

Efficiency of multi-walled carbon nanotubes for removal of 2-naphthol orange dye from aqueous solutions

SP. Moussavi*

MM. Emamjomeh**

*M.Sc. in Environmental Health Engineering, Yazd University of Medical Sciences, Yazd, Iran

**Associate Professor of Environmental Health Engineering, Social Determinants of Health Research Center, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

*Abstract

Background: Carbon nanotubes have been considered as dye adsorbent. The colored wastewater must be treated to reduce the environmental risks.

Objective: The aim of this study was to determine the efficiency of multi-walled carbon nanotubes for removal of 2-naphthol orange dye from aqueous solutions.

Methods: This experimental study was conducted at school of public health affiliated to Yazd University of medical sciences during 2012. The effects of different parameters including detention time, PH value, mixing intensity, the initial concentration of dye, and carbon nanotubes dosage were studied for removal of dye. All experiments were repeated twice and then adsorption isotherms and kinetics of different models were analyzed by comparing the coefficient of determination.

Findings: The maximum dye adsorption occurred during the first 30 minutes. The sorption capacity for adsorption of the dye was found to be 2.76 mg/gr. The dye removal efficiency was increased from 87% to 97.2% by decreasing the initial concentration of dye from 100 to 25 mg/l. By increasing the adsorbent dose from 0.05 to 0.4 g/l, the dye removal efficiency was increased from 70.7% to 94.8%. The general order kinetic model provided the best fit to the pseudo-second order kinetic adsorption model and the equilibrium data were best fitted to the Freundlich isotherm model. The maximum efficiency was found to be 97.2%.

Conclusion: Multi-walled carbon nanotubes can be effective for removal of 2-naphthol orange dye.

Keywords: Carbon, Nanotubes, 2-naphthol, Dye, Wastewater

Corresponding Address: Mohammad Mahdi Emamjomeh, School of Public Health, Qazvin University of Medical Sciences, Shahid Bahonar Blvd., Qazvin, Iran

Email: m_emamjomeh@yahoo.com

Tel: +98-281-2237269

Received: 10 Jun 2013

Accepted: 19 Oct 2013

بررسی کارایی نانوتیوب‌های کربنی چند جداره در حذف رنگ ۲- نفتول نارنجی از محلول‌های آبی

سیده پروین موسوی*

دکتر محمد مهدی امام جمعه**

* کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط پردیس بین‌الملل دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد
** دانشیار مهندسی بهداشت محیط مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت دانشگاه علوم پزشکی قزوین

آدرس نویسنده مسؤول: قزوین، بلوار شهید باهنر، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، دانشکده بهداشت، تلفن ۰۲۸۱-۲۲۳۲۲۶۹

Email: m_emamjomeh@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۰

* چکیده

زمینه: نانوتیوب‌های کربنی به عنوان جاذب مورد توجه هستند. پساب‌های رنگی باید تصفیه شوند تا خطرات زیست محیطی کاهش یابد.
هدف: مطالعه به منظور تعیین کارایی نانوتیوب‌های کربنی چند جداره در جذب رنگ ۲- نفتول نارنجی از محلول‌های آبی انجام شد.
مواد و روش‌ها: این مطالعه تجربی در سال ۱۳۹۱ در دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی یزد انجام شد. اثر زمان تماس، pH، شدت اختلاط، غلظت اولیه رنگ و دوز نانوتیوب‌ها در حذف رنگ بررسی شد. نمونه‌ها با دو بار تکرار مورد آزمون قرار گرفتند و مدل‌های مختلف ایزوترم و سرعت واکنش جذب از طریق مقایسه ضریب تعیین تحلیل شدند.
یافته‌ها: حداکثر جذب رنگ در ۳۰ دقیقه اول و ظرفیت جذب سطحی رنگ ۲/۷۶ میلی‌گرم بر گرم بود. با کاهش غلظت اولیه رنگ از ۱۰۰ به ۲۵ میلی‌گرم در لیتر، کارایی حذف از ۸۷٪ به ۹۷/۲٪ افزایش یافت و با افزایش جاذب از ۰/۰۵ به ۰/۴ گرم، کارایی حذف از ۷۰/۷٪ به ۹۴/۸٪ افزایش یافت. سرعت واکنش از معادله درجه دوم کاذب و ایزوترم از مدل فروندلیچ تبعیت کرد و حداکثر کارایی حذف ۹۷/۲٪ بود.
نتیجه‌گیری: نانوتیوب‌های کربنی چند جداره به دلیل عملکرد قابل توجه می‌توانند جهت حذف رنگ ۲- نفتول نارنجی مؤثر باشند.

