بررسی کارایی نانولوله‌های کربنی چند جداره اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم در حذف بنزن از محلول‌های آبی

محمد حسن احرام پوش[1]، حمیدرضا پورزمانی[2]، مریم پزشکی نجف‌آبادی[3]

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: بنزن یک ترکیب فرار و تک حلقه‌ای آروماتیک است و در محصولات نفتی وجود دارد که مهم‌ترین نگرانی در مورد آن خاصیت سرطان‌زایی بنزن می‌باشد. هدف از این مطالعه، بررسی قابلیت حذف بنزن با استفاده از نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نوع اصلاح شده آن با هیپوکلریت کلسیم و هیپوکلریت سدیم از محلول‌های آبی بود.

روش‌ها: در مطالعه حاضر غلظت بنزن ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت نانولوله‌های کربنی ۰/۵ گرم بر لیتر و زمان تماس ۱ ساعت و ۲ ساعت و pH خنثی برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد. نمونه‌های مورد نیاز به صورت شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه ساخته شد و توسط دستگاه گاز کروماتوگرافی جرمی آنالیز گردید.

یافته‌ها: ظرفیت جذب (qe) و راندمان حذف (R) برای بنزن توسط نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم (mg/g qe = ۱۸۸/۶ و ۹۴/۳ درصد = R) بیشتر از نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیپوکلریت سدیم (qe = ۱۸۷/۷ mg/g و ۹۳/۹ درصد = R) و نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح نشده (qe = ۱۸۲/۶ mg/g و ۹۱/۳ درصد = R) می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم می‌تواند به طور مؤثری بنزن را از آب جذب نماید و دارای پتانسیل خوبی برای تصفیه آب و فاضلاب‌های آلوده به مواد نفتی است.

واژه‌های کلیدی: نانولوله‌های کربنی اصلاح شده، بنزن، محلول‌های آبی، هیپوکلریت کلسیم

ارجاع: احرام پوش محمد حسن، پورزمانی حمیدرضا، پزشکی نجف‌آبادی مریم. **بررسی کارایی نانولوله‌های کربنی چند جداره اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم در حذف بنزن از محلول‌های آبی.** مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۳۹۱؛ ۸ (۶): ۱۰۶۷-۱۰۵۸.

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۹/۶

مقدمه

بنزن با فرمول C_6H_6 کوچک‌ترین و پایدارترین ترکیب آروماتیک است. مایعی بی‌رنگ و شفاف با بوی مطبوع که این بو از ویژگی‌های عمومی ترکیبات معطر است و به شدت قابل اشتعال می‌باشد. بنزن به عنوان ماده فرعی در صنعت کک و زغال سنگ و همچنین از صنایع نفت به دست می‌آید. انتشار این گاز به عنوان آلاینده می‌تواند مسایل انسانی و اکولوژیکی را به دنبال داشته باشد (۱). استنشاق بخارهای زیاد بنزن

۱- استاد، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد، شعبه پردیس بین‌الملل، یزد، ایران
۲- استادیار، مرکز تحقیقات محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی یزد، شعبه پردیس بین الملل، یزد، ایران (نویسنده مسؤول)
Email: pezeshkimaryam@ymail.com

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

سبب خواب‌آلودگی، سرگیجه، تهوع و سردرد می‌شود. اگر غلظت آن زیادتر یا مدت تماس بیشتر باشد، تشنج و از دست رفتن هوش و حواس پیش می‌آید و سرانجام ممکن است مرگ در اثر فلج دستگاه تنفسی به سرعت اتفاق افتد (۲).

بنزن به عنوان آلاینده‌های اولیه توسط آژانس حفاظت محیط زیست شناخته شده است. همچنین جزء سرطان‌زاهای گروه A که دارای خاصیت سرطان‌زایی قطعی هستند، طبقه‌بندی شده است. به علت این اثرات بهداشتی، مقدار مجاز بنزن، حداکثر سطح آلودگی بنزن توسط EPA (Environmental Protection Agency) در آب آشامیدنی ۰/۵ میکروگرم در لیتر اعلام شده است (۴، ۳). ترکیبات آلی فرار مانند بنزن، تولوئن، زایلن، فنل، ترکیبات آروماتیک هالوژنه و ... از مهم‌ترین محصولات نفتی هستند که در صنایع شیمیایی به طور زیادی برای تهیه حلال‌های آلی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۵). همچنین در حین فرایندهایی که برای استخراج و پالایش نفت خام و گاز طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقادیر بسیار زیادی آب ایجاد می‌شود که حاوی حجم بسیار بالایی از هیدروکربن‌های نفتی است. این آب تولید شده دارای بیشترین حجم در بین آب‌های تولید شده در فرایند تولید نفت و گاز است. در هنگام حوادث و یا ایجاد مشکل در پالایشگاه‌ها نیز مقادیر زیادی از هیدروکربن‌های نفتی نیز به صورت مخلوط با آب ایجاد می‌شوند که به راحتی باعث آلودگی خاک، آب‌های سطحی و یا آب‌های زیرزمینی می‌شوند (۶). بنابراین حذف این ترکیبات از منابع آبی به خصوص آب‌های سطحی و زیرزمینی الزامی است. نانولوله‌های کربنی (Carbon nano tubes یا CNTs) ماکرو مولکول‌های خاصی هستند که دارای پایداری گرمایی و شیمیایی بسیار بالایی می‌باشند. از این نانو مواد برای حذف بسیاری از ترکیبات آلوده کننده آلی مانند دی‌اکسین‌ها و ترکیبات آلی فرار از فاز گازی و همچنین حذف ترکیباتی مانند ۱ و ۲- دی‌کلرو بنزن، تری‌هالومتان‌ها، رنگ‌های فعال، زایلن، اسید فلویک و مواد آلی طبیعی از محلول‌های آبی استفاده شده است (۷).

