۰ دقیقه تا ۸۰ دقیقه در راندمان حذف تغییر چشمگیری ایجاد نشد و مقداری کاهش یافت. بنابراین مقدار جاذب ۰/۳ گرم و زمان تماس ۱۰ دقیقه به عنوان بهینه انتخاب شد.

با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۵ گرم به ۰/۳ گرم بازده حذف ۴-کلروفلن از ۵۰/۲٪ به ۹۱/۸٪ افزایش یافت. با افزایش زمان تماس از ۱۰ دقیقه تا ۸۰ دقیقه در راندمان حذف تغییر چشمگیری ایجاد نشد و مقداری کاهش یافت. بنابراین مقدار جاذب ۰/۳ گرم و زمان تماس ۱۰ دقیقه به عنوان بهینه انتخاب شد.

تأثیر pH

غلظت ۴-کلروفنل ۱۵ میلی گرم بر لیتر در شکل ۵ نشان داده شده است.

تغییرات راندمان حذف ۴-کلروفنل با افزایش زمان تماس در مقادیر ۱۰، ۵، ۷، ۳، pH: مقدار جاذب ۰/۳ گرم،



شکل ۵: تأثیر pH اولیه در راندمان حذف ۴-کلروفنل (جاذب: ۰/۳ g، ۴-کلروفنل: ۱۵ mg/L)

تأثیر تداخل آلاینده‌ها

در جدول ۱ نتایج آنالیز کیفیت فاضلاب صنعت زغال شویی و راندمان حذف ۴-کلروفنل در شرایط بهینه ذکر شده است.

افزایش pH محلول از ۳ به ۷ در راندمان حذف ۴-کلروفنل روی نانولوله‌های کربنی اکسید شده نوسانات کمی داشت و تقریباً ثابت باقی ماند. در pH بالای ۷ راندمان حذف کاهش یافت. بنابراین pH: ۷ به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.

جدول ۱: نتایج آنالیز کیفیت نمونه فاضلاب صنعت زغال شویی و میزان حذف ۴-کلروفنل در شرایط بهینه

آنالیز	نتایج
pH	۳/۷
COD (mg/L)	۲۹۱
BOD ₅ (mg/L)	۲۵
T. D. S (mg/L)	۲۸۹۳
T. S. S (mg/L)	۱۳۶
PO ₄ ⁻³ (mg/L)	۶
SO ₄ ⁻² (mg/L)	۹۵۲
هدایت الکتریکی (μS/cm)	۳۰۴۰
کدورت (N. T. U)	۳۳
میزان حذف ۴-کلروفنل از فاضلاب*	٪۷۸

* میزان حذف ۴-کلروفنل از فاضلاب در شرایط بهینه pH: ۷، زمان تماس: ۱۰ دقیقه، مقدار جاذب: ۰/۳ g

ایزوترم و سینتیک فرایند جذب

ضرایب ثابت و ضرایب همبستگی ایزوترم‌های جذب فروندلیچ و لانگمویر در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: میزان پارامترهای ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ (pH: ۷، زمان: ۱۰ min، جذب: ۰/۳ gr)

ایزوترم فروندلیچ			ایزوترم لانگمویر			
R^2	$K_f \left[\left(\frac{mg}{g} \right) \left(\frac{1}{mg} \right) \right]$	$\frac{1}{n}$	R^2	R_1	$q_m \left(\frac{mg}{g} \right)$	$K_L \left(\frac{1}{mg} \right)$
۰/۹۸۹۳	۳/۸۸	۰/۵۸۸۲	۰/۸۹۵۴	۰/۴۰۱ ۰/۲۵۱ ۰/۱۶۷ ۰/۱۱۱	۳۲/۳۶	۰/۰۹۹۳

فرایند جذب از ایزوترم فروندلیچ تبعیت نمود.

سینتیک فرایند حذف ۴-کلروفنل توسط نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی سینتیک درجه یک (q_e) ظرفیت تعادلی جذب برابر با ۱/۰۰۱۹ mg/g و (R^2) ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۲۲ و (K_1) ثابت سرعت برابر با min^{-1} ۰/۰۰۰۸ حاصل شد. در بررسی سینتیک درجه ۲ (q_e) ظرفیت تعادلی جذب برابر با ۴/۳۰۱ mg/g و (R^2) ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۹۹۹ و (K_2) ثابت سرعت برابر با ۰/۰۵۴۰ (g/mg.min) حاصل شد. طبق نتایج بدست آمده فرایند از سینتیک درجه دوم تبعیت نمود.