کلیدواژه‌ها: کربن، نانوتیوب‌ها، ۲- نفتول، رنگ، پساب

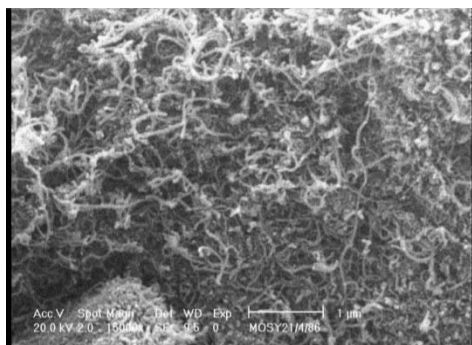
* مقدمه:

تصفیه زیستی، انعقاد و لخته‌سازی، تصفیه با اُزن، انعقاد الکتروشیمیایی، اکسیداسیون شیمیایی، فیلتراسیون غشایی، تبادل یون، تجزیه فتوکاتالیتیکی و جذب سطحی.^(۸-۱۱) اگرچه تصفیه زیستی نسبت به سایر روش‌ها، هزینه کمتری دارد، ولی در رنگ‌بری کاربردی ندارد؛ زیرا رنگ‌ها سمی هستند و کارایی حذف این روش در حضور ترکیب‌های سمی، کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد.^(۱۲)

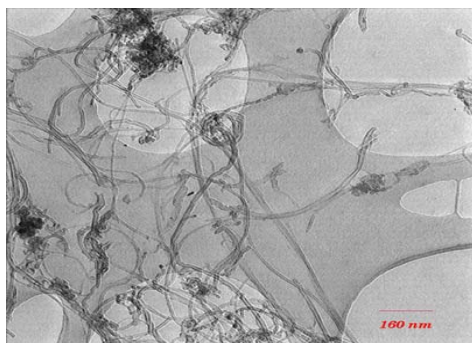
اکثر مطالعه‌های انجام شده در زمینه حذف رنگ‌ها، بر پایه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته است که علی‌رغم میزان بالای حذف رنگ، تشکیل محصول‌های جانبی یکی از معایب این روش محسوب می‌شود. فرآیند جذب روشی ساده، بسیار مؤثر و با بهره‌برداری آسان است.^(۱۰، ۱۳)

رنگ‌ها به طور گسترده‌ای در نساجی، چرم‌سازی، کاغذسازی، پلاستیک و صنایع دیگر به کار می‌روند.^(۱-۳) رنگ‌ها موادی با ساختار پیچیده هستند که طی مراحل مختلف نظیر رنگ‌رزی و تکمیل در صنعت نساجی به محیط زیست وارد می‌شوند.^(۴) صنعت نساجی آب زیادی مصرف می‌کند و یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان فاضلاب صنعتی است.^(۵) رنگ زیاد در فاضلاب می‌تواند شفافیت آب و فتوسنتز را کاهش دهد. به همین علت، پساب‌های رنگی باید قبل از تخلیه تصفیه شوند تا تهدید زیست محیطی را کاهش دهند.^(۶، ۷)

رنگ‌ها به طور معمول شامل راکتیو، دیسپرس، اسیدی و مستقیم هستند.^(۷) برای حذف این ترکیب‌ها از پساب‌های رنگی، روش‌های متعددی توسعه یافته‌اند؛ مانند