حذف بنزن از منابع آب زیرزمینی توسط فرایندهای گوناگون به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که به طور عمده شامل احیای بیولوژیکی، تبخیر، اکسیداسیون و جذب بوده است (۸). ظرفیت جذب بالای نانولوله‌های کربنی در حذف آلاینده‌های آلی به علت ساختار منفذ مانند این نانولوله‌ها و وجود مقادیر زیادی از گروه‌های عملکردی سطحی در آن‌ها است. مکانیسم جذب بنزن توسط نانولوله‌های کربنی به طور عمده ناشی از واکنش بینابینی گیرندگی الکترون و دهندگی الکترون بین حلقه آروماتیک بنزن و گروه‌های کربوکسیلیک سطحی موجود بر روی نانولوله‌های کربنی می‌باشد (۷). بر اساس تحقیق انجام شده توسط Lu و همکاران، با مقایسه خاصیت جذب بین نانولوله‌های کربنی ساده و نانولوله‌های کربنی اصلاح شده به وسیله HCl، H_2SO_4، HNO_3 و NaOCl به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت سدیم (NaOCl) [Multi walled carbon nano tubes surface is modified with NaOCl یا MWCNT(NaOCl)] بهترین گزینه در بین موارد آزمایش شده برای حذف بنزن می‌باشد (۶).

این آزمایش نشان داد که اصلاح کردن نانولوله‌های کربنی با کمک اسید باعث افزایش سطح شده که در نتیجه باعث افزایش جذب برای بنزن می‌شود و با کمک این روش می‌توان نتایج بهتری حاصل کرد و در این مقاله استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت سدیم CNT(NaOCl) بهترین راندمان را نشان داد (۶). تحقیق انجام شده توسط Su و همکاران نشان داد، خواص فیزیکوشیمیایی MWCNT مانند خلوص، ماهیت ساختاری و سطحی بعد از فرایندهای اکسیداسیون به طور قابل توجهی بهبود خواهد یافت و ظرفیت جذب بنزن توسط MWCNT را بهبود می‌بخشد (۹). با توجه به این‌که کلر عامل فعال‌سازی و اصلاح‌سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در مطالعات قبلی بوده است و باعث افزایش جذب در مطالعه Lu و همکاران گردید، انتظار می‌رود هیپوکلریت کلسیم که دارای درصد کلر بالاتری است عملکرد بهتری در اصلاح نانولوله‌های کربنی داشته باشد. بنابراین در این مطالعه اثر هیپوکلریت سدیم و

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

هیپوکلریت کلسیم در اصلاح نانولوله‌های کربنی بررسی گردید. مطالعه مذکور راندمان حذف بنزن توسط نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم $MWCNT(CaOCl)_2$ و هیپوکلریت سدیم را مورد بررسی قرار داد. سهم این مطالعه در بین مطالعات انجام شده قبلی، کاربرد نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت کسیم است که در هیچ مقاله‌ای یافت نگردید.

روش‌ها

مواد

مطالعه حاضر یک تحقیق توصیفی بود که به صورت مقطعی انجام گردید. مواد شیمیایی مورد نیاز برای ساخت محلول آبی و اصلاح نانولوله‌های کربنی چند دیواره از شرکت Merck با خلوص بالا (۹۹/۷ درصد) خریداری گردید. به منظور تهیه نانولوله‌های کربنی اصلاح شده، از هیپوکلریت سدیم و هیپوکلریت کلسیم استفاده شد. برای تهیه هیپوکلریت سدیم با توجه به مطالعات قبلی انجام شده از غلظت ۳۰ درصد استفاده گردید. هیپوکلریت سدیم ۳۰ درصد با نانولوله‌های کربنی چند دیواره به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد جوشانده و سپس در دمای اتاق سرد شد. برای تهیه هیپوکلریت کلسیم ۳۰ درصد نیز از همین روش استفاده گردید، ولی به دلیل آن‌که هیپوکلریت کلسیم به صورت جامد است، ابتدا با آب دیونیزه بر روی همزن قرار داده شد تا در آب حل شود و تبدیل به محلول هیپوکلریت کلسیم ۳۰ درصد شده و سپس بقیه مراحلی که برای تهیه نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیپوکلریت سدیم انجام شد، تکرار گردید. با توجه به این‌که نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم جاذب سریع رطوبت است باید آن را پس از جوشاندن در دسیکاتور نگهداری کرد تا خشک شود. نمونه بنزن مورد نیاز در آزمایشگاه با استفاده از بنزن و آب دیونیزه به صورت سنتتیک تهیه شد. برای ساخت محلول آبی، مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم بنزن به یک لیتر آب دیونیزه اضافه شد. برای حل کردن این ترکیبات در آب، ابتدا ۶۰ دقیقه محلول مذکور در حمام اولتراسونیک قرار گرفت و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه به هم زده شد. دوباره بعد از ۲۴ ساعت، ۳۰ دقیقه اولتراسونیک انجام گردید. در این حالت محلول از حالت دو فاز بودن خارج شد و یک محلول همگن به دست آمد که در داخل بالن ژوژه به طور کامل آب‌بند شده و نگهداری گردید.