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نانولوله‌های کربنی چند جداره در شکل ۱ ساختار رشته ای این نانولوله‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج طیف های FTIR از نانولوله‌های کربنی چند جداره یک پیک در محدوده $1459 cm^{-1}$ نشان می‌دهد که می‌تواند مربوط به باندهای C=C باشد و پیک در محدوده $1629 cm^{-1}$ می‌تواند مربوط به باندهای C=O در سطح نانولوله‌ها باشد. پیک در محدوده $2924 cm^{-1}$ و $3443 cm^{-1}$ تعیین کننده باندهای C-H و O-H است که می‌تواند مربوط به گروه های هیدروکسیل و کربوکسیل باشد. تشکیل این گروه ها مخصوصا گروه کربوکسیل می‌تواند خاصیت هیدروفیلیک سطح نانولوله را بهبود بخشد در نتیجه ظرفیت جذب ارتقا یابد (۹، ۱۴، ۱۵، ۲۴). در مطالعه ای که توسط ویپاسنیک و همکاران (۲۰۱۱) در ایالات متحده جهت بررسی خصوصیات

سطحی و ساختاری نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده انجام شد، مقدار اکسیداسیون سطحی اندازه گیری شده توسط XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) برای نانولوله‌های کربنی چند جداره اصلاح نشده ۰/۹ درصد و برای نانولوله‌های اصلاح شده با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 ۱۰/۲ درصد حاصل شد. همچنین با اسیدی نمودن سطح نانولوله‌ها، گروه‌های عاملی کربونیل و کربوکسیل افزایش یافت (۱۴). در مطالعه ای که توسط بساها و همکاران (۲۰۰۹) در عربستان سعودی جهت اکسیداسیون شیمیایی نانولوله‌های کربنی با کاربرد عوامل اکسیدکننده متفاوت و بررسی خصوصیات آنها صورت گرفت نتایج نشان داد که غلظت گروه‌های عاملی کربوکسیل، فنول و لاکتون در اصلاح شیمیایی نانولوله‌های کربنی با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 نسبت به نانولوله‌های اصلاح نشده افزایش یافت (۱۵).

نتایج حاصل از بررسی تاثیر غلظت اولیه ۴-کلروفنل در شکل ۳ نشان داد که با افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفنل از ۱۵ به ۸۰ میلی گرم بر لیتر راندمان حذف کاهش یافت. به دلیل این که با افزایش غلظت، تعداد مکان‌های فعال قابل دسترس برای جذب ۴-کلروفنل محدود می‌شود. با افزایش زمان تماس، راندمان حذف کاهش یافت زیرا جاذب به سرعت اشباع شد و با ادامه فرایند تاثیری در راندمان حذف مشاهده نشد و مقداری واجذب اتفاق افتاد. در آنالیز آماری، ضریب همبستگی پیرسون اختلاف معنی داری بین غلظت اولیه ۴-کلروفنل و راندمان حذف نشان نداد ($P-value > 0.05$). نتایج مطالعه قبادی و همکاران در ایران بر روی حذف رنگزای مستقیم آبی ۸۶ توسط نانولوله‌های کربنی چند جداره نشان داد که در pH: ۶/۵، دمای $25^\circ C$ و مقدار

جاذب ۰/۰۳ گرم با افزایش غلظت ماده رنگزا از ۲۰ تا ۸۰ mg/L به علت افزایش نیروی دافعه بین مولکولهای رنگزا راندمان حذف از ۹۳٪ به ۹٪ کاهش یافت (۱۳). نتایج تحقیق حاضر نیز با نتایج مطالعه قبادی و همکاران همخوانی دارد.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در بررسی اثر مقدار نانولوله‌های کربنی اکسید شده، با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۵ گرم به ۰/۳ گرم بازده حذف ۴-کلروفنل افزایش یافت. این افزایش به خاطر افزایش سطح جاذب و میزان دسترسی بیشتر به مکان های جاذب می باشد (۲۵). بر اساس آنالیز آماری، ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که اختلاف معنی داری بین غلظت نانولوله کربنی اسیدی شده با راندمان حذف ۴-کلروفنل وجود نداشت ($P\text{-value} > 0/05$).