شکل ۱- نمای میکروسکوپی الکترونی روبشی نانوتیوب‌های کربنی چند جداره



شکل ۲- نمای میکروسکوپی الکترونی عبوری نانوتیوب‌های کربنی چند جداره

برای تهیه نمونه‌ها از رنگ ۲- نفتول نارنجی (شرکت Aldrich آمریکا) استفاده شد. رنگ از نوع اسیدی با فرمول $C_{16}H_{11}N_2NaO_4S$ و وزن مولکولی ۳۵۰/۳۳ گرم بر مول و طول موج حداکثر ۴۸۴ نانومتر تهیه شد. برای تهیه محلول‌ها با غلظت‌های مشخص از محلول ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر رنگ استفاده شد. با توجه به آزمایش‌های اولیه انجام شده و مطالعه‌های مشابه، متغیرهای مختلف مؤثر در حذف رنگ شامل زمان تماس، pH، غلظت اولیه رنگ، دوز نانوتیوب‌های کربنی و شدت اختلاط برای حذف رنگ مطالعه شدند. از هیدروکسید سدیم و اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال جهت تنظیم pH نمونه‌ها استفاده شد. جاذب نانوتیوب‌های کربنی چند جداره در دوزهای مختلف ۰/۵ تا ۰/۴ گرم در لیتر برای

جاذب‌های مختلفی مانند خاک رسی، کربن فعال، چیتوسان، خاکستر فرار، نانومواد و سایر جاذب‌ها برای حذف رنگ از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این میان نانوتیوب‌های کربنی (CNTs) برای حذف موفقیت‌آمیز رنگ از محلول‌های آبی پیشنهاد شده‌اند. نانوتیوب‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ توسط سومیا ایچیمیا کشف شدند و شامل نانوتیوب‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) و نانوتیوب‌های کربنی تک جداره (SWCNTs) هستند.^(۱۳-۱۵) نانوتیوب‌های کربنی به علت ساختار لوله‌ای توخالی منحصر به فرد، خصوصیات الکترونیکی، دارا بودن کاربردهای متنوع در وسایل ذخیره هیدروژن و سنسورها و همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد، بسیار مورد توجه هستند.^(۱۶) نانوتیوب‌های کربنی می‌توانند جاذب ایده‌آلی برای حذف رنگ از فاضلاب باشند.^(۱۷) نانوتیوب‌های کربنی به علت سطح مخصوص زیاد، اندازه کوچک و ساختار لایه‌ای و توخالی برای حذف آلاینده‌های آلی و غیرآلی از فاضلاب، به عنوان جاذب جدید مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند.^(۱۸،۱۹) خصوصیات ساختاری مثل قطر منفذ و تخلخل نانوتیوب‌های کربنی می‌تواند میزان جذب را تعیین کند.^(۲۰) این مطالعه با هدف تعیین کارآیی نانوتیوب‌های کربنی چند جداره در جذب رنگ ۲- نفتول نارنجی از محلول‌های آبی انجام شد.

* مواد و روش‌ها:

این مطالعه تجربی در سال ۱۳۹۱ در آزمایشگاه پایلوت دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد انجام شد. نانوتیوب‌های کربنی چند جداره، محصول پژوهشگاه صنعت نفت ایران و دارای مشخصات زیر بود: قطر داخلی ۳/۸ نانومتر، قطر خارجی ۱۰ تا ۳۰ نانومتر، طول ۱۰ میکرومتر، خلوص ۹۵ درصد، مساحت سطح ویژه ۲۷۰ مترمربع بر گرم و هدایت الکتریکی ۱۵۰۰ (شکل‌های شماره ۱ و ۲).