شرایط آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها از یک بطری شیشه‌ای ۲۵۰ میلی‌لیتری استفاده گردید که به مقدار ۰/۵ گرم در لیتر جاذب در آن ریخته شد و ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول بنزن ساخته شده به آن اضافه گردید. با توجه به مطالعات قبلی و اندازه‌گیری‌های محیطی، به طور عمده غلظت ترکیبات بنزن در منابع آبی و فاضلاب‌های آلوده بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. بنابراین غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر انتخاب گردید. بطری شیشه‌ای به طور کامل آب‌بندی شد و بر روی همزن (۶۲۵ Orbital shaker, Model OS) قرار گرفت و به مدت ۱ ساعت و ۲ ساعت، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با شدت ۲۵۰ دور در دقیقه به هم زده شد. همه آزمایش‌ها ۳ بار تکرار گردید. در کنار نمونه‌ها یک نمونه شاهد نیز قرار گرفت که به آن هیچ گونه جاذبی اضافه نشد تا مطمئن شویم که کاهش غلظت بنزن در محلول تنها ناشی از جذب بر روی نانولوله‌ها بوده است و در اثر جذب شدن به شیشه بطری و یا از طریق تبخیر غلظت آن‌ها کاهش پیدا نکرده است. در مجموع برای مرحله جذب ۲۴ نمونه توسط دستگاه GC/MS آنالیز گردید. pH محلول قبل و بعد از تماس با نانولوله‌های کربنی به صورت pHin و pHfin نیز ثبت گردید.

مقدار بنزن جذب شده بر روی نانولوله‌های کربنی به صورت مقدار تعادلی (qe) بر حسب میلی‌گرم بر گرم و جهت بازدهی حذف این ترکیبات به ترتیب از روابط ۱ و ۲ استفاده شد.

$$q_e = (C_0 - C_t) \times \frac{V}{m}$$

رابطه ۱

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

رابطه ۲

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

که در این رابطه: C_0 و C_t به ترتیب غلظت بنزن در محلول اولیه و بعد از تماس با نانولوله‌های کربنی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند. v حجم محلول اولیه بر حسب لیتر و m وزن جاذب اضافه شده به بطری‌ها بر حسب گرم است.

اندازه‌گیری بنزن

از یک دستگاه GC مربوط به شرکت Agilent که مجهز به MSD مدل 5975C و گاز کروماتوگرافی مدل 7890A با تزریق حالت Split/Splitless بود، برای اندازه‌گیری بنزن استفاده گردید. در این آزمایش از یک ستون سیلکون (5% Phenyl-95% Climethyl polysiloxane; HP-5ms (30 m × 0.25 mmI.D; 0.25 µm و گاز هلیوم (خلوص ۹۹/۹۹۵ درصد) با سرعت جریان ۱ میلی‌لیتر در دقیقه به عنوان گاز حامل استفاده شد. برنامه دمای ستون به صورت زیر تنظیم گردید: ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای ۱۰ دقیقه، افزایش تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و نگهداشتن دما در ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ دقیقه. دمای محل تزریق در حد ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید و ۱ میلی‌لیتر حجم گاز Headspace به دستگاه GC به حالت Splitless تزریق شد. برای تزریق نمونه به داخل ستون از یک نمونه‌بردار HS (Head space) به نام CTCPAL-CombiPAL استفاده شد که به صورت زیر برنامه‌ریزی گردید:

زمان گرم کردن نمونه: ۲۵ دقیقه، دمای گرم کردن: ۷۰ درجه سانتی‌گراد، حجم نمونه برداشت شده: ۱ میلی‌لیتر، دمای سرنگ تزریق: ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، زمان شستشو با گاز نیتروژن: ۲ دقیقه، زمان پر شدن سرنگ: ۰/۰۳ دقیقه، زمان تزریق: ۱ دقیقه و حجم نمونه مایع ۲ میلی‌لیتر در ویال‌های ۱۰ میلی‌لیتری بود. هیچ گونه نمکی به نمونه‌ها اضافه نگردید. pH نمونه‌ها توسط یک pH متر از نوع EUTECH مدل ۱۵۰۰ اندازه‌گیری شد.

جاذب‌ها

در این مطالعه از نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم و نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با هیپوکلریت سدیم استفاده شد. نانولوله‌های کربنی چند دیواره دارای ۹۵ درصد خلوص و قطر خارجی ۲۰–۵ نانومتر، قطر داخلی ۶–۲ نانومتر، طول ۱۰–۱ میکرومتر، دانسیته ظاهری ۰/۳۵–۰/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و تعداد دیواره‌ها ۱۵–۳ بود.