نتایج تحقیقات کوسا و همکاران در عربستان سعودی بر روی حذف فلزات سنگین توسط نانولوله‌های کربنی چند جداره اصلاح شده با 8-hydroxyquinoline نشان داد که در pH: ۵، زمان تماس ۲ ساعت و غلظت یون فلزی ۱ میلی گرم بر لیتر با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۵ به ۰/۲۵ گرم راندمان حذف فلزات سنگین سرب، مس و روی تقریباً ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش یافت (۲۶). نتایج تحقیقات قبادی و همکاران در ایران بر روی حذف رنگزای مستقیم آبی ۸۶ توسط نانولوله‌های کربنی چند جداره نشان داد که میزان رنگبری نانولوله‌های کربنی خام در مقایسه با نانولوله‌های اصلاح شده بسیار کمتر است، به علاوه در pH: ۶/۵، دمای ۲۵ °C و غلظت اولیه رنگزا ۲۰ میلی گرم بر لیتر با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۱ به ۰/۰۵ میلی گرم در ۲۵۰ میلی لیتر راندمان حذف ماده رنگزا از ۹٪ به ۵۵٪ به علت افزایش سطح جاذب و میزان دسترسی بیشتر به مکان های جاذب افزایش یافت (۱۳). نتایج تحقیقات بذرافشان در ایران بر روی حذف ۴ دی کلروفنوکسی استیک اسید از محیط‌های آبی با کاربرد نانولوله‌های کربنی تک جداره اسیدی شده نشان داد که در pH: ۵، زمان تماس ۶۰ دقیقه و غلظت اولیه آلاینده ۱۰۰۰ میکرو گرم بر لیتر با افزایش غلظت جاذب از ۲/۵ به ۱۰ میلی گرم راندمان حذف آلاینده از ۹۱/۶٪ به

۹۴/۷٪ افزایش یافت (۱۸). نتایج مطالعات ذکر شده با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.

pH محلول یکی از مهمترین پارامترهایی است که فرایند جذب را تحت تاثیر قرار می دهد. در حقیقت pH محلول هم شیمی محلول و هم مکان‌های جفت کننده سطحی جاذب را تغییر می دهد (۲۲). تغییر در pH منجر به تغییر در پروفایل بار گونه‌های جذب شونده می شود که متعاقباً تعامل بین گونه‌های جذب شونده و جاذب را تحت تاثیر قرار می دهد (۲۲).

در بررسی تاثیر pH محلول بر روی کارایی فرایند حذف ۴-کلروفنل توسط نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده، نتایج حاصل در شکل ۵ نشان داد که افزایش pH محلول از ۳ به ۷ در راندمان حذف ۴-کلروفنل روی نانولوله‌های کربنی اکسید شده تاثیری نداشت. اما در pH: ۱۰ جذب ۴-کلروفنل کاهش یافت. به این علت که ذرات جاذب دارای مکان‌های فعال با بار منفی هستند، یون‌های H^+ درون محیط اسیدی می توانند این ذرات منفی را خنثی نمایند بنابراین شانس جذب یون‌های ۴-کلروفنل را افزایش دهند. محیط‌های با pH بالا منجر به غلظت بالای OH در محیط می شود که می توانند از پخش یون‌های ۴-کلروفنل ممانعت نمایند و بنابراین شانس جذبشان را کاهش دهند (۲۷). بر اساس آنالیز آماری، ضریب همبستگی پیرسون اختلاف معنی داری بین pH محلول و راندمان حذف ۴-کلروفنل نشان نداد ($P\text{-value} > 0/05$).

نتایج تحقیقات قلیزاده و همکاران در ایران بر روی حذف ۲-کلروفنل و ۴-کلروفنل توسط کربن فعال گرانوله و خاکستر سبوس برنج نشان داد که در زمان تعادل ۶۰ دقیقه، غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر لیتر و مقدار جاذب ۰/۴ گرم بر ۴۰ میلی لیتر راندمان حذف این دو آلاینده در pH: ۲-۹ ثابت باقی ماند و در pH: ۱۱ کاهش یافت (۲). نتایج تحقیقات حمزه و همکاران در عربستان سعودی بر روی حذف فنل توسط نانولوله‌های کربنی و کربن فعال نشان داد که در زمان تماس ۲ ساعت و مقدار جاذب ۰/۰۵ گرم با افزایش pH محلول از ۳ به ۷ راندمان حذف افزایش و در pH: ۷-۹ کاهش یافت (۲۷). نتایج مطالعات ذکر شده با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.