معادله‌های زیر محاسبه شد: (۱۷)

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{معادله لانگمیر}$$

q_e = غلظت ماده جذب‌شونده در فاز جامد در تعادل (mg/g)،
 q_{\max} = حداکثر ظرفیت جذب، K_L = ثابت تعادل، C_e = غلظت تعادلی
 محلول رنگی

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{معادله فروندلیچ}$$

K_F = ظرفیت جذب در واحد غلظت، $1/n$ = شدت جذب سطحی

به منظور تهیه اطلاعاتی در مورد عوامل مؤثر بر سرعت واکنش، از دو مدل درجه اول و دوم کاذب استفاده شد که به طور گسترده برای فرآیندهای جذب به کار می‌روند.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{سرعت واکنش درجه اول کاذب}$$

q_e و q_t به ترتیب = مقدار رنگ جذب شده روی جاذب در زمان t و در زمان تعادل، k_1 برابر است با ثابت سرعت جذب

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_{e2} - q_t)^2 \quad \text{سرعت واکنش درجه دوم کاذب}$$

با توجه به این معادله، ارتباط بین t/q_t و زمان به صورت خطی و شیب خط حاصل برابر $1/q_e$ و عرض از مبدا آن $1/k_2 q_e^2$ است که این ضرایب با رسم تغییرات t/q_t در مقابل زمان به دست آمده است. (۱۸۶)

مدل‌های مختلف ایزوترم و سرعت جذب نیز از طریق مقایسه ضریب تعیین (R^2) کل تعداد نمونه‌ها به وسیله نرم‌افزار اکسل نسخه ۲۰۰۷ تحلیل شدند.

* یافته‌ها:

مقدار pH محلول نقش مهمی در فرآیند و میزان ظرفیت جذب داشت. حداقل کارایی جذب در محیط قلیایی بود؛ به طوری که با تغییر pH از ۳ به ۷، تغییر چشمگیری در حذف رنگ مشاهده نشد ولی ظرفیت جذب رنگ با افزایش pH از ۷ تا ۱۱، کاهش شدیدی یافت.

با افزایش غلظت اولیه رنگ ۲- نفتول نارنجی در زمان‌های مختلف، ظرفیت جذب سطحی افزایش، ولی

حذف محلول‌های رنگی با غلظت‌های مختلف ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در مدت زمان‌های مختلف ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه آزمایش شد. اختلاط بین شدت‌های ۴۰ تا ۱۲۰ دور در دقیقه بر روی شیکر انجام شد. اثر pH محلول بر جذب رنگ روی نانوتیوب‌های کربنی چند جداره در شرایط زیر مطالعه شد: دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت اولیه ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر، دوز جاذب ۰/۳ گرم در لیتر و شدت اختلاط ۱۲۰ دور در دقیقه (rpm). سپس اثر غلظت‌های اولیه رنگ با مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ و ۱۸۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، pH=۳ و دوز جاذب ۰/۳ گرم در لیتر نانوتیوب کربنی چند جداره (حجم نمونه ۱۰۰ میلی‌لیتر) بررسی شدند. همچنین اثر شدت اختلاط در مقادیر ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ دور در دقیقه با غلظت اولیه رنگ ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر در زمان ۱۸۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، pH=۳ و دوز ۰/۳ گرم در لیتر نانوتیوب‌های کربنی چند جداره مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر دوزهای جاذب ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ گرم در لیتر نانوتیوب‌های کربنی چند جداره بر کارایی حذف رنگ ۲- نفتول نارنجی در غلظت‌های اولیه مختلف رنگ بررسی شد. در پایان هریک از مراحل آزمایش، از فیلتر استات سلولز ۰/۲ میکرون محصول شرکت سارتریوس آلمان برای جداسازی نانوتیوب‌ها از محلول، استفاده شد و سنجش غلظت رنگ در نمونه‌های استاندارد و مجهول با استفاده از اسپکترومتر UV/Visible مدل SP-3000 Puls ژاپن و رسم منحنی کالیبراسیون در طول موج ۴۸۴ نانومتر انجام شد. (۱۶) تمام آزمایش‌ها دو بار تکرار و میزان جذب رنگ با معادله زیر محاسبه شد:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{M} \times V$$