آنالیز داده‌ها

برای آنالیز داده‌ها و مقایسه جاذب‌های MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) در حذف بنزن از نرم‌افزار طراحی آزمایش DOE (Design of experiment) استفاده گردید. در این مطالعه از طرح فاکتوریل کلی (General factorial plan) استفاده شد.

یافته‌ها

عملکرد جاذب‌ها

جدول ۱ درصد حذف بنزن توسط MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) برای حالتی که غلظت اولیه بنزن ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت جاذب ۰/۵ گرم بر لیتر، زمان تماس ۱ ساعت و ۲ ساعت و شدت هم زدن ۲۵۰ دور در دقیقه است را نشان می‌دهد.

نمودار ۱ میزان حذف بنزن توسط نانولوله‌های کربنی MWCNT، نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت

جدول ۱: درصد حذف بنزن توسط MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) برای زمان تماس ۱ ساعت و ۲ ساعت

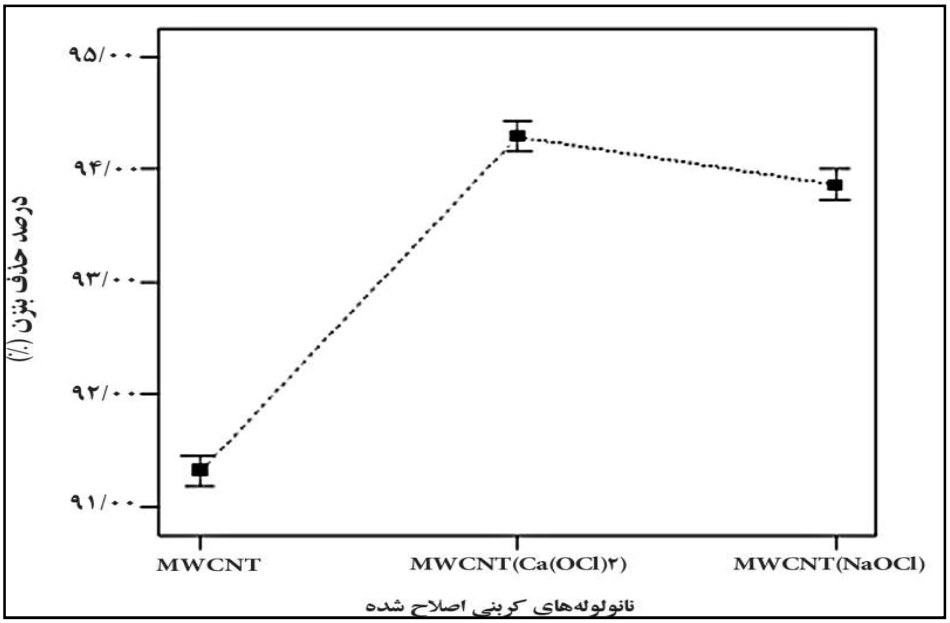
جاذب	غلظت اولیه (C0) (میلی‌گرم بر لیتر)	میزان حذف بنزن در زمان تماس ۱ ساعت		میزان حذف بنزن در زمان تماس ۲ ساعت	
		غلظت ثانویه (Ct) (میلی‌گرم بر لیتر)	درصد حذف	غلظت ثانویه (Ct) (میلی‌گرم بر لیتر)	درصد حذف
*MWCNT	۱۰۰ ± ۰/۲	۱۳/۰۲ ± ۰/۰۰۰۲	۸۶/۹۸	۱۱/۰۲ ± ۰/۰۰۰۲	۸۸/۹۸
$MWCNT(Ca(OCl)_2)$	۱۰۰ ± ۰/۲	۸/۵۶ ± ۰/۰۰۰۱	۹۱/۴۴	۹/۳۲ ± ۰/۰۰۰۱	۹۰/۶۸
MWCNT(NaOCl)	۱۰۰ ± ۰/۲	۹/۲۰ ± ۰/۰۰۰۲	۹۰/۸۰	۹/۸۱ ± ۰/۰۰۰۲	۹۰/۱۹

MWCNT: Multi walled carbon nano tubes

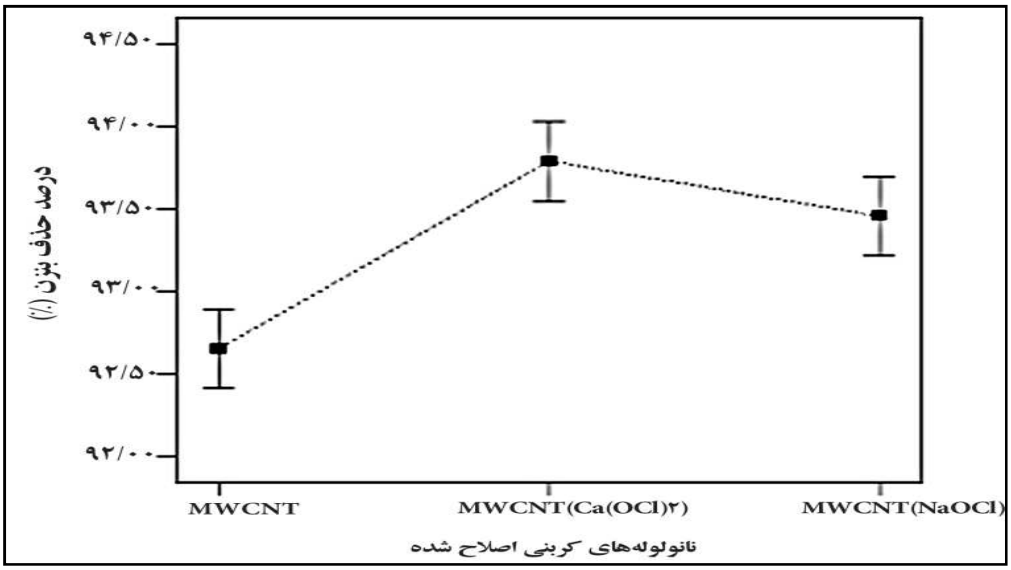
[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