تأثیر تداخل آلاینده‌های موجود در نمونه واقعی فاضلاب نیز بررسی شد. همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود حضور ترکیباتی مانند مواد آلی محلول، مواد آلی معلق، آنیون‌های سولفات، آنیون‌های فسفات و دیگر ترکیبات شیمیایی محلول موجود در فاضلاب واقعی با مولکول‌های ۴-کلروفلن جهت جذب روی نانولوله‌های کربنی رقابت نمودند. مولکول‌هایی که کوچکتر هستند و تمایل بیشتری به تشکیل پیوند با گروه‌های هیدروکسیل موجود در سطح نانولوله‌های کربنی اکسید شده دارند مکان‌های فعال سطح نانولوله را اشغال می‌نمایند (۱۱، ۲۰). حضور این ترکیبات مداخله‌گر باعث شد که راندمان حذف ۴-کلروفلن از ۹۱/۸٪ در محلول سنتتیک به ۷۸٪ در محلول واقعی فاضلاب برسد.

مطالعات ایزوترم و سینتیک جذب

مطالعات ایزوترم چگونگی تعامل یک ماده جذب شونده با جاذب را توضیح می‌دهند (۱۸). تئوری لانگمویر: بر مبنای این فرض استوار است که جذب در یک سری مکان‌های همگن خاص در داخل جاذب اتفاق می‌افتد (۱۳، ۲۲).

ایزوترم فروندلیچ: با فرض یک سطح ناهمگن با توزیع نایکنواختی از گرمای جذب بر روی سطح به دست می‌آید (۱۳). نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که فرایند جذب از ایزوترم فروندلیچ پیروی می‌نماید ($R^2 = 0.9893$).

به منظور بررسی مکانیسم جذب، مدل‌های سینتیک به کار می‌روند. جذب یک فرایند فیزیکی-شیمیایی می‌باشد که شامل انتقال جرم ماده جذب شونده از فاز محلول به سطح جاذب می‌باشد این واکنش و همچنین رفتار انتقالی مولکول‌های جذب شونده توسط استفاده از مدل‌های سینتیکی متفاوتی تجزیه و تحلیل می‌شود. مدل‌های سینتیکی درجه ۱ و درجه ۲ از جمله مدل‌های واکنش جذب می‌باشند (۱۳، ۲۲).

معادله سینتیک درجه ۱ که بر مبنای ظرفیت جاذب می‌باشد زمانی کاربرد دارد که جذب سطحی توسط نفوذ از

داخل یک مرز اتفاق می‌افتد. معادله سینتیک درجه ۲ که بر مبنای جذب فاز جامد می‌باشد نشان می‌دهد که جذب شیمیایی مرحله کند کننده سرعت است و فرایندهای جذب سطحی را کنترل می‌نماید (۲۲، ۲۸). واکنش‌های درجه دوم با سرعتی متناسب با توان دوم یک ماده اولیه پیش می‌روند. در سینتیک درجه ۲ فرض می‌شود که دو واکنش اتفاق می‌افتد یکی از این واکنش‌ها سریع اتفاق می‌افتد و به تعادل می‌رسد و دیگری به کندی اتفاق می‌افتد و می‌تواند برای دوره‌های زمانی طولانی ادامه یابد (۱۳، ۲۹). در این مطالعه نیز سرعت اولیه جذب زیاد است و فرایند جذب در ۱۰ دقیقه ابتدایی با سرعت زیادی اتفاق می‌افتد و بعد از گذشت مدت زمان ۱۰ دقیقه فرایند جذب با سرعت کمتری ادامه می‌یابد.

ضرایب همبستگی ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که فرایند جذب از سینتیک درجه ۲ پیروی می‌نماید. نانولوله‌های کربنی دارای پتانسیل بالایی جهت حذف ترکیباتی نظیر فلزات سنگین، مواد آلی، ترکیبات سرطان زا، ترکیبات آروماتیک و... می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید شده با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 می‌توانند در مدت زمان ۱۰ دقیقه ۴-کلروفلن سمی را با راندمان ۷۸٪ از فاضلاب واقعی حذف نمایند، بنابراین می‌توان از نانولوله‌های کربنی در صنعت آب و فاضلاب جهت حذف آلاینده‌های سمی و خطرناک در مدت زمان کوتاه استفاده نمود. در این فرایند بیشترین میزان حذف در pH: ۷ و غلظت ۰/۳ گرم بر ۱۰۰ میلی لیتر برای نانولوله‌های کربنی رخ داد.