C_0 = غلظت اولیه رنگ (mg/l)، C_e = غلظت پایانی رنگ (mg/l)،

M = میزان نانوتیوب کربنی چند جداره مصرفی (g)، V = حجم مایع

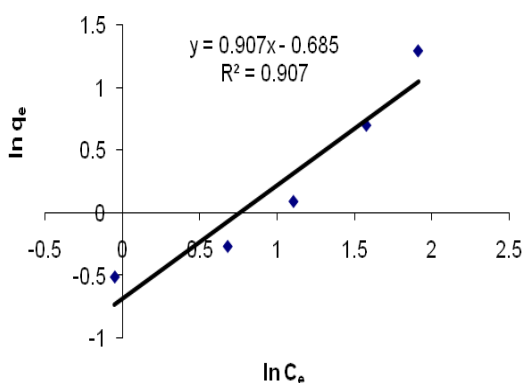
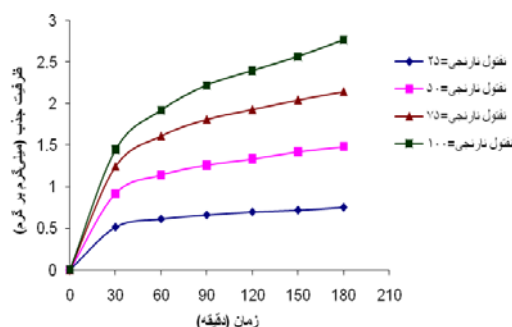
در این تحقیق داده‌های تجربی تعادل جذب با مدل‌های ایزوترم لانگمیر و فروندلیچ که بیان‌گر ارتباط تعادلی غلظت ماده حذف‌شونده بین ماده جاذب و محلول است، با

کارایی حذف رنگ کاهش یافت (نمودار شماره ۱).

حداکثر کارایی حذف ۹۷/۲ درصد بود. ایزوترم مدل فروندلیچ، نسبت به مدل ایزوترمی لانگمیر بر نتایج آزمایش ایزوترمی انطباق بهتری داشت و ضریب همبستگی آن برابر ۰/۹۰۷ بود (نمودار شماره ۳).

نمودار ۱- ظرفیت جذب نسبت به زمان در غلظت‌های اولیه مختلف رنگ بر حسب میلی گرم بر لیتر (pH=۳) و غلظت ۰/۳ گرم نانوتیوب کربنی

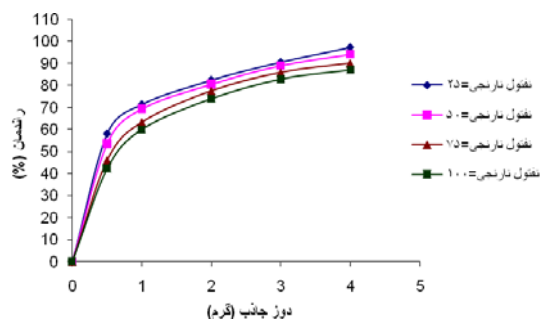
نمودار ۳- ایزوترم فروندلیچ نانوتیوب کربنی با دوزهای جاذب ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ گرم (زمان ۲۴ ساعت در pH=۳ و غلظت اولیه رنگ ۲۵ میلی گرم در لیتر)



با افزایش شدت اختلاط از ۴۰ به ۱۲۰ دور در دقیقه، کارایی جذب از ۶۸/۴ به ۹۷/۸ درصد افزایش یافت. با افزایش دوز جاذب، کارایی حذف رنگ افزایش یافت (نمودار شماره ۲).

زمان تعادل واکنش جذب، ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد. حداکثر مقدار رنگ جذب شده در واحد جرم جاذب در این زمان تعادل برای غلظت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر به ترتیب برابر ۰/۷۵۴، ۱/۴۸۱، ۲/۱۴۵ و ۲/۷۶۳ میلی گرم بر گرم به دست آمد.