کلسیم (MWCNT(Ca(OCl)۲ و نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت سدیم (MWCNT(NaOCl را در زمان تماس ۱ ساعت با هم مقایسه می‌نماید.

نمودار ۲ میزان حذف بنزن توسط MWCNT، (MWCNT(Ca(OCl)۲ و (MWCNT(NaOCl را در زمان تماس ۲ ساعت با هم مقایسه می‌نماید.



نمودار ۱: درصد حذف بنزن توسط MWCNT، (MWCNT(Ca(OCl)۲ و (MWCNT(NaOCl
با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت جاذب ۰/۵ گرم بر لیتر و زمان تماس ۱ ساعت
MWCNT: Multi walled carbon nano tubes



نمودار ۲: درصد حذف بنزن توسط MWCNT، (MWCNT(Ca(OCl)۲ و (MWCNT(NaOCl
با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت جاذب ۰/۵ گرم بر لیتر و زمان تماس ۲ ساعت
MWCNT: Multi walled carbon nano tubes

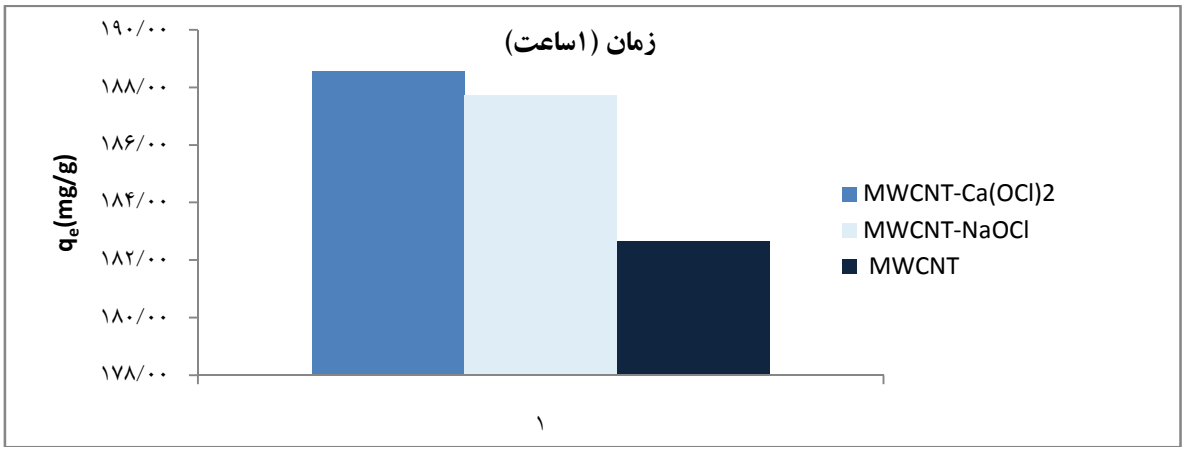
[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

نمودار ۳ ظرفیت جذب بنزن در MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان تماس ۱ ساعت و میزان هم زدن ۲۵۰ دور در دقیقه را نشان می‌دهد.

نمودار ۴ ظرفیت جذب بنزن در MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان تماس ۲ ساعت و میزان هم زدن ۲۵۰ دور در دقیقه را نشان می‌دهد.