سپاسگزاری

پژوهش حاصل طرح تحقیقاتی مصوب مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی کرمان به شماره ۹۳/۲۶۳ می‌باشد که در این مرکز و با حمایت معاونت تحقیقات و فن‌آوری این دانشگاه انجام یافته، بدینوسیله از مساعدت‌های آنان که هموارکننده انجام این پژوهش بوده است سپاسگزاری می‌نمایم.

References

1. Bazrafshan E, Mostafapour FK, Heidarinezhad F. [Phenol removal from aqueous solutions using Pistachio hull ash as a low cost adsorbent]. *J Sabzevar Uni Med Sci* 2012;20:142-53. (Persian)
2. Gholizadeh A, Kermani M, Gholami M, Farzadkia M. [Comparative Investigation of 2-Chlorophenol and 4-Chlorophenol Removal using granulated activated carbon and rice husk ash]. *J Shaeed Sadoughi Uni Med Sci Yazd*. 1391;11:66-78. (Persian)
3. Hui W, JianLong W. Comparative study on electrochemical degradation of 4-chlorophenol by different Pd/C gas diffusion electrodes. *Sci China Ser Chem* 2007;50:692-9.
4. Qi L, You H, Zhang Z, Feng C, Agtmaal Sv. Degradation of 4-Chlorophenol by Catalytic Ozonation using γ -Al₂O₃/TiO₂ Supported manganese oxides in aqueous solution. *Int J Electrochem Sci* 2013;8:5457-68.
5. Rahimi A, Naserian A, Valizadeh R, Tahmasbi A, Shahdadi A. [The impact of using pistachio crust and poly ethylglychacol on consumption and digestion of food blood parameters production and fatty acid profiles in Sanan lactating goats]. *Iranian J Anim Sci Res* 2014;6:227-38. (Persian)
6. Sidmohammadi A, Asgari G, Ebrahimi A, Sharifi Z, Attar HM. [4-Chlorophenol oxidation combined with the application of advanced oxidation technology and the modified microwave in chemical and petrochemical wastewater industry]. *J Health Syst Res* 1389;6:390-6. (Persian)
7. Huang L, Sun Y, Liu Y, Wang N. Mineralization of 4-chlorophenol and analysis of bacterial community in microbial fuel cells. *Proced Environ Sci* 2013;18:534 – 9.
8. Bodalo A, Gomez JL, Gomez E, Bastida J, Maximo MF. Elimination of 4-chlorophenol from water solutions using commercial peroxidases. *Chem Biochem Eng* 2007;21:279-84.
9. Luo C, Wei R, Guo D, Zhang S, Yan S. Adsorption behavior of MnO₂ functionalized multi-walled carbon nanotubes for the removal of cadmium from aqueous solutions. *Chem Eng J* 2013;225:406-15.
10. Upadhyayula VKK, Deng S, Mitchell MC, Smith GB. Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water a review. *J Sci Total Environ* 2009;408:1-13.
11. Yu JG, Zhao XH, Yang H, Chen XH, Yang Q, Yu LY, et al. Aqueous adsorption and removal of organic contaminants by carbon nanotubes. *J Sci Total Environ* 2014;482:241-51.
12. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 1991;354:56-8.
13. Ghobadi J, Arami M, Bahrami H. [Modification of multi walled carbon nanotubes and its application for removal of Direct Blue 86]. *J Color Scie Technol* 2013;7:103-12. (Persian)
14. Wepasnick KA, Smith BA, Schrote KE, Wilson HK, Diegelmann SR, Fairbrother DH. Surface and structural characterization of multi walled carbon nanotubes following different oxidative treatments. *Carbon* 2011;49:24-36.
15. Basahel SN, Thabaiti SAA, Obaid AY, Mokhtar M, Salam MA. Chemical modification of multi-walled carbon nanotubes using different oxidising agents optimisation and characterisation. *Int J Nanopart* 2009;2:221-9.
16. Chen J, Chen Q, Ma Q. Influence of surface functionalization via chemical oxidation on the properties of carbon nanotubes. *J Colloid Interf Sci* 2012;370:32-8.
17. Sheng GD, Shao DD, Ren XM, Wang XQ, Li JX, Chen YX, et al. Kinetics and thermodynamics of adsorption of ionizable aromatic compounds from aqueous solutions by as prepared and oxidized multiwalled carbon nanotubes. *J Hazard Mater* 2010;178:505-16.
18. Bazrafshan E, Mostafapour FK, Faridi H, Farzadkia M, Sargazi S, Sohrabi A. Removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-d) from aqueous environments using single walled carbon nanotubes. *J Health Scope* 2013;1:39-46.
19. Zakeri M, Sany Hm. Carbon nanotubes play a role in the adsorption some of carcinogenic compounds. 4th Int Con Nanostruc 2012; Kish Island Iran.
20. Mubarak NM, Daniel S, Khalid M. Comparative study of functionalize and