نمودار ۲- تغییرات کارایی حذف رنگ نسبت به دوز جاذب در غلظت‌های اولیه مختلف رنگ بر حسب میلی گرم بر لیتر (pH=۳) و زمان ۱۸۰ دقیقه



* بحث و نتیجه‌گیری:

این مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت اولیه رنگ، کارایی حذف کاهش، ولی ظرفیت جذب افزایش یافت. در غلظت اولیه پایین، جذب رنگ توسط جاذب بسیار زیاد است و به سرعت به تعادل می‌رسد. در مقدار مشخصی از جاذب، با افزایش غلظت رنگ، مقدار ماده جذب شده در واحد جرم جاذب، افزایش و در نتیجه کارایی جذب کاهش می‌یابد.^(۳) ژو و همکاران در سال ۲۰۱۰ جذب رنگ متیل نارنجی (MO) را با استفاده از نانوتیوب کربنی چند جداره انجام و نشان دادند که ظرفیت جذب رنگ MO با افزایش غلظت اولیه رنگ، افزایش یافت.^(۱۴)

حداکثر جذب رنگ در ۳۰ دقیقه اول و ظرفیت جذب سطحی رنگ ۲/۷۶ میلی گرم بر گرم بود. با کاهش غلظت اولیه رنگ از ۱۰۰ به ۲۵ میلی گرم در لیتر، کارایی حذف از ۸۷ درصد به ۹۷/۲ درصد افزایش یافت و با افزایش جاذب از ۰/۰۵ به ۰/۴ گرم، کارایی حذف از ۷۰/۷ درصد به ۹۴/۸ درصد افزایش یافت. سرعت واکنش از معادله درجه دوم کاذب و ایزوترم از مدل فروندلیچ تبعیت کرد و

مراحل اولیه، تعداد زیادی از مکان‌های سطحی خالی برای جذب سطحی در دسترس است و با گذشت زمان، اشغال مکان‌های سطحی خالی باقی‌مانده مشکل می‌شود؛ زیرا بین مولکول‌های رنگ جذب شده روی سطح جامد و مولکول‌هایی که در حالت محلول قرار دارند، دافعه به وجود می‌آید.^(۱۴) در مطالعه موسوی و همکاران که در سال ۲۰۱۳ در زمینه جذب اسید هیومیک از محلول‌های آبی توسط نانوتیوب‌های کربنی تک جداره انجام شد، اثر زمان تماس در فواصل زمانی ۱ تا ۱۸۰ دقیقه با غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بررسی شد و حداکثر کارایی حذف در زمان تماس ۳۰ دقیقه اتفاق افتاد.^(۲۰) در حالی که در مطالعه حاضر، حداکثر کارایی حذف رنگ اسیدی با غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر و دوز بهینه ثابت جاذب ۰/۳ گرم نانوتیوب‌های کربنی چند جداره، در زمان تماس ۶۰ دقیقه اتفاق افتاد.

مدرکیان و همکاران در سال ۲۰۱۱ در مطالعه‌ای تحت عنوان حذف رنگ‌های کاتیونی از محلول‌های آبی با استفاده از نانوتیوب‌های کربنی چند جداره مگنتیک شده، داده‌های تحقیق خود را با مدل جذب لانگمیر تحلیل کردند.^(۶)

یافته‌های مطالعه نشان داد که سرعت جذب از سرعت واکنش درجه دوم کاذب تبعیت می‌کند ($R^2=0/968$). جیانگ جی و همکاران در سال ۲۰۱۱ در مطالعه‌ای حذف رنگ متیلن آبی را با استفاده از نانوتیوب‌های کربنی چند جداره بررسی کردند. سرعت واکنش جذب در مطالعه آن‌ها با مدل درجه دوم کاذب توصیف شد که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد.^(۱۱)

مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش دوز جاذب، کارایی حذف افزایش و ظرفیت جذب کاهش یافت. همچنین به علت داشتن حداکثر جذب در ۳۰ دقیقه اول، مدت ۳۰ دقیقه به عنوان زمان بهینه تعیین شد. با کاهش مقدار pH از ۱۱ به ۳ کارایی حذف افزایش یافت و بیش‌ترین کارایی حذف رنگ در pH برابر ۳ (pH بهینه) به دست آمد. با افزایش شدت اختلاط، کارایی حذف