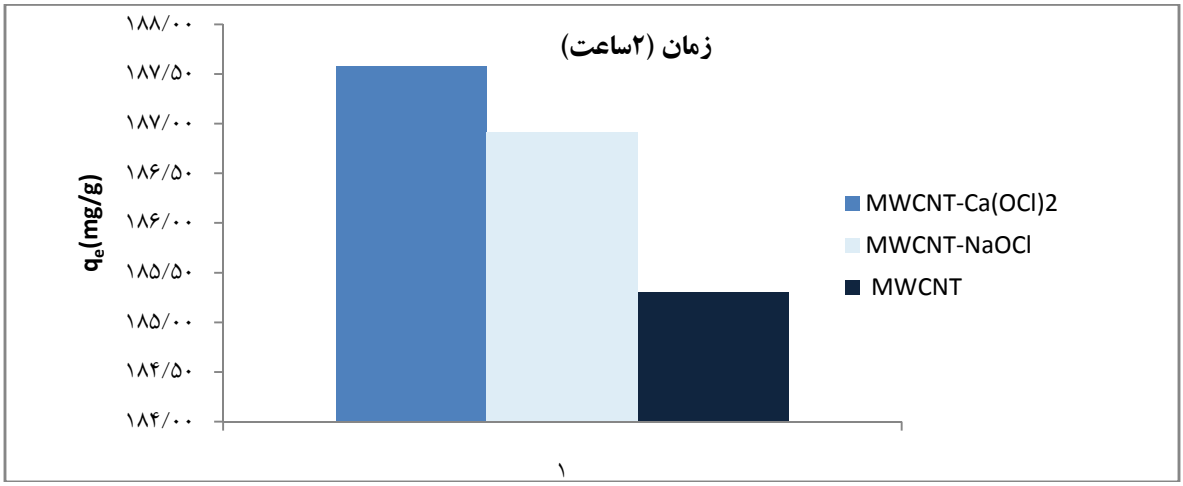
بحث

بر اساس آنالیزهای انجام شده توسط نرم‌افزار DOE، میزان حذف بنزن توسط MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) در مدت زمان ۱ ساعت دارای اختلاف معنی‌داری ($Prob > |t|$ کوچک‌تر از ۰/۰۵) است. میزان حذف بنزن توسط نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم نشان می‌دهد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بین نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت



نمودار ۳: ظرفیت جذب بنزن در MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت جاذب ۰/۵ گرم بر لیتر و زمان تماس ۱ ساعت

MWCNT: Multi walled carbon nano tubes



نمودار ۴: ظرفیت جذب بنزن در MWCNT، $MWCNT(Ca(OCl)_2)$ و MWCNT(NaOCl) با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت جاذب ۰/۵ گرم بر لیتر و زمان تماس ۲ ساعت

MWCNT: Multi walled carbon nano tubes

www.mui.ac.ir

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

کلسیم و هیپوکلریت سدیم و نانولوله‌های کربنی اصلاح نشده در حذف بنزن وجود دارد؛ به طوری که نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم در مدت زمان ۱ ساعت دارای بهترین راندمان حذف می‌باشد، ولی در مدت زمان ۲ ساعت به دلیل واجذب راندمان در نانولوله‌های کربنی اصلاح شده کاهش یافته و اختلاف معنی‌داری بین نانولوله‌های اصلاح شده با هیپوکلریت کلسیم و هیپوکلریت سدیم وجود ندارد، اما راندمان حذف نانولوله‌های کربنی چند دیواره با گذشت زمان بهبود یافت.

همان‌طور که در نمودار ۱ مشهود است؛ $(Ca(OCl)_2)$ MWCNT بیش از MWCNT $(NaOCl)$ و MWCNT می‌تواند بنزن را از محلول آبی حذف کند. همان طور که انتظار می‌رفت به دلیل بالاتر بودن درصد کلر در هیپوکلریت کلسیم نسبت به هیپوکلریت سدیم و با توجه به این‌که کلر عامل فعال‌سازی و اصلاح‌سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره است، بنابراین هیپوکلریت کلسیم راندمان حذف بالاتری نسبت به هیپوکلریت سدیم نشان می‌دهد. در نمودار ۲ نیز راندمان حذف بنزن از محلول آبی توسط $(Ca(OCl)_2)$ MWCNT بیش از MWCNT $(NaOCl)$ و MWCNT است، اما راندمان حذف بنزن با نانولوله‌های کربنی اصلاح شده در زمان ۱ ساعت بهتر از ۲ ساعت می‌باشد که این به دلیل بالا رفتن سرعت جذب به دلیل اصلاح‌سازی و عامل‌دار شدن سطح نانولوله‌های اصلاح شده می‌باشد.

نمودار ۳ نشان می‌دهد که ظرفیت جذب $(Ca(OCl)_2)$ MWCNT بیش از MWCNT $(NaOCl)$ می‌باشد، ولی هر دو نانولوله‌های کربنی اصلاح شده ظرفیت جذب بهتری نسبت به نانولوله کربنی چند دیواره اصلاح نشده دارند. همچنین در زمان تماس ۱ ساعت ظرفیت جذب در نانولوله‌های کربنی اصلاح شده بالاتر است، پس نشان می‌دهد که با اصلاح‌سازی می‌توان زمان تماس را نیز کمتر کرد.