- non-functionalized carbon nanotube for removal of copper from polluted water. *J Chem Environ Eng* 2012;3:314-7.
21. Malakootian M, Ehrampoush M, Alibeigi A. [The study of oxidized multi walled carbon nanotubes efficiency in lead removing from aqueous solutions]. *Toloo-E-Behdasht* 2015;14:115-24. (Persian)
22. Li K, Zheng Z, Feng J, Zhang J, Luo X, Zhao G, et al. Adsorption of p-nitroaniline from aqueous solutions onto activated carbon fiber prepared from cotton stalk. *J Hazard Mater* 2009;166:180-5.
23. Albertson OE. Of changes in the biochemical oxygen demand procedure in the 21st edition of standard methods for the examination of water and wastewater. *Water Environ Res* 2007;79:453-5.
24. Scheibe B, Borowiakpalen E, Kalenczuk RJ. Oxidation and reduction of multiwalled carbon nanotubes preparation and characterization. *Mater Character* 2010;61:185-91.
25. Li K, Li Y, Zheng Z. Kinetics and mechanism studies of p-nitroaniline adsorption on activated carbon fibers prepared from cotton stalk by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ activation and subsequent gasification with steam. *J Hazard Mater* 2010;178:553-9.
26. Kosaa SA, Alzhrania G, AbdelSalama M. Removal of heavy metals from aqueous solutions by multi walled carbon nanotubes modified with 8-hydroxyquinoline. *Chem Eng J* 2012; 181:159-68.
27. Hamza HA, Atieh MA, Laoui T. Removal PF Phenol by carbon nanotubes and activated carbon a comparative analysis. *Sixteenth Int Water Technol Con* 2012; Istanbul Turkey.
28. Elshahat MF, Shehata AMA. Extraction of p-Nitroaniline from Aqueous Solutions onto Activated Carbon Prepared from Treated Camphor Wood. *J Emerg Technol Adv Eng*. 2014;4(1):423-30.
29. Al-Kaim AF, Baqir SJ. Kinetic study for adsorption of para nitroaniline (PNA) on Bentonite clay surface. *Nation J Chem*. 2008;32:625-36.

Performance Evaluation of Multi-walled Carbon Nanotubes Oxidized with a Mixture of H₂SO₄/HNO₃ in Removal of 4-chlorophenol from Aqueous Solutions

Malakootian M^{1*}, Mahdizadeh H²

(Received: September 6, 2015

Accepted: December 5, 2015)

Abstract

Introduction: 4-chlorophenol is a toxic and corrosive matter which the Environmental Protection Agency of America (EPA) has reported as one of the priority pollutants. This study is carried out to investigate the efficiency of multi-walled carbon nanotubes oxidized with a mixture of H₂SO₄/HNO₃ in removal of 4-chlorophenol from aqueous solutions.

Materials & methods: This research was an experimental study which was conducted in the first half of 1393 in environmental health engineering research center, Kerman University of medical sciences. Firstly, multi-walled carbon nanotubes were oxidized with a mixture of H₂SO₄/ HNO₃ then effective parameters on phenol removal from aqueous solutions such as the initial concentration of 4-chlorophenol, contact time, amount of adsorbent and pH were studied. Actual wastewater of coal-cleaning with predetermined quality was also studied. SPSS-16 software and Pearson correlation were used for data analysis.

Findings: Removal efficiency of 4-chlorophenol in optimum conditions including pH= 7, contact time= 10 minutes, amount of adsorbent= 0.3 g, the initial concentration of adsorbent= 15 mg/L, was 91.8 percent. Study of the kinetic and isotherm equations showed that the process of adsorption followed the second order kinetic and Freundlich isotherm.

Discussion & conclusions: Multi-walled carbon nanotubes oxidized with a mixture of H₂SO₄/HNO₃ was a good adsorbent for removal of 4-chlorophenol from aqueous solutions and is able to remove this matter from the actual sewage with an efficiency rate equal to 78%, so it can be used as an effective adsorbent for treatment of polluted water and wastewater.

Keywords: Carbon nanotubes, Adsorption, 4-chlorophenol, Adsorption isotherm

1. Environmental Health Engineering Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
2. Dept of Environmental Health Engineering Research, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
* Correspondin author Email: m.malakootian@yahoo.com