بررسی کارایی حذف رنگ آزو در پساب‌های نساجی در غلظت‌های اولیه مختلف با دوز جاذب بهینه ۰/۸ گرم کربن فعال تهیه شده از چوب درخت گردو، در سال ۱۳۸۹ توسط محوی و هبیتی انجام شد. نتایج حاکی از این بود که کارایی حذف رنگ در غلظت‌های اولیه ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب برابر با ۵۶/۵۶، ۴۰/۰۸، ۳۹/۶۸ و ۲۸/۰۲ درصد بود.^(۱۹) در حالی که در مطالعه حاضر برای حذف همین غلظت‌ها از رنگ اسیدی مورد مطالعه، با دوز بهینه جاذب ۰/۳ گرم نانوتیوب‌های کربنی چند جداره، کارایی حذف به ترتیب برابر با ۸۸/۹، ۹۰/۵، ۸۵/۸ و ۸۲/۹ درصد بود.

ماچادو و همکاران در سال ۲۰۱۱ اثرات pH اولیه را بر روی میزان حذف رنگ راکتیو قرمز (RRM) M-2BE در محلول‌های آبی به کمک نانوتیوب‌های کربنی چند جداره بررسی کردند و نشان دادند با استفاده از جاذب نانوتیوب‌های کربنی چند جداره و کاهش مقدار pH از ۲ به ۱۰، کارایی درصد حذف رنگ (RRM) کاهش یافت.^(۳) این نتایج با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. محوی و هبیتی در مطالعه خود محلول رنگ را با pH‌های ۵، ۷، ۹ و ۱۱ تهیه کردند. شرایط بهینه جذب در pH=۵ و کارایی حذف در این pH، ۵۲/۴۶ درصد بود.^(۱۹) در حالی که کارایی حذف نانوتیوب‌های کربنی چند جداره در حذف رنگ اسیدی مورد مطالعه در تحقیق حاضر، در شرایط اسیدی ۹۲/۵ درصد بود.

در این مطالعه با افزایش دوز جاذب، کارایی جذب نیز زیاد شد. وو و همکاران در سال ۲۰۰۷ در مطالعه‌ای جذب رنگ راکتیو را بر روی نانوتیوب‌های کربنی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که ظرفیت جذب ابتدا افزایش یافت و سپس همچنان که مقدار نانوتیوب‌های کربنی افزایش می‌یافت، ظرفیت جذب افت کرد که این نتیجه با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد.

در خصوص اثر زمان تماس، مطالعه‌ها نشان داده‌اند که جذب رنگ در مراحل اولیه زمان تصفیه، سریع و در نزدیکی حالت تعادل، کند می‌شود. واضح است که در

5. Mishra AK, Arockiadoss T, Ramaprabhu S. Study of removal of azo dye by functionalized multi walled carbon nanotubes. Chem Eng J 2010 Sep 1; 162 (3): 1026-34
6. Madrakian T, Afkhami A, Ahmadi M, Bagheri H. Removal of some cationic dyes from aqueous solutions using magnetic-modified multi-walled carbon nanotubes. J Hazard Mater 2011 Nov 30; 196: 109-14
7. Dalvand A, Gholami M, Goneidi A, et al. Study of efficiency of electrochemical coagulation for Reactive Red 198 dye removal from color effluent. J Color Science Technology 2010; 3: 97-105 [In Persian]
8. Ghaneian MT. Application of ozonation process in removal of Reactive Red 198 dye in alkaline conditions. Yazd Faculty of Public Health. J Toloee-Behdasht 2011; 9 (2-3): 127-38 [In Persian]
9. Gong J, Wang B, Zeng G, et al. Removal of cationic dyes from aqueous solution using magnetic multi-wall carbon nanotube nanocomposite as adsorbent. J Hazard Mater 2009 May 30; 164 (2-3): 1517-22
10. Qu S, Huang F, Yu S, et al. Magnetic removal of dyes from aqueous solution using multi-walled carbon nanotubes filled with Fe₂O₃ particles. J Hazard Mater 2008 Dec 30; 160 (2-3): 643-7
11. Jiang G, Zheng X, Wang Y. Photo-degradation of methylene blue by multi-walled carbon nanotubes/TiO₂ composites. Powder Technol 2011; 207: 465-9
12. Kuo CY. Prevenient dye-degradation mechanisms using UV/TiO₂/carbon nanotubes process. J Hazard Mater 2009 Apr 15; 163 (1): 239-44
13. Yao Y, Bing H, Feifei X, et al. Equilibrium and kinetic studies of methyl orange adsorption on multiwalled carbon