نمودار ۴ نشان می‌دهد که ظرفیت جذب $(Ca(OCl)_2)$ MWCNT بیش از MWCNT $(NaOCl)$ می‌باشد، ولی هر دو نانولوله‌های کربنی اصلاح شده ظرفیت جذب بهتری نسبت به نانولوله کربنی چند دیواره اصلاح نشده دارند. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط Lu و همکاران، اصلاح کردن نانولوله‌های کربنی با کمک اسید باعث افزایش سطح می‌شود که در نتیجه باعث افزایش جذب برای بنزن می‌شود و با کمک این روش می‌توان نتایج بهتری حاصل کرد. همچنین مکانیسم جذب بنزن بر اساس پیوندهای $\pi-\pi$ الکترون دهنده و الکترون گیرنده است که بین حلقه آروماتیک بنزن و گروه‌های کربوکسیلیک نانولوله‌های کربنی ایجاد می‌شود (۷). مطالعات Yin و همکاران نشان داد که pH اسیدی محلول باعث افزایش گروه‌های عملکردی اسیدی بر روی سطح کربن می‌شود که گونه‌های ترکیبی اکسیژن را تغییر می‌دهد. گروه‌های عملکردی اسیدی که در pH پایین روی سطوح کربن تشکیل می‌شود شامل گروه‌های کربوکسیل، کوینن، لاکتن و کربوکسیلیک بدون آب می‌باشند. این گروه‌های عملکردی خاص برای جذب ترکیباتی مانند BTEX که دارای گروه‌هایی مانند حلقه بنزن هستند، لازم می‌باشد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که جذب ترکیبات BTEX بر روی نانولوله‌های کربنی به علت جذب $\pi-\pi$ بین الکترون‌های موجود در سطح کربن و حلقه‌های آروماتیک این ترکیبات است؛ به طوری که نیروی الکترواستاتیک بین یون‌های متصل شده به حلقه آروماتیک و شارژ سطحی کربن باعث جذب ترکیبات بنزن بر روی سطوح کربن می‌شود (۹). تحقیقات Rao و همکاران نشان داد که مکانیسم جذب ترکیبات از محلول‌های آبی توسط نانولوله‌های کربنی خیلی پیچیده است، ولی در تحقیقات مختلف به طور عمده نیروهای جاذبه الکترواستاتیک، جذب- ترسیب و برهمکنش‌های شیمیایی بین آلاینده‌ها و گروه‌های عملکردی سطحی نانولوله‌های کربنی به عنوان مکانیسم جذب مطرح شده است (۱۰).

جدول ۲ مقدار ظرفیت جذب (qe) برای بنزن توسط جاذب‌های مختلف مانند $MWCNT(Ca(OCl)_2)$، $MWCNT(NaOCl)$، MWCNT و SWCNT (Single walled carbon nano tubes)، کربن فعال پودری (Powdered activated carbon یا PAC) و کربن فعال گرانولی (Granular activated carbon یا GAC) حاصل از این مطالعه را با سایر مطالعات مقایسه نموده است.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

جدول ۲: مقایسه ظرفیت جذب بنزن توسط جاذب‌های مختلف

جاذب	ظرفیت جذب بنزن (میلی‌گرم بر گرم)	شرایط مطالعه	رفرنس
MWCNT(Ca(OCl)۲)	۱۸۸/۵۸	Ph = ۷، S/L = ۰/۵/۱۰۰۰ و C0 = ۱۰۰	مطالعه حاضر
MWCNT(NaOCl)	۱۸۷/۷۰	Ph = ۷، S/L = ۰/۵/۱۰۰۰ و C0 = ۱۰۰	مطالعه حاضر
MWCNT	۱۸۲/۶۰	pH = ۷، T = ۲۵، S/L = ۰/۵/۱۰۰۰ و C0 = ۱۰۰	مطالعه حاضر
MWCNT	۹/۹۸	pH = ۷، T = ۲۵، S/L = ۰/۱/۱۰۰ و C0 = ۱۰	(۱۱)
SWCNT	۹/۹۸	pH = ۷، T = ۲۵، S/L = ۰/۱/۱۰۰ و C0 = ۱۰	(۱۱)
HCNT	۹/۹۷	pH = ۷، T = ۲۵، S/L = ۰/۱/۱۰۰ و C0 = ۱۰	(۱۱)
CNT	۱۸/۱۰	pH = ۷، T = ۲۵، S/L = ۰/۶/۱۰۰ و C0 = ۲۰۰	(۷)
GAC	۱۸۳/۱۰	pH = ۷، T = ۲۵، S/L = ۰/۱۵/۱۰۰ و C0 = –۳۵	(۱۲)
PAC	۴۰/۰۰	S/L = ۰/۱/۴۰ و C0 = ۱۰۰	(۱۳)
کربن فعال	۴/۷۶	T = ۲۵، S/L = ۰/۱/۱۰۰ و C0 = ۱۰	(۱۴)

MWCNT: Multi walled carbon nano tubes; SWCNT: Single walled carbon nano tubes; HCNT: Hybrid carbon nano tubes and nano silica; CNT: Carbon nano tubes; GAC: Granular activated carbon; PAC: Powdered activated carbon

در مطالعه حذف بنزن از منابع آبی با استفاده از نانولوله‌های کربنی مشخص گردید، با توجه به این‌که کلر عامل فعال‌سازی و اصلاح‌سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره است، در نتیجه به دلیل بالاتر بودن درصد کلر در هیپوکلریت کلسیم نسبت به هیپوکلریت سدیم راندمان حذف بالاتری نسبت به هیپوکلریت سدیم نشان می‌دهد و همین طور MWCNT(Ca(OCl)۲) دارای ظرفیت جذب بالاتری نسبت به MWCNT(NaOCl) می‌باشد و دارای روند MWCNT(Ca(OCl)۲) > MWCNT(NaOCl) > MWCNT است. ظرفیت جذب بنزن توسط MWCNT(Ca(OCl)۲) بیشتر از MWCNT(NaOCl) است. همچنین ظرفیت جذب در زمان ۱ ساعت برای نانولوله‌های کربنی اصلاح شده بیش از زمان تماس ۲ ساعت بوده است، ولی زمان تماس ۲ ساعت باعث بهبود ظرفیت جذب در نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح نشده می‌شود و این نشان می‌دهد که اصلاح نانولوله‌ها علاوه بر این‌که باعث افزایش ظرفیت جذب می‌شود، سرعت جذب را نیز افزایش می‌دهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از گروه مهندسی بهداشت محیط و مرکز تحقیقات محیط زیست دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی اصفهان و دانشگاه علوم پزشکی یزد شعبه پردیس بین‌الملل به خاطر همکاری در انجام پروژه تحقیقاتی مذکور تشکر نمایند. همچنین از پالایشگاه اصفهان به علت همکاری در مراحل انجام کار و تأمین هزینه‌های مالی تشکر می‌شود.