افزایش یافت و بیش‌ترین میزان حذف در ۱۲۰ دور در دقیقه بود. سرعت واکنش با معادله درجه دوم کاذب توصیف شد و ایزوترم جذب از مدل فروندلیچ تبعیت کرد. نانوتیوب‌های کربنی چند جداره را به دلیل اندازه کوچک، سطح مقطع زیاد، شکل کریستالی و نظم شبکه‌ای منحصر به فرد، واکنش‌پذیری بسیار زیاد و عملکرد قابل توجه به عنوان جاذب در حذف آلاینده‌های آلی از محلول‌های آبی، می‌توان جهت حذف رنگ ۲- نفتول نارنجی به طور مؤثری به کار برد.

* سپاس‌گزاری:

از همکاری مسؤولین و کارکنان آزمایشگاه گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی یزد در انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

* مراجع:

1. Chang PR, Zheng P, Liu B, et al. Characterization of magnetic soluble starch-functionalized carbon nanotubes and its application for the adsorption of the dyes. J Hazard Mater 2011 Feb 28; 186 (2-3): 2144-50
2. Wu CH. Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: equilibrium, kinetics and thermodynamics. J Hazard Mater 2006 Jun 1; 144 (1-2): 93-100
3. Machado FM, Bergmann CP, Fernandes TH, et al. Adsorption of Reactive Red M-2BE dye from water solutions by multi-walled carbon nanotubes and activated carbon. J Hazard Mater 2011 Sep 15; 192 (3): 1122-31
4. Ghaneian MT, Ghanizadeh G, Gholami M, et al. Application of eggshell as a natural sorbent for the removal of Reactive Red 123 dye from synthetic textile wastewater. J Tabib-e-Shargh 2010 winter; 11 (4): 25-34 [In Persian]

- nanotubes. Chem Eng J 2011 May 15; 170 (1): 82-9
14. Zhu Y. Preparation, characterization, adsorption kinetics and thermodynamics of novel magnetic chitosan enwrapping nanosized $c\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and multi-walled carbon nanotubes with enhanced adsorption properties for methyl orange. Bioresource Technol 2010; 101: 5063-9
15. Ravelo-Pérez LM, Hernández-Borges J, Rodríguez-Delgado MA. Multi-walled carbon nanotubes as efficient solid-phase extraction materials of organophosphorus pesticides from apple, grape, orange and pineapple fruit juices. J Chromatogr A 2008 Nov 21; 1211 (1-2): 33-42
16. Xu S, Ng J, Zhang X, et al. Adsorption and photocatalytic degradation of Acid Orange 7 over hydrothermally synthesized mesoporous TiO_2 nanotube. Colloids and Surfaces A 2011 Apr 20; 379 (1-3): 169-75
17. Hadi M, Samarghandi MR, Azizian S, et al. Using Thomas Model to evaluate dye removal from aqueous solutions in Fixed-bed columns of Activated Carbon. J Water & Wastewater 2011; 1: 23-34 [In Persian]
18. Al-Rashed S, Al-Gaid A. Kinetic and thermodynamic studies on the adsorption behavior of Rhodamine B dye on Duolite C-20 resin. J Saudi Chemical Society 2012 Apr; 16 (2): 209-15
19. Mahvi AH, Heibati B. Removal efficiency of azo dyes from textile effluent using activated carbon made from walnut wood and determination of isotherms of acid red 18. J Salamat Behdasht Ardabil 2011; 1 (3): 7-15 [In Persian]
20. Moussavi SP, Ehrampoush MH, Mahvi AH, et al. Adsorption of Humic Acid from Aqueous Solution on Single-Walled Carbon Nanotubes. Asian J Chem 2013; 25 (10): 5319-24