References

1. Pourzamani HR, Bina B, Rashidi A, Amin MM. Performance of raw and regenerated multi- and single-walled carbon nanotubes in xylene removal from aqueous solutions. Int J Env Health Eng 2012; 1(1): 4.
2. Smith CJ, Perfetti TA, Rumple MA, Rodgman A, Doolittle DJ. "IARC group 2A Carcinogens" reported in cigarette mainstream smoke. Food Chem Toxicol 2000; 38(4): 371-83.
3. Bina B, Pourzamani ER, Rashidi A, Amin MM. Ethylbenzene Removal by Carbon Nanotubes from Aqueous Solution. Journal of Environmental and Public Health 2012; 2012.
4. Mathur AK, Majumder CB, Chatterjee S. Combined removal of BTEX in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media. J Hazard Mater 2007; 148(1-2): 64-74.
5. Tellez GT, Nirmalakhandan N, Gardea-Torresdey JL. Performance evaluation of an activated sludge system for

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water. Advances in Environmental Research 2002; 6(4): 455-70.
6. Lu C, Su F, Hu S. Surface modification of carbon nanotubes for enhancing BTEX adsorption from aqueous solutions. Applied Surface Science 2008; 254(21): 7035-41.
7. Pourzamani HR, Bina B, Amin MM, Rashidi A. Monoaromatic Pollutant Removal by Carbon Nanotubes from Aqueous Solution. Advanced Materials Research 2012; 488-489: 934-9.
8. Su F, Lu C, Hu S. Adsorption of benzene, toluene, ethylbenzene and p-xylene by NaOCl-oxidized carbon nanotubes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2010; 353(1): 83-91.
9. Yin CY, Aroua M, Daud W. Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions. Separation and Purification Technology 2007; 52(3): 403-15.
10. Rao GP, Lu C, Su F. Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: A review. Separation and Purification Technology 2007; 58(1): 224-31.
11. Bina B, Amin MM, Rashidi A, Pourzamani HR. Benzene and Toluene Removal by Carbon Nanotubes from Aqueous Solution. Archives of Environmental Protection 2012; 38(1): 3-25.
12. Wibowo N, Setyadhi L, Wibowo D, Setiawan J, Ismadji S. Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: influence of surface chemistry on adsorption. J Hazard Mater 2007; 146(1-2): 237-42.
13. Koh SM, Dixon JB. Preparation and application of organo-minerals as sorbents of phenol, benzene and toluene. Applied Clay Science 2001; 18(3-4): 111-22.
14. Daifullah AAM, Girgis BS. Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2003; 214(1-3): 181-93

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]

Benzene Removal from Aqueous Solution by Surface Modified Carbon Nanotubes Using Calcium Hypochlorite

Mohammadhasan Ehrampoush[1], Hamidrez Pourzamani[2], Maryam Pezeshki Najafabadi[3]

Original Article

Abstract

Background: Benzene is a volatile compound in petroleum products and the major concern about this is carcinogenic effects. This study aimed to review benzene removal ability of multi-walled carbon nanotubes by surface modified with calcium hypochlorite and sodium hypochlorite from aqueous solution.

Methods: The removal of benzene from aqueous solution by multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and its modified surface by calcium hypochlorite [MWCNT (Ca(OCl)2)] and sodium hypochlorite [MWCNT(NaOCl)] were evaluated. Synthetic samples were analyzed by Gas Chromatography.

Findings: this study, nano-materials with dosage of 0.5 g/l, contact time (1-hr and 2-hr) with benzene concentration of 100 mg/l and pH 7 were chosen. The equilibrium amount (qe) and removal efficiency (R) for benzene were 188.6 mg/g and 94.3%, respectively and by MWCNT (Ca(OCl)2) were higher than MWCNT (NaOCl) (qe = 187.7; R = 93.9%) and MWCNT (qe = 182.6; R = 91.3%)

Conclusion: The MWCNT (Ca(OCl)2) can effectively adsorb benzene from water and can thus be used as efficient adsorbents to purify waters and wastewaters polluted by the petrochemicals.

Key words: Carbon Nanotubes, Benzene, Calcium Hypochlorite, Sodium Hypochlorite

Citation: Ehrampoush MH, Pourzamani HR, Pezeshki Najafabadi M. **Benzene Removal from Aqueous Solution by Surface Modified Carbon Nanotubes Using Calcium Hypochlorite.** J Health Syst Res 2013; 8(6): 1058-67.

Received date: 11/02/2012 Accept date: 26/11/2012

1- Professor, Department of Environmental Health, School of Public Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran
2- Assistant Professor, Environmental Research Center, School of Public Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
3- MSc Student, Department of Environmental Health Engineering, International Campus, Shahid Sadoughi University of Medical Science, Yazd, Iran (Corresponding Author) Email: pezeshkimaryam@ymail.com

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-